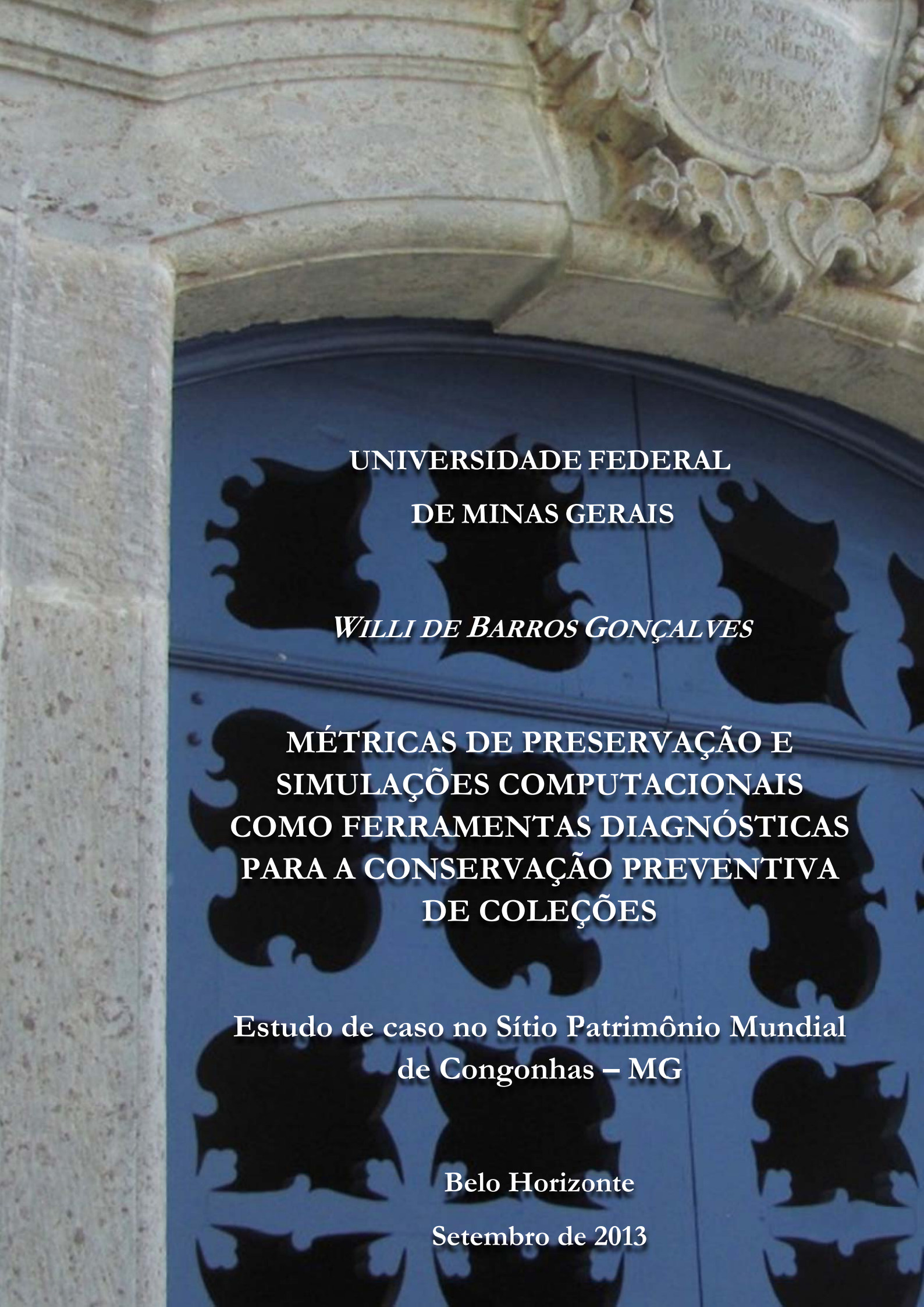


UNIVERSIDADE FEDERAL
DE MINAS GERAIS

WILLI DE BARROS GONÇALVES

MÉTRICAS DE PRESERVAÇÃO E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS COMO FERRAMENTAS DIAGNÓSTICAS PARA A CONSERVAÇÃO PREVENTIVA DE COLEÇÕES

Estudo de caso no Sítio Patrimônio Mundial de Congonhas – MG

Belo Horizonte
Setembro de 2013

WILLI DE BARROS GONÇALVES

MÉTRICAS DE PRESERVAÇÃO E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS COMO FERRAMENTAS DIAGNÓSTICAS PARA A CONSERVAÇÃO PREVENTIVA DE COLEÇÕES

Estudo de caso no Sítio Patrimônio Mundial de Congonhas - MG

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Artes da Escola de Belas Artes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Artes.

Área de Concentração: Arte e Tecnologia da Imagem

Linha de Pesquisa: Criação, Crítica e Preservação da Imagem

Área de estudo: Conservação Preventiva

Orientador: Prof. Luiz Antônio Cruz Souza, Dr.

Belo Horizonte

Setembro de 2013

Gonçalves, Willi de Barros, 1970-
Métricas de preservação e simulações computacionais como ferramentas diagnósticas para a conservação preventiva de coleções [manuscrito] : estudo de caso no sítio patrimônio mundial de Congonhas – MG / Willi de Barros Gonçalves. – 2013.
492 f. : il.

Orientador: Luiz Antônio Cruz Souza.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Belas Artes.

1. Capela Santa Ceia (Congonhas, MG) – Teses. 2. Conservação preventiva – Teses. 3. Variações climáticas – Teses. 4. Ventilação – Teses. 5. Simulação (Computadores) – Teses. I. Souza, Luiz Antônio Cruz, 1962- II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Belas Artes. III. Título.

CDD: 702.88

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE BELAS ARTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARTES

Assinatura da Banca Examinadora na Defesa de tese do aluno **WILLI DE BARROS GONÇALVES** Número de Registro **2008700130**.

Titulo: **MÉTRICAS DE PRESERVAÇÃO E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS COMO FERRAMENTAS DIAGNÓSTICAS PARA A CONSERVAÇÃO PREVENTIVA DE COLEÇÕES**
Estudo de caso no Sítio Patrimônio Mundial de Congonhas - MG

Prof. Dr. Luiz Antônio Cruz Souza – Orientador - EBA/UFMG

Profa. Dra. Adriana Bernardi - Titular – CNR-ISAC/Padua/Itália

Prof. Dr. Rudolf Huebner - Titular – Escola de Engenharia/UFMG

Profa. Dra. Eleonora Assis – Titular – Escola de Arquitetura/UFMG

Profa. Dra. Alessandra Rosado - Titular – EBA/UFMG

Prof. Dr. Carlos Alberto Filgueiras - Titular – ICEX/UFMG

Belo Horizonte, 30 de setembro de 2013

DEDICADA A

MARIA TEREZA

OLIVIA

LUIGI

E ESPECIALMENTE A MAIRA, SEM QUEM EU NÃO SERIA POSSÍVEL.

AGRADECIMENTOS

Aos profs. Luiz Antônio Cruz Souza e Eleonora Sad de Assis, pelas oportunidades, ensinamentos e exemplos que direcionaram minha carreira profissional;

Ao Prof. Rudolf Huebner, pela atenção, boa vontade, disponibilidade, colaboração e orientação fundamentais para a conclusão deste trabalho;

Aos Profs. Magali Meleu Sehn e Luiz Antônio Cruz Souza por assumirem meus encargos didáticos durante o período de licença;

À FAPEMIG pelo financiamento que viabilizou este trabalho;

À Pró-reitoria de pesquisa da UFMG, e ao Programa de Pós Graduação da EBA/ UFMG pelo apoio;

Ao Pe. Benedito Pinto Rocha, pela permissão de acesso à Capela;

À Profa. Lucienne Elias, pelas informações técnicas e intercessão;

À Profa. Behania Reis Veloso, diretora do CECOR/EBA/UFMG, pelo apoio, por meio de quem agradeço aos demais colegas professores da EBA que colaboraram neste trabalho;

Ao Arq. João Carlos Oliveira, chefe do escritório técnico do IPHAN em Congonhas, pelas informações técnicas, colaboração e permissão de uso do espaço para instalação da estação meteorológica;

Às Sras. Lílian Aparecida Oliveira e Andréia Neves Figueiredo, diretora e museóloga do Museu do Diamante em Diamantina, Sr. Nídio Porto, gerente do Museu da Cidade de Governador Valadares e Sr. Maura Regina, diretora da Casa da Memória do Vale do São Francisco em Januária, pela permissão de acesso às instituições e seus acervos para monitoramento ambiental;

Ao Sr. Bráulio Lopes Babêtto, pela colaboração na montagem e desmontagem da estação meteorológica em Congonhas e confecção de complemento da maquete física;

Aos Profs. Guilherme Papini e Paulo Scold, pela colaboração e permissão de acesso ao túnel de vento do DEMEC/UFMG;

Ao acadêmico de Engenharia Aeroespacial Carlos Alberto Silva Júnior, pela colaboração na configuração das simulações fluidodinâmicas;

Aos acadêmicos Ingo Specht, Matheus Ungaretti e Alex Tomich pela colaboração durante os ensaios no túnel de vento;

Ao Sr. Lizandro Gemiacki, pela permissão de acesso à estação meteorológica do 5º DISME/ INMET, por meio de quem agradeço aos demais técnicos que colaboraram neste trabalho;

Às técnicas do LACICOR Selma Miranda e Renata Novais e ao Sr. Elias Antunes, por meio de quem agradeço aos demais funcionários da EBA/UFMG que colaboraram neste trabalho;

Ao Arq. Tiago Castelo Branco Lourenço pela confecção das maquetes;

Ao Srs. Mauro Neves, da CPE Tecnologia, Augusto Rocha Duarte, Leonardo Antônio Leite, Sérgio Lúcio Lopes Pinto e João Cláudio Werneck, da PEEX Engenharia, pela parceria e colaboração no escaneamento tridimensional da Capela;

À Profa. Magda Abreu, do IGC/UFMG pela orientação na fase de aferição dos instrumentos;

À Profa. Iraci Miranda, do TAU/UFMG, pela orientação no uso do programa *Energy Plus ©;*

À Profa. Alessandra Prata Shimomura pela troca de ideias e informações junto ao LNEC/Portugal;

A todos que nos últimos cinco anos colaboraram direta ou indiretamente para esta conquista.

O vento sopra onde quer.

Ouves a sua voz

mas não sabes de onde vem

nem para onde vai.

Jesus.

SUMÁRIO

Lista de símbolos ..... *xiii*

Lista de abreviaturas e siglas ..... *xvi*

Lista de figuras ..... *xviii*

Lista de tabelas ..... *xxv*

Lista de quadros ..... *xxviii*

Resumo ..... *xxix*

Abstract ..... *xxx*

INTRODUÇÃO 31

CAPÍTULO 1 – GERENCIAMENTO AMBIENTAL NO ÂMBITO DA CIÊNCIA DA CONSERVAÇÃO

1.1 – A Ciência da Conservação no âmbito transdisciplinar das ciências naturais – breve perspectiva histórica e desdobramentos atuais 39

1.2 – Conservação Preventiva e Gerenciamento de Riscos no âmbito da Ciência da Conservação 45

1.2.1 - Conservação Preventiva 45

1.2.2 - Gerenciamento de Riscos 49

1.3 – Gerenciamento e Conforto Ambiental no âmbito da Conservação Preventiva e da Gestão de Riscos 53

CAPÍTULO 2 – VENTILAÇÃO NATURAL OU FORÇADA COMO ESTRATÉGIA SUSTENTÁVEL DE GERENCIAMENTO AMBIENTAL

2.1 – Sustentabilidade Ambiental em um contexto de mudanças climáticas globais 55

2.2 – Conservação "verde": um recorte peculiar no campo da Sustentabilidade Ambiental 57

2.3 – O edifício como filtro protetor para as coleções 61

2.4 – Sistemas de climatização passivos, ativos e híbridos e seu papel na conservação de coleções 66

2.4.1 - Sistemas passivos ou híbridos de ventilação 71

2.4.2 - Estado da arte da pesquisa sobre sistemas passivos e híbridos de ventilação aplicados ao gerenciamento ambiental de coleções 74

2.4.3 - Sistemas de ar condicionado para gerenciamento ambiental de coleções 84

CAPÍTULO 3 – SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E SEU POTENCIAL NA CONSERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO CULTURAL 93

3.1 - Códigos de redes nodais multizonais 95

3.2 - Códigos de dinâmica de fluidos computacional 98

3.3 - Aplicações de simulações computacionais ao gerenciamento ambiental de coleções 102

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1 - Etapas de desenvolvimento do trabalho 111

4.2 – Definição e descrição do estudo de caso 111

4.2.1 - Capela da Ceia - Santuário de Bom Jesus de Matosinhos - Congonhas 113

4.3- Procedimentos adotados no levantamento arquitetônico e na elaboração de maquetes eletrônicas 117

4.4 - Preparação e procedimentos adotados no monitoramento ambiental contínuo em campo 119

4.5 - Procedimentos adotados no processamento dos dados climáticos 122

4.5.1 – Cálculo do potencial de desumidificação através da ventilação natural ou forçada 124

4.6 - Procedimentos adotados nas simulações computacionais 124

4.6.1 - Modelos preditivos por regressão linear múltipla 125

4.6.2 – Simulação do desempenho higrotérmico – programa *Energy Plus* © 126

4.6.2.1 - Critérios de convergência 128

4.6.2.2 - Análise de sensibilidade 129

4.6.2.3 - Simulação de modificações no regime de ventilação visando à melhoria das condições de conservação 130

4.6.2.4 - Comparação com modelos analíticos para cálculo de ventilação 131

4.6.3 - Simulações fluidodinâmicas – programa *Ansys CFX* © 132

4.6.3.1 - Domínio de simulação 132

4.6.3.2 - Condições de contorno 134

a. Perfil de velocidade do vento 134

4.6.3.3 - Refinamento da malha e critérios de convergência 139

4.6.3.4 - Simulação em regime transiente e métricas derivadas 142

4.7 - Procedimentos adotados nos ensaios em túnel de vento 143

4.7.1 – Maquetes físicas 144

4.7.2 – Medições de pressão 147

4.7.3 – Medição de perfis de velocidade do vento 149

4.7.4 – Velocimetria por imageamento de partículas (PIV) 151

4.8 - Procedimentos adotados para obtenção das métricas de preservação 153

4.8.1 - Índices de desempenho 153

4.8.1.1 – Flutuações de *UR* - *m*etodologia Bratasz-Kozłowski 153

4.8.1.2 - Ciclos de flutuação de *T* e *UR* - metodologia Camuffo-Pagan 154

4.8.2 - Isopermas e permanência ponderada pelo efeito cumulativo do tempo (isoperma-T) 155

4.8.3 - Índice de preservação (*IP*) e índice de preservação ponderado pelo efeito cumulativo do tempo (*IETP*) 156

4.8.4 - Conteúdo de umidade nas condições de equilíbrio (*EMC*) e mudança dimensional (*DC*) 157

4.8.5 - Fator de risco de mofo (*MRF*) 157

4.9 - Limites da pesquisa e incertezas experimentais 157
4.9.1 - Levantamento arquitetônico e elaboração de maquetes físicas e eletrônicas 158
4.9.2 - Monitoramento ambiental contínuo em campo e processamento de dados 159
4.9.3 - Simulações computacionais 159
4.9.4 - Ensaios em túnel de vento 161
4.9.5 - Obtenção e uso das métricas de preservação 162

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - Resultados do monitoramento ambiental 164
5.1.1 - Dados externos - Ouro Branco (INMET) / Congonhas (IPHAN) 164
5.1.1.1 - Temperatura, umidade relativa e precipitações 164
5.1.1.2 - Velocidade e direção do vento 171
5.1.1.3 - Estratégias arquitetônicas biocliomáticas aplicáveis ao clima de Ouro Branco .. 173
5.1.2 - Dados internos – Capela da Ceia - Congonhas 176
5.1.2.1 - Determinação de critérios-limite de *T* e *UR* para análise de índices de desempenho 179
a. Temperatura 179
b. Umidade relativa 180
b.1. Metodologia Bratasz-Kozłowski 181
5.1.3 - Potencial de desumidificação por meio de ventilação natural ou forçada 183
5.2 - Resultados das simulações computacionais 190
5.2.1 - Modelos preditivos por regressão linear múltipla 190
5.2.2 – Simulações de desempenho higrotérmico – programa *Energy Plus* © 193
5.2.2.1- Critérios de convergência e análise de sensibilidade 195
5.2.2.2 - Comparação com métodos analíticos de cálculo de ventilação 196
5.2.2.3 - Simulação de modificações no regime de ventilação visando à melhoria das condições de conservação 197
a. Regime 1 197
b. Regime 2 198
5.2.3 - Simulações fluidodinâmicas – programa *Ansys CFX* © 199
5.2.3.1 - Perfil de vento ASHRAE / regime permanente 199
5.2.3.2 - Perfil de vento ASHRAE / regime transiente 202
5.2.3.3 - Perfil de vento corrigido por função polinomial / regime permanente 205
5.2.3.4 - Perfil de vento corrigido por função polinomial / regime transiente 208
5.3 - Resultados de validação das simulações fluidodinâmicas por meio de ensaios em túnel de vento 210
5.3.1 - Medições de pressão 210
5.3.2 – Medições de perfis de velocidade do vento 212
5.3.3 - Velocimetria por imageamento de partículas (PIV) 213

5.4 - Métricas de preservação 215
5.4.1 - Métricas derivadas do monitoramento ambiental 215
5.4.1.1 - Índices de desempenho 215
a. Ciclos de flutuação de temperatura e umidade relativa 215
b. Zonas de segurança ambiental para coleções diversas e com artefatos de madeira 224
5.4.1.2 – Isopermas 226
5.4.1.3 - Índice de Preservação (*IP*) e índice de preservação ponderado pelo efeito cumulativo do tempo (*IETP*) 230
5.4.1.4 - Conteúdo de umidade nas condições de equilíbrio (*EMC*) e mudança dimensional (*DC*) 232
5.4.1.5 - Fator de risco de mofo (*MRF*) 233
5.4.2 - Métricas derivadas das simulações computacionais 234
5.4.2.1 - Índices de desempenho 234
a. Ciclos de flutuação de temperatura e umidade relativa 234
b. Zonas de segurança ambiental para coleções diversas e com artefatos de madeira 236
5.4.2.2 – Isopermas 237
a. Metodologia de Sebera (*P2/P1*) 237
b. Metodologia de Michalski (*LM*) 241
5.4.2.3 - Índice de Preservação (*IP*) e índice de preservação ponderado pelo efeito cumulativo do tempo (*IETP*) 246
5.4.2.4 - Conteúdo de umidade nas condições de equilíbrio (*EMC*) e mudança dimensional (*DC*) 248
5.4.2.5 - Fator de risco de mofo (*MRF*) 251

CONSIDERAÇÕES FINAIS 253

REFERÊNCIAS CITADAS 261

APÊNDICE A – MÉTRICAS DE PRESERVAÇÃO COMO FERRAMENTAS DIAGNÓSTICAS PARA O GERENCIAMENTO AMBIENTAL 333

A.1 - Índices de desempenho e critérios de classificação ambiental 336
A.2 - Isopermas 336
A.3 - Índice de Preservação (*IP*) e índice de preservação ponderado pelo efeito cumulativo do tempo (*IETP*) 345
A.3.1 - Aplicação do conceito do *IETP* aos modelos de Sebera e Michalski 352
A.4 - Conteúdo de umidade nas condições de equilíbrio (*EMC*) e mudança dimensional (*DC*) 352
A.5 - Fator de risco de mofo (*MRF*) 366
A.6 - Risco de corrosão 376

APÊNDICE B – ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA E INTERFACES ENTRE CONFORTO AMBIENTAL HUMANO E PARA COLEÇÕES 379

B.1 - Arquitetura bioclimática e estratégias arquitetônicas passivas visando o conforto ambiental humano e a eficiência energética dos edifícios 379

B.2 - Conforto ambiental humano *versus* conforto ambiental para coleções 384

B.3 - Estado da arte no Brasil 389

B.4 - Zoneamentos bioclimáticos como ferramenta de projeto 390

B.5 - Zoneamento bioclimático brasileiro 393

B.5.1 - Limitações e revisão do zoneamento bioclimático proposto na norma NBR 15220-3 399

B.5.2 - As tabelas de Mahoney 403

B.5.3 - Zoneamento bioclimático para o Estado de Minas Gerais 414

APÊNDICE C - PRINCÍPIOS QUE REGEM A VENTILAÇÃO NATURAL NOS EDIFÍCIOS QUE ABRIGAM COLEÇÕES 425

APÊNDICE D - DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E PROCEDIMENTOS DE AFERIÇÃO..... 439

D.1 - Monitoramento contínuo em campo 439

D.2 - Ensaios em túnel de vento 446

D.3 – Levantamento arquitetônico - escaneamento tridimensional 447

APÊNDICE E – ESTATÍSTICAS ADICIONAIS DOS DADOS CLIMÁTICOS E CONFIGURAÇÕES ADOTADAS NAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS 448

E.1 – Ouro Branco - dados climáticos - estatísticas descritivas adicionais e testes estatísticos de comparação 448

E.2 – Capela da Ceia - estatísticas 456

E.3 - Parâmetros utilizados para simulação no programa *Energy Plus* © 457

E.4 - Parâmetros utilizados para simulação no programa *Ansys CFX* © 469

LISTA DE SÍMBOLOS

A = constante pré-exponencial da equação de Arrhenius;

A1, A2, A3 = Indicadores de aridez do método de Mahoney, [adimensional];

A_f = Área efetiva das frestas [m^2];

AMA = Amplitude térmica média anual, [ºC, ºF, K];

AMM = Amplitude térmica média mensal, [ºC, ºF, K];

A_w = Atividade aquosa, no modelo GAB, [adimensional];

C = Concentração de poluente atmosférico, [ppb];

C_d = Coeficiente de descarga, [adimensional];

C_p = Coeficiente de pressão, [adimensional];

CR = Taxa de corrosividade, [adimensional];

DC = *Dimensional Change,* Mudança dimensional, [%];

Dm = Fração de dano potencial, [adimensional];

E = Energia de ativação, [J/mol, kJ/mol, kcal/mol];

EMC = *Equilibrium Moisture Content*, teor de umidade nas condições de equilíbrio, [%];

EMC_S = Teor de umidade nas condições de saturação, [%];

F = Fator de ponderação da metodologia Bratasz-Koslowski, [adimensional];

f_a = Fator de abertura das áreas de ventilação, [adimensional];

g = Vetor aceleração da 4gravidade, [m/s^2];

GQ = Vazão de ar média para o período analisado, p. ex., média anual [m^3/s];

GT_e = Temperatura média externa para o período analisado, p. ex., média mensal, [ºC, ºF, K];

GT_i = Temperatura média interna para o período analisado, p. ex., média semanal, [ºC, ºF, K];

GUR_e = Umidade relativa média externa para o período analisado, p. ex., média mensal, [%];

GUR_i = Umidade relativa média interna para o período analisado, p. ex., média semanal, [%];

GW_e = Razão de umidade média externa para o período analisado, p. ex., média mensal, [g/kg];

g_x = Gravidade escalar na direção *x,* [m/s^2];

g_y = Gravidade escalar na direção y, [m/s^2];

g_z = Gravidade escalar na direção z, [m/s^2];

H = *E*ntalpia, [J];

H1, H2, H3 = Indicadores de umidade do método de Mahoney, [adimensional];

H_e = *E*ntalpia do ar externo, [J];

H_{edif} = altura do edifício a ser considerada para estimativa do domínio de simulação, [m];

H_i = Entalpia do ar interno, [J];

h = Diferença de altura entre o centro da abertura de entrada do ar e o centro da abertura de saída do ar, [m];

$IETP$ = Índice de preservação ponderado pelo efeito cumulativo do tempo, [anos];

$IETP_{IPI}$ = Índice de preservação ponderado pelo efeito cumulativo do tempo calculado usando fórmula atribuída ao IPI por Padfield, [anos];

$IETP_{Padfield}$ = Índice de preservação ponderado pelo efeito cumulativo do tempo calculado usando fórmula de Padfield, [anos];

IP = Índice de preservação, [anos];

IP_{IPI} = Índice de preservação calculado usando fórmula atribuída ao IPI por Padfield, [anos];

$IP_{Padfield}$ = Índice de preservação calculado usando fórmula de Padfield, [anos];

k = Condutividade térmica, [W/m.K];

k_a = Coeficiente de vazão mássica de ar [kg/s.Pa];

k_f = Razão entre a taxa de flutuação de T_i e T_{emed}, [adimensional];

k_r = Constante de velocidade da reação do modelo de Arrhenius;

LIM = *Lowest Isopleth for Mould,* isopleta limite para germinação de mofo;

LM = Taxa de permanência instantânea, multiplicador de expectativa de vida, isoperma de Michalski, [adimensional];

LM-T= Taxa de permanência ponderada pelo efeito cumulativo do tempo, calculada pela metodologia de Michalski [adimensional];

$\dot{m}$ = Vazão mássica [kg/s];

M_0 = teor de umidade na monocamada molecular (superfície) do substrato;

maxEMC = *EMC* máximo, [%];

minEMC = *EMC* mínimo, [%];

MRF = *Mold Risk Factor*, Fator de risco de crescimento de mofo, [adimensional];

nf = Expoente de vazão mássica de ar, [adimensional];

p = Pressão estática, [Pa];

p_{ref} = Pressão de referência, [Pa];

P = Taxa de permanência instantânea, calculada pela metodologia de Sebera;

PMV = *Predicted Mean Vote,* voto médio predito, calculado pelo modelo de Fanger, [adimensional];

Q = vazão volumétrica [m^3/s];

r = Taxa de deterioração química (p. ex., por hidrólise);

r_{IPI} = Taxa de deterioração química calculada como recíproca de IP_{IPI};

$r_{Padfield}$ = Taxa de deterioração química calculada como recíproca de $IP_{Padfield}$;

r_T = taxa de deterioração ponderada pelo efeito cumulativo do tempo;

R = Constante universal dos gases perfeitos, [J/mol.K];

S = Termo de geração considerado na equação de balanço (massa, momento ou energia);

S_0 = Encolhimento tangencial da madeira seca, [%];

S_{EMC} = Encolhimento tangencial típico, [%];

t = Tempo, [s, h, anos];

T = Temperatura do ar, [ºC, ºF, K];

T_e = Temperatura do ar externo, [ºC, ºF, K];

T_b = Temperatura base, [ºC, ºF, K];

T_{emax} = Temperatura do ar externo, máxima diária, [ºC, ºF, K];

T_{emed} = Temperatura do ar externo, média diária, [ºC, ºF, K];

T_{emin} = Temperatura do ar externo, mínima diária, [ºC, ºF, K];

t_g = Tempo de germinação de mofo calculado pelo modelo de Isaksson, [dias];

T_i = Temperatura do ar interno, [ºC, ºF, K];

T_{imax} = Temperatura do ar interno, máxima diária, [ºC, ºF, K];

T_{imed} = Temperatura do ar interno, média diária, [ºC, ºF, K];

TMA = temperatura média anual, [ºC, ºF, K];

T_s = Temperatura do ar na abertura de saída, [ºC, ºF, K];

$T_{sistema}$ = Temperatura do ar insuflado pelo sistema de climatização, [ºC, ºF, K];

$T_{superfície}$ = Temperatura superficial, [ºC, ºF, K];

TOW = Time of Wetness, Tempo de umidade, fração de tempo com *UR>80%* nas últimas 24h, [adimensional];

$\mathbf{u}$ = Vetor velocidade, [m/s];

u = Velocidade escalar na direção *x,* [m/s];

U = Transmitância térmica, [W/m^2.K];

$\mathbf{u_{met}}$ = velocidade de referência do vento, medida na estação meteorológica, [m/s];

$\mathbf{u_{ref}}$ = velocidade de referência para normalização do perfil de velocidade do vento, [m/s];

UR = Umidade relativa do ar, [%];

UR_{crit} = Umidade relativa do ar crítica para germinação de mofo calculada pelo modelo de Clarke, [%];

UR_e = Umidade relativa do ar externo, [%];

UR_{emed} = Umidade relativa do ar externo, média diária [%];

UR_{eq} = Umidade relativa de equilíbrio, [%];

UR_i = Umidade relativa do ar interno, [%];

UR_{inf} = Limite inferior de umidade relativa do ar na metodologia Bratasz-Koslowski, [%];

UR_{imed} = Umidade relativa do ar interno, média diária [%];

UR_{sup} = Limite superior de umidade relativa do ar na metodologia Bratasz-Koslowski, [%];

v = Velocidade escalar na direção y, [m/s];

W = Razão de umidade do ar, [g/kg];

w = Velocidade escalar na direção z, [m/s];

W_e = Razão de umidade do ar externo, [g/kg];

W_{emax} = Razão de umidade do ar externo, máxima diária, [g/kg];

W_{emed} = Razão de umidade do ar externo, média diária, [g/kg];

W_{emin} = Razão de umidade do ar externo, mínima diária, [g/kg];

W_i = Razão de umidade do ar interno, [g/kg];

W_{imed} = Razão de umidade do ar interno, média diária, [g/kg];

$W_{sistema}$ = Razão de umidade do ar insuflado pelo sistema de climatização, [g/kg];

z = Altura de referência para cálculo da velocidade do vento, [m];

z_0 = Comprimento de rugosidade do terreno, [m];

z_{0ref} = Comprimento de rugosidade na estação meteorológica [m];

z_{met} = Altura de medição da velocidade do vento na estação meteorológica, [m];

α = Coeficiente representativo da rugosidade do terreno para cálculo da velocidade do vento, [adimensional];

α_{met} = Coeficiente representativo da rugosidade do terreno na estação meteorológica, [adimensional];

β_0, β_1, β_2 = Coeficientes do modelo de regressão linear múltipla, [adimensional];

δ = altura da camada limite atmosférica em um determinado local, [m];

δ_{met} = altura da camada limite atmosférica na estação meteorológica, [m];

ΔDC = Mudança dimensional com relação a EMC = 10%, [%];

ΔH = Diferença de entalpia, [J];

ΔP = Diferença de pressão, [Pa];

ΔUR = Flutuação, desvio ou diferença de umidade relativa do ar, [%];

ϕ = Propriedade considerada na equação de balanço (massa, momento ou energia);

μ = viscosidade, [Pa.s];

ρ = Densidade, [kg/m^3];

τ = critério de germinação de mofo do modelo IEA, [adimensional]

Γ = Difusividade considerada na equação de balanço (massa, momento ou energia);

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASHRAE = *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BES = *Building Energy Simulation,* Simulação Energética de Edifícios

CCI = *Canadian Conservation Institute* – Instituto Canadense de Conservação

CECOR = Centro de Conservação-Restauração de Bens Culturais (UFMG)

CECRE = Curso de Conservação de Monumentos e Sítios Históricos (UFBA)

CFD = *Computational Fluid Dynamics* – Dinâmica de Fluidos Computacional

CPBA = Conservação Preventiva em Bibliotecas e Arquivos

DEMEC = Departamento de Engenharia Mecânica (UFMG)

DOE = *Department of Energy* – Departamento de Energia, Estados Unidos

DPHAN = Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

DQM = Desvio Quadrático Médio

EPBD = *Energy Performance of Buildings Directive* - Diretrizes de Desempenho Energético dos Edifícios (Europa)

FCRB = Fundação Casa de Rui Barbosa (Rio de Janeiro)

FTSG = Faculdade de Tecnologia da Serra Gaúcha

GCI = *Getty Conservation Institute* – Instituto Getty de Conservação

IBRAM = Instituto Brasileiro de Museus

ICN – *Netherlands Institute for Cultural Heritage* - Instituto Holandês para o Patrimônio Cultural

ICCROM - *International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property* - Centro Internacional para o Estudo da Preservação e Restauração do Patrimônio Cultural

INMET = Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC = *Intergovernmental Panel on Climate Change*) - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.

IPHAN = Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

IPI = *Image Permanence Institute* – Instituto para Permanência da Imagem

IPT = Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

LACICOR = Laboratório de Ciência da Conservação (UFMG)

LEED = *Leadership in Energy and Environmental Design* – Liderança em Design Energético e Ambbiental, sistema de ranqueamento

LMPT = Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais (UFSC)

NASA = *National Aeronautics and Space Administration,* Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço, EUA

OMM = Organização Meteorológica Mundial PUC = Pontifícia Universidade Católica

ONU = Organização das Nações Unidas

SPHAN = Serviço de Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

UFBA = Universidade Federal da Bahia

UFMG = Universidade Federal de Minas Gerais

UFSC = Universidade Federal de Santa Catarina

UNESCO = *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

UNESA = Universidade Estácio de Sá

UNICAMP = Universidade Estadual de Campinas

UNIEURO = Centro Universitário Euro-Americano

USGBC = *US Green Building Council* – Conselho de Edifícios Verdes dos Estados Unidos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Interfaces entre os campos de conhecimento envolvendo a conservação do Patrimônio Cultural.	43
Figura 2 –	Níveis de controle considerados na Conservação Preventiva e no Gerenciamento de Riscos	51
Figura 3 –	Variáveis do conforto ambiental (térmico, luminoso e acústico)	64
Figura 4 –	Relação entre o desempenho termo-energético do edifício e o microclima ao nível do objeto.	65
Figura 5 –	Ventilação com aquecimento passivo.	76
Figura 6 –	Corte original da casa Trombe-Michel em Odeillo, França. Possibilidades de circulação de ar com sistema Trombe-Michel.	77
Figura 7 –	Museu Paraense Emílio Goeldi - *T* e *UR* máximas, médias, mínimas e amplitudes diárias medidas na reserva técnica.	81
Figura 8 –	Exemplos de flutuações sazonais das classes de controle climático definidas pela ASHRAE.	88
Figura 9 –	Localização das cidades dos estudos de caso iniciais.	112
Figura 10 –	Vista das capelas dos passos da Paixão.	116
Figura 11 –	Vista aérea do Santuário, mostrando posição relativa da Capela da Ceia, escritório técnico do IPHAN e área representada na maquete física.	116
Figura 12 –	Capela da Ceia – diagrama de insolação em projeção ortográfica e isométrica.	117
Figura 13 –	Capela da Ceia – posicionamento dos alvos de referência para o escaneamento tridimensional.	118
Figura 14 –	Capela da Ceia - nuvem de pontos resultante do escaneamento tridimensional.	118
Figura 15 –	Capela da Ceia – maquetes eletrônicas.	119
Figura 16 –	Capela da Ceia – croqui da planta baixa, indicando posição dos sensores/registradores de *T/UR*.	121
Figura 17 –	Capela da Ceia – vistas internas, indicando posição dos sensores/registradores de *T/UR*.	121
Figura 18 –	Sensores externos instalados no escritório técnico do IPHAN em Congonhas.	122
Figura 19 –	Capela da Ceia – modelo simplificado utilizado no programa *Energy Plus* ©.	126
Figura 20 –	Capela da Ceia – elevação frontal.	131
Figura 21 –	Capela da Ceia – domínio de simulação utilizado no programa *Ansys CFX* ©.	134
Figura 22 –	Comparação entre modelos de perfil de velocidade do vento.	136
Figura 23 –	Configuração de planos de entrada saída no domínio de simulação no programa *CFX Pre*, com perfil de velocidade de vento da ASHRAE.	138

Figura 24 –	Configuração de planos de entrada saída no domínio de simulação no programa *CFX Pre*, com perfil polinomial obtido no túnel de vento.	139
Figura 25 –	Capela da Ceia – elevação lateral esquerda. Posição das retas usadas como referência para o refinamento da malha de simulação no programa *Ansys CFX ©*.	140
Figura 26 –	Capela da Ceia – aspectos do domínio e vista lateral da malha tridimensional gerada no programa *Ansys CFX ©*.	141
Figura 27 –	Modelo simplificado simulado no programa *Ansys CFX ©* para estudo do passo de tempo adequado à variação do campo de velocidade interno, nas simulações transientes.	143
Figura 28 –	Túnel de vento do DEMEC-EE-UFMG.	144
Figura 29 –	Capela da Ceia – maquete física inicial para ensaio em túnel de vento.	144
Figura 30 –	Capela da Ceia – maquete física utilizada nos ensaios em túnel de vento.	145
Figura 31 –	Ensaio em túnel de vento - detalhe mostrando o descolamento do escoamento anterior à posição de medição perfil de velocidade de vento próxima à borda de ataque.	147
Figura 32 –	Capela da Ceia – posição dos furos para medições de pressão na maquete física.	148
Figura 33 –	Ensaio em túnel de vento – posicionamento e detalhe da conexão com os transdutores de pressão.	148
Figura 34 –	Ensaio em túnel de vento - posicionamento do termoanemômetro para medição da velocidade de referência no centro da seção de ensaio.	150
Figura 35 –	Ensaio em túnel de vento – posições de medição dos perfis de velocidade do vento.	150
Figura 36 –	Ensaio em túnel de vento - posicionamento dos geradores de névoa.	151
Figura 37 –	Ensaio túnel de vento – montagem dos equipamentos para medição com técnica PIV e instantâneos durante o ensaio em execução.	152
Figura 38 –	Ouro Branco – climograma. Período 2006-2012.	165
Figura 39 –	Ouro Branco – médias horárias de *T* e *UR*. Período: 2006 a 2012.	166
Figura 40 –	Ouro Branco – histograma de temperatura (médias horárias). Período: 2006 a 2012	166
Figura 41 –	Ouro Branco – histograma de *UR* (médias horárias). Período: 2006 a 2012.	166
Figura 42 –	Ouro Branco – ano meteorológico típico segundo RORIZ.	167
Figura 43 –	Ouro Branco – climograma comparativo períodos 2006-2012 e 2011-2012.	168
Figura 44 –	Ouro Branco – histograma de frequências da temperatura. Período: 2011 a 2012.	169
Figura 45 –	Ouro Branco – histograma de frequências da umidade relativa. Período: 2011 a 2012.	169
Figura 46 –	Comparação de dados de *T* e *UR* medidos em Congonhas e em Ouro Branco.	170
Figura 47 –	Ouro Branco – rosas de ventos.	172
Figura 48 –	Ouro Branco – distribuição de frequências da velocidade do vento.	172
Figura 49 –	Comparação de dados de velocidade do vento medidos em Congonhas e em Ouro Branco.	173
Figura 50 –	Ouro Branco – diagrama bioclimático de Givoni com médias horárias de *T* e *UR* para o período 2006-2012.	174
Figura 51 –	Ouro Branco – diagrama bioclimático de Givoni com médias horárias de *T* e *UR* separadas por estação do ano.	175
Figura 52 –	Ouro Branco – recomendações de estratégias bioclimáticas segundo a norma NBR15220-3	176
Figura 53 –	Capela da Ceia – climograma de médias mensais internas. Período: 18/07/2011 a 21/10/2012.	177

Figura 54 –	T_i, Ur_i *e* W_i (Capela da Ceia, médias horárias, período 2011-2012) *versus* T_e, Ur_e *e* W_e (Ouro Branco, médias horárias históricas, período 2006-2012).	178
Figura 55 –	T_i, Ur_i *e* W_i (Capela da Ceia) *versus* T_e, Ur_e *e* W_e (Ouro Branco, período 18/07/2011 a 31/07/2012).	179
Figura 56 –	Capela da Ceia – histograma de frequências de T_i.	179
Figura 57 –	Capela da Ceia – histograma de frequências de UR_i.	180
Figura 58 –	Capela da Ceia – UR_i - flutuações horárias entre o ciclo sazonal e a média normal anual.	181
Figura 59 –	Capela da Ceia – limites de flutuação de *UR*, pela metodologia Bratasz-Koslowski.	182
Figura 60 –	Capela da Ceia – UR_e (médias horárias 2006-2012) x UR_i (médias horárias 2011-2012).	184
Figura 61 –	Capela da Ceia – UR_e x UR_i (período 2011-2012).	185
Figura 62 –	Capela da Ceia – horários com desumidificação aplicável (primavera).	187
Figura 63 –	Capela da Ceia – horários com desumidificação aplicável (inverno).	187
Figura 64 –	Capela da Ceia – horários com desumidificação aplicável (verão).	188
Figura 65 –	Capela da Ceia – distribuição do potencial de aplicabilidade da estratégia de desumidificação ao longo do ano.	189
Figura 66 –	Capela da Ceia – distribuição do potencial de aplicabilidade da estratégia de desumidificação ao longo do dia.	189
Figura 67 –	Capela da Ceia – T_{imed} monitorada e calculada por modelo preditivo *versus* T_{emax}, T_{emed} e T_{emin} monitoradas.	190
Figura 68 –	Capela da Ceia – W_{imed} monitorada e calculada por modelo preditivo versus W_{emax}, W_{emed} e W_{emin} monitoradas.	191
Figura 69 –	Capela da Ceia – UR_{imed} monitorada *versus* UR_{imed} calculada com base em T_{imed} e W_{imed} obtidas por regressão linear múltipla.	192
Figura 70 –	Capela da Ceia – diagramas de dispersão de T_{imed}, UR_{imed} *e* W_{imed} monitoradas e obtidas por regressão linear múltipla.	193
Figura 71 –	Capela da Ceia - *Ti, Uri* e *Wi x Te, Ure* e *We x Ti, Uri e Wi* simulados no programa *Energy Plus* ©.	193
Figura 72 –	Capela da Ceia – diagramas de dispersão de *Ti, Uri* e *Wi* monitoradas e simuladas no programa *Energy Plus* ©.	194
Figura 73 –	Capela da Ceia – vazão de ar estimada por modelo analítico *versus* vazões horárias simuladas no programa *Energy Plus* ©.	196
Figura 74 –	Capela da Ceia - *Ti, Uri* e *Wi* monitoradas *x Te, Ure* e *We x Ti, Uri e Wi* simuladas no programa *Energy Plus* ©. (Regime 1 – sem ventilação).	197
Figura 75 –	Capela da Ceia – histograma de frequência de ΔH monitorada, nos horários em que a estratégia de ventilação para desumidificação é aplicável.	198
Figura 76 –	Capela da Ceia - *Ti, Uri* e *Wi* monitoradas *x Te, Ure* e *We x Ti, Uri e Wi* simuladas no programa *Energy Plus* ©. (Regime 2 – sistema de ventilação com controle baseado em ΔH).	199
Figura 77 –	Capela da Ceia – simulação do campo de velocidades externas, regime permanente, perfil de vento ASHRAE.	200
Figura 78 –	Capela da Ceia – simulação das linhas de corrente externas, regime permanente, perfil de vento ASHRAE, vista isométrica.	201
Figura 79 –	Capela da Ceia – simulação dos coeficientes de pressão nas elevações, regime permanente, perfil de vento ASHRAE.	201

Figura 80 –	Capela da Ceia – simulação das linhas de corrente e vetores de velocidade internos, regime permanente, perfil de vento ASHRAE.	202
Figura 81 –	Capela da Ceia – simulação do campo de velocidades externas, regime transiente, perfil de vento ASHRAE.	203
Figura 82 –	Capela da Ceia – simulação do campo de velocidades internas, regime transiente, perfil de vento ASHRAE.	204
Figura 83 –	Capela da Ceia – simulação das linhas de corrente externas, regime permanente, perfil de vento polinomial corrigido, vista isométrica.	205
Figura 84 –	Capela da Ceia – simulação do campo de velocidades externas, regime permanente, perfil de vento polinomial corrigido.	206
Figura 85 –	Capela da Ceia – simulação dos coeficientes de pressão nas elevações, regime permanente, perfil de vento polinomial corrigido.	207
Figura 86 –	Capela da Ceia – simulação das linhas de corrente e vetores de velocidade internos, regime permanente, perfil de vento polinomial corrigido.	208
Figura 87 –	Capela da Ceia – simulação do campo de velocidades externas, regime transiente, perfil de vento polinomial corrigido.	208
Figura 88 –	Ensaio em túnel de vento – u_{ref} x C_p.	210
Figura 89 –	Ensaio em túnel de vento - perfis de velocidade medidos sobre o eixo longitudinal da maquete.	213
Figura 90 –	Ensaio em túnel de vento - campos de velocidade obtidos por meio da técnica PIV.	214
Figura 91 –	Capela da Ceia - detalhe do campo de velocidades obtido na simulação em regime permanente com perfil de vento polinomial corrigido.	215
Figura 92 –	Capela da Ceia – histograma de flutuações nas médias horárias de T_i monitorada.	215
Figura 93 –	Capela da Ceia – histograma de flutuações diárias na T_{imed} monitorada.	216
Figura 94 –	Capela da Ceia – histograma de flutuações semanais na GT_i semanal monitorada.	216
Figura 95 –	Capela da Ceia – histograma de flutuações nas médias horárias de UR_i monitorada.	218
Figura 96 –	Capela da Ceia – histograma de flutuações diárias na UR_{imed} monitorada.	218
Figura 97 –	Capela da Ceia – histogramas de flutuações semanais GUR_i semanal.	218
Figura 98 –	Capela da Ceia – diagrama de dispersão de flutuações diárias de T_{imed} *versus* flutuações diárias de UR_{imed} (método 1 – diferença entre médias diárias consecutivas).	220
Figura 99 –	Capela da Ceia – diagrama de dispersão de flutuações diárias de T_{imed} *versus* flutuações diárias de UR_{imed} (método 2 – diferença entre médias diárias e ciclos sazonais.	220
Figura 100 –	Capela da Ceia – diagrama de dispersão de flutuações diárias de T_{imed} *versus* flutuações diárias de UR_{imed} (método 3 – amplitudes diárias).	221
Figura 101 –	Capela da Ceia – flutuações diárias admissíveis na *UR* (método 1 - UR_{imed} *versus* UR_{imed} do dia seguinte).	222
Figura 102 –	Capela da Ceia –flutuações diárias admissíveis na *UR* (método 2 - ciclo sazonal *versus* UR_{imed}).	223
Figura 103 –	Capela da Ceia – flutuações diárias admissíveis na *UR* (método 3 - ciclo sazonal *versus* amplitudes diárias).	223
Figura 104 –	T_i e UR_i monitoradas plotadas sobre diagrama psicrométrico contendo zonas de segurança ambiental para coleções diversas e com artefatos de madeira.	224
Figura 105 –	Capela da Ceia – diagrama de dispersão de T_i *versus* UR_i monitoradas, com índices de desempenho em relação à zona de segurança proposta neste trabalho.	226

Figura 106 – Capela da Ceia – T_i e UR_i monitoradas, discriminadas por estação do ano, plotadas sobre diagrama psicrométrico contendo isopermas de Sebera e Michalski e a zona de segurança proposta neste trabalho. 227

Figura 107 – Capela da Ceia – T_i e UR_i monitoradas *versus* taxas de permanência instantâneas (*P2/P1*) e ponderadas (*Isoperma-T*), calculadas pela metodologia de Sebera. 227

Figura 108 – Capela da Ceia – T_i *e* UR_i monitoradas *versus* taxas de permanência instantâneas (*LM*) e ponderadas *(LM-T)* calculadas pela metodologia de Michalski. 228

Figura 109 – Capela da Ceia – T_i *e* UR_i monitoradas x $IP_{Padfield}$, IP_{IPI}, $IETP_{Padfield}$ e $IETP_{IPI}$. 230

Figura 110 – Capela da Ceia – T_i e UR_i monitoradas x *EMC, ΔDC e DC*. 232

Figura 111 – Capela da Ceia – T_i e UR_i monitoradas x *MRF* e *TOW*. 233

Figura 112 – Capela da Ceia – flutuações diárias admissíveis na *UR* (método 1 - diferença entre médias diárias consecutivas). Comparação entre dados monitorados e simulados. 235

Figura 113 – Capela da Ceia – diagrama de dispersão de T_i *x* UR_i. Comparação entre dados monitorados e simulados. 236

Figura 114 – Capela da Ceia – T_i e UR_i simuladas no programa *Energy Plus* © *versus* taxas de permanência instantâneas (*P2/P1*) e ponderadas (*isoperma-T)* resultantes, pela metodologia de Sebera. 238

Figura 115 – Capela da Ceia – T_i e UR_i calculadas por regressão linear múltipla *versus* taxas de permanência instantâneas (*P2/P1*) e ponderadas *(Isoperma-T)* resultantes pela metodologia de Sebera. 238

Figura 116 – Capela da Ceia – comparação entre taxas de permanência instantâneas (*P2/P1*) e ponderadas *(isoperma-T)* calculadas pela metodologia de Sebera, com base nos dados monitorados e simulados. 239

Figura 117 – Capela da Ceia – diagramas de dispersão das taxas de permanência instantâneas (*P2/P1*) calculadas pela metodologia de Sebera, com base nos dados monitorados e nos resultados das simulações computacionais. 240

Figura 118 – Capela da Ceia – comparação entre as taxas de permanência instantâneas (*P2/P1*) e ponderadas (*isoperma-T*) calculadas pela metodologia de Sebera, com base nos dados monitorados e simulados para os regimes de ventilação 1 e 2. 240

Figura 119 – Capela da Ceia – T_i e UR_i simuladas no programa *Energy Plus* © *versus* taxas de permanência instantâneas (*LM*) e ponderadas *(LM-T)* resultantes pela metodologia de Michalski. 242

Figura 120 – Capela da Ceia – T_i e UR_i calculadas pelo modelo preditivo por regressão linear múltipla *versus* taxas de permanência instantâneas (*LM*) e ponderadas (*LM-T*) resultantes pela metodologia de Michalski. 242

Figura 121 – Capela da Ceia – comparação entre as taxas de permanência instantâneas (*LM*) e ponderadas (*LM-T*), calculadas pela metodologia de Michalski, com base nos dados monitorados e simulados. 243

Figura 122 – Capela da Ceia – diagramas de dispersão das taxas de permanência instantâneas (*LM*) calculadas pela metodologia de Michalski, com base nos dados monitorados e simulados. 244

Figura 123 – Capela da Ceia – comparação entre as taxas de permanência instantâneas (*LM*) e ponderadas (*LM-T),* calculadas pela metodologia de Michalski, com base nos dados monitorados e simulados para os regimes de ventilação 1 e 2. 245

Figura 124 – Capela da Ceia – T_i e UR_i simuladas no *Energy Plus* © x IP_{IPI} e $IETP_{IPI}$. 246

Figura 125 – Capela da Ceia – T_{imed} e UR_{imed} simuladas por regressão linear múltipla x IP_{IPI} e $IETP_{IPI}$. 246

Figura 126 – Capela da Ceia – comparação IP_{IPI} *e* $IETP_{IPI}$ calculados com base nos dados monitorados e simulados. 247

Figura 127 – Capela da Ceia – diagramas de dispersão de IP_{IPI} calculado com base nos dados monitorados e nos resultados das simulações por regressão linear múltipla e no programa *Energy Plus* ©. 247

Figura 128 – Capela da Ceia – T_i e UR_i monitoradas *x EMC, ΔDC e DC* derivados dos resultados simulados no *Energy Plus* ©. 248

Figura 129 – Capela da Ceia – T_i e UR_i monitoradas *x EMC, ΔDC e DC* derivados dos resultados do modelo preditivo por regressão linear múltipla. 249

Figura 130 – Capela da Ceia – comparação de *DC, ΔDC* e *EMC* calculados com base nos dados monitorados e simulados. 249

Figura 131 – Capela da Ceia – diagramas de dispersão de *EMC* e *ΔDC* calculados com base nos dados monitorados e simulados. 250

Figura 132 – Capela da Ceia – T_i e UR_i monitoradas x T_i e UR_i simuladas no E*nergy Plus* © x *MRF* e *TOW* calculados com base nos dados monitorados e simulados. 252

Apêndice A

Figura 133 – Diagrama de isopermas de Sebera, *E* = 35Kcal/mol. 339

Figura 134 – Diagrama de isopermas de Sebera, *E* = 25Kcal/mol. 340

Figura 135 – Diagrama psicrométrico com isopermas de Michalski (*LM*). 343

Figura 136 – Diagrama psicrométrico comparativo das isopermas de Sebera e Michalski. 343

Figura 137 – Isopermas para filmes de acetato de celulose, considerando deterioração por hidrólise ácida (síndrome do vinagre) – tempo previsto para atingir acidez livre 0,5. 346

Figura 138 – Zonas de segurança e isopermas para coleções fotográficas. 346

Figura 139 – Simulação de tensões induzidas em madeira (tília – *lime wood*) por flutuações de *UR*. 354

Figura 140 – Resposta de madeira (tília – *lime wood)* a flutuações de umidade relativa. 355

Figura 141 – Relação entre mudança dimensional, amplitude de flutuação e número de ciclos de flutuação de *UR* para madeira tília (*lime wood*). 356

Figura 142 – Amplitude de flutuação crítica para fissuração como função do ciclo de duração da flutuação, para painel de madeira tília (*lime wood*) espessura 10mm pintado com gesso. 357

Figura 143 – Nomogramas para estimativa do tempo de resposta típico de painéis de madeira. 358

Figura 144 – Isotermas de sorção de madeiras diversas. 361

Figura 145 – Isotermas típicas de dessorção de madeira, em função do *EMC*. 364

Figura 146 – Isotermas típicas de dessorção de madeira, em função do *EMC* e da *UR*. 364

Figura 147 – Isotermas típicas de dessorção de madeira. 365

Figura 148 – Isopletas de taxa de crescimento de *Cladosporium spp* em função de *T* e *UR*. 368

Figura 149 – Isopletas limite para germinação de mofo em um período de 100 a 200 dias, em função de *T* e *UR*. 369

Figura 150 – Tempo de germinação de mofo em função da *UR*, considerando substrato altamente suscetível, 369

Figura 151 – Isopletas de tempo de germinação (dias) para *A. restrictus,* em função de *T* e *UR*. 372

Figura 152 – Isopletas limite de germinação para seis categorias de fungos, em função de *T* e *UR*. 373

Figura 153 – Isopletas limite de germinação do modelo VTT. 374

Figura 154 – Isopletas limite de germinação do modelo Sedlbauer-Krus. 375

Apêndice B

Figura 155 – Diagrama bioclimático de Olgyay 380

Figura 156 – Diagrama bioclimático de Givoni com limites da zona de conforto ampliados para países de clima quente. 381

Figura 157 – Zonas de conforto térmico humano para as cidades de Natal (Araújo), Florianópolis (Xavier) e Belo Horizonte (Gonçalves). 383

Figura 158 – Comparação entre zona de segurança ambiental para artefatos de madeira, murais e afrescos e a zona de conforto humano. 386

Figura 159 – Comparação entre zona de segurança ambiental para pinturas sobre tela, arquivos e coleções diversas com zonas de conforto humano 387

Figura 160 – Comparação de limites de *UR* "seguros" propostos na literatura para artefatos de madeira ou coleções diversas. 389

Figura 161 – Zoneamento bioclimático brasileiro proposto por SILVA et al. (1995). 394

Figura 162 – Zoneamento bioclimático brasileiro proposto por AKUTSU et al. (1998). 395

Figura 163 – Localização das cidades brasileiras com normais climatológicas disponíveis. 396

Figura 164 – Diagrama bioclimático de Givoni adaptado, utilizado na norma NBR 15220-3. 397

Figura 165 – Zoneamento bioclimático brasileiro proposto na norma NBR 15220-3. 399

Figura 166 – Tela do programa *RevZBBR* mostrando as temperaturas estimadas para Congonhas pelo modelo de regressão linear múltipla do programa. 402

Figura 167 – Propostas de agrupamento para revisão do zoneamento bioclimático brasileiro, com oito, dez e doze zonas. 402

Figura 168 – Estrutura geral do método de Mahoney, segundo Koenigsberger (apud HARRIS, 2000). 404

Figura 169 – Conjuntos nebulosos para definição da ocorrência de estresse térmico segundo SENA (2004). 413

Figura 170 – Frequências estimadas por regressão *probit* para as categorias de sensação térmica, em função da temperatura operativa. 414

Figura 171 – Minas Gerais – altitude – comparação entre mapa de valores interpolados por *kriging* com mapa de relevo elaborado pela EMBRAPA usando imagens de satélite. 416

Figura 172 – Evolução das propostas de agrupamento para o zoneamento bioclimático de Minas Gerais. 418

Figura 173 – Região sudeste - distribuição espacial de índice de temperatura e umidade, consumo de ração e conversão alimentar em função do clima e sistema de ventilação em galpões de produção aviária. 421

Figura 174 – Minas Gerais – classificação climática de Koppen. 422

Figura 175 – Zoneamento bioclimático de MG pelo método de Mahoney superposto à classificação climática de Koppen. 422

Figura 176 – Comparação entre zoneamento bioclimático de MG pela norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005) e pelo método de Mahoney. 423

Figura 177 – Superposição do zoneamento bioclimático de MG pela proposta de revisão da norma NBR 15220-3 (RORIZ, 2012c) com o zoneamento pelo método de Mahoney. 424

Apêndice C

Figura 178 – Influência do tipo de abertura no direcionamento e separação dos fluxos de ar. 426

Figura 179 – Ventilação cruzada com aberturas opostas e influência do posicionamento das aberturas no escoamento. 427

Figura 180 – Uso da tipologia das aberturas e obstáculos externos para incrementar a captação da ventilação. 428
Figura 181 – Partidos formais conceituais (em planta) favoráveis à ventilação natural. 428
Figura 182 – Dimensionamento de pátios internos para uma boa ventilação. 429
Figura 183 – MAM-RJ (Arq. Affonso Reidy) - efeito de pilotis. 429
Figura 184 – Influência de partições internas no fluxo de ar. 430
Figura 185 – Uso de chaminés solares para provocar ventilação convectiva. 431
Figura 186 – Uso de aberturas superiores para incrementar o efeito chaminé. 432
Figura 187 – Estratégias para organização de espaços utilizando ventilação cruzada e efeito chaminé. 433
Figura 188 – Uso de torre de vento na arquitetura adaptada a climas quente-secos. 434
Figura 189 – Centro Cultural Jean-Marie Tjibaou (Arq. Renzo Piano). Croquis conceituais do sistema de ventilação, ensaios em túnel de vento e resultados da simulação CFD. 435
Figura 190 – Biblioteca Burton Barr, Fênix, EUA. 436
Figura 191 – Influência das dimensões e afastamento dos edifícios no fluxo de ar. 437
Figura 192 – Efeitos de ventilação urbana. 438

Apêndice D

Figura 193 – Montagem experimental para aferição, em laboratório, dos sensores utilizados. 441
Figura 194 – Gráfico típico resultante da aferição dos sensores em laboratório. 441
Figura 195 – Montagem para aferição dos sensores, na estação meteorológica do 5º. Distrito do INMET, em Belo Horizonte. 442
Figura 196 – Comparação dos dados medidos pelo sensor HOBO 7083 e o par psicrométrico de referência do INMET, entre os dias 24/01/2011 e 23/02/2011. 443
Figura 197 – Diagramas de dispersão de *T* e *UR* medidos c/ sensores HOBO 7083 e 7082. 444
Figura 198 – Comparação de dados de velocidade e direção de vento medidos pela estação WMR968 e pela estação meteorológica do 5º. DISME/INMET. 445

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de refinamento da malha inicial no programa *Ansys CFX ©*. 141
Tabela 2 - Ouro Branco – Dados climáticos – Período: 01/08/2006 a 31/07/2012. 166
Tabela 3 - Ouro Branco – Dados climáticos (extrato) - Período: 01/07/2011 a 30/06/2012. 169
Tabela 4 - Ouro Branco / Congonhas - Comparação de estatísticas descritivas dos dados climáticos. 172
Tabela 5 - Ouro Branco – Velocidade do Vento – Comparação de estatísticas descritivas. 173
Tabela 6 - Ouro Branco – Potencial de aplicação de estratégias bioclimáticas para conforto humano. 175
Tabela 7 - Capela da Ceia – Dados climáticos – Período: 18/07/2011 a 21/10/2012. 178
Tabela 8 - Capela da Ceia – Comparação de critérios-limite de umidade relativa. 184
Tabela 9 - Capela da Ceia - Potencial de utilização de estratégias de ventilação natural ou forçada, com base na correlação UR_i *x* UR_e. 187
Tabela 10 - Comparação do *DQM* e R^2 para simulação de T_i, Ur_i, W_i por modelo preditivo por regressão 195

linear múltipla e por meio do programa *Energy Plus* ©.

Tabela 11 - Teste do controle inicial de convergência no *Energy Plus* ©. 196

Tabela 12 - Resultados das medições de pressão em túnel de vento. 212

Tabela 13 - Comparação entre perfis de velocidade do vento medidos no túnel de vento e perfil simulado no programa Ansys CFX © em regime permanente. 213

Tabela 14 - Capela da Ceia – comparação entre índices de desempenho quanto às flutuações diárias de *T*. 218

Tabela 15 - Capela da Ceia – comparação entre índices de desempenho quanto às flutuações diárias de *UR*. 220

Tabela 16 - Capela da Ceia – comparação entre índices de desempenho da Capela da Ceia, considerando simultaneamente critérios-limite de flutuações de *T e UR* indicados nas tabelas 14 e 15. 222

Tabela 17 - Capela da Ceia – índices de desempenho com relação a zonas de segurança ambiental propostas na literatura para artefatos de madeira ou coleções diversas. 226

Tabela 18 - Capela da Ceia – índices de desempenho (%) com relação aos limites de *LM* propostos por MARTENS (2012), com base nos dados monitorados. 230

Tabela 19 - Capela da Ceia – índices de desempenho resultantes das simulações computacionais, considerando simultaneamente critérios-limite de flutuações de *T* e *UR* indicados nas tabelas 14 e 15. (Método 1: diferença entre médias diárias consecutivas). 235

Tabela 20 - Capela da Ceia – comparação de índices de desempenho anual (%) monitorados e simulados, com relação a critérios-limite de flutuações de *UR*. 237

Tabela 21 - Capela da Ceia – índices de desempenho (%) com relação às zonas de segurança ambiental da Figura 104 - comparação entre dados monitorados e simulados. 238

Tabela 22 - Capela da Ceia – índices de desempenho (%) com relação aos limites de *LM* propostos por MARTENS (2012), com base nos dados simulados. 245

Tabela 23 - Capela da Ceia – índices de desempenho (%) com relação aos limites de *DC* e *EMC*. 251

Apêndice A

Tabela 24 - Condições necessárias para diminuir contaminação microbiana ambiental. 368

Tabela 25 - Umidade relativa crítica para germinação de fungos. 377

Tabela 26 - Categorias de corrosividade, de acordo com a norma ISO 9223 (ISO, 2012). 378

Tabela 27 - Zonas de segurança ambiental propostas na literatura para coleções diversas e com artefatos de madeira. 389

Apêndice D

Tabela 28 - Resultados das aferições dos sensores (*UR*) e escolha do sensor de referência. 443

Tabela 29 - Dados climáticos coletados na estação meteorológica do 5º DISME/INMET em 25/01/2011. 445

Tabela 30 - Critérios para interpretação dos dados de direção de vento fornecidos pelo INMET. 445

Tabela 31 - Aferição da estação meteorológica WMR968 - Teste F: duas amostras para variâncias. 447

Tabela 32 - Aferição da estação meteorológica WMR968 - Teste Z: diferença entre médias com variâncias conhecidas. 447

Apêndice E

Tabela 33 - Ouro Branco – precipitação total mensal média (mm) – Período: 01/08/2006 a 31/07/2012. 449

Tabela 34 - Ouro Branco – temperatura média mensal normal (ºC) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012. 449

Tabela 35 - Ouro Branco – temperatura média mensal normal – desvio padrão (ºC) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012. 450

Tabela 36 - Ouro Branco – temperatura média mensal das máximas (ºC) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012. 450

Tabela 37 - Ouro Branco – temperatura máxima absoluta (ºC) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012. 450

451

Tabela 38 - Ouro Branco – temperatura média mensal das mínimas (ºC) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012.

Tabela 39 - Ouro Branco – temperatura mínima absoluta (ºC) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012. 451

Tabela 40 - Ouro Branco – umidade relativa média mensal normal (%) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012. 451

Tabela 41 - Ouro Branco – umidade relativa média mensal normal – desvio padrão (%) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012. 452

Tabela 42 - Ouro Branco – umidade relativa média mensal das máximas (%) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012. 452

Tabela 43 - Ouro Branco – umidade relativa máxima absoluta (%) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012. 452

Tabela 44 - Ouro Branco – umidade relativa média mensal das mínimas (%) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012. 453

Tabela 45 - Ouro Branco – umidade relativa mínima absoluta (%) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012. 453

Tabela 46 - Ouro Branco – velocidade do vento (m/s) - número de ocorrências e frequência por direção. Período 01/08/2006 a 31/07/2012. 454

Tabela 47 - Ouro Branco – velocidade do vento (m/s) - número de ocorrências e frequência por direção. Período 01/07/2011 a 30/06/2012. 454

Tabela 48 - Ouro Branco – estatísticas descritivas dos dados climáticos. Períodos: 2006-2012 e 2011-2012 (médias horárias). 455

Tabela 49 - Ouro Branco – testes de aderência dos dados de T_e e UR_e à normalidade 455

Tabela 50 - Ouro Branco – teste F: duas amostras para variâncias – T_e 2006-2012 *x* T_e 2011-2012 (médias horárias). 455

Tabela 51 - Ouro Branco – teste F: duas amostras para variâncias – UR_e 2006-2012 *x* UR_e 2011-2012 (médias horárias). 455

Tabela 52 - Ouro Branco – teste T: duas amostras presumindo variâncias equivalentes – T_e 2006-2012 *x* T_e 2011-2012 (médias mensais). 456

Tabela 53 - Ouro Branco – Teste T: duas amostras presumindo variâncias equivalentes – UR_e 2006-2012 *x* UR_e 2011-2012 (médias mensais) 456

Tabela 54 - Teste F: duas amostras para variâncias, para comparação de T_e medida no IPHAN-Congonhas (período: 28/12/2011 a 01/01/2012 e 13/03/2012 a 15/03/2012) com T_e medida no INMET-Ouro Branco (médias horárias de 2006 a 2012 nas datas correspondentes). 456

Tabela 55 - Teste F: duas amostras para variâncias, para comparação de *UR* medida no IPHAN-Congonhas (período: 28/12/2011 a 01/01/2012 e 13/03/2012 a 15/03/2012) com *UR* medida no INMET - Ouro Branco (médias horárias de 2006 a 2012 nas datas correspondentes). 457

Tabela 56 - Teste Z: duas amostras para médias com variâncias conhecidas, para comparação de **u** medida no IPHAN-Congonhas (período: 28/12/2011 a 01/01/2012 e 13/03/2012 a 15/03/2012) com **u** medida no INMET -Ouro Branco nas datas correspondentes. 457

Tabela 57 - Capela da Ceia – estatísticas de regressão e ANOVA para o modelo de cálculo de temperatura interna média diária. 457

Tabela 58 - Capela da Ceia – estatísticas de regressão e ANOVA para o modelo de cálculo de razão de umidade interna média diária. 458

Tabela 59 - Propriedades térmicas de materiais adotadas nas simulações computacionais e valores comparativos. 458

Tabela 60 - Capela da Ceia – composição das envoltórias adotada no programa *Energy Plus* ©. 459

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Categorias de potencial de controle climático em função da qualidade das envoltórias. 68

Quadro 2 - Especificações de padrões de temperatura e umidade relativa para coleções. 89

Quadro 3 - Parâmetros adotados para comparação dos modelos de perfil de velocidade do vento. 138

Quadro 4 - Capela da Ceia - análise de sensibilidade do modelo simulado no programa *Energy Plus* © 196

Apêndice A

Quadro 5 - Resumo das métricas de preservação estudadas neste trabalho. 335

Apêndice B

Quadro 6 - Detalhamento das estratégias bioclimáticas propostas por Givoni. 382

Quadro 7 - Comparação das necessidades ambientais de pessoas, coleções e edifícios. 385

Quadro 8 - Estratégias bioclimáticas aplicáveis a algumas cidades mineiras, segundo a NBR 15220-3. 397

Quadro 9 - Detalhamento das estratégias bioclimáticas propostas na norma NBR 15220-3. 398

Quadro 10 - Método de análise climática de Mahoney – dados climáticos e diagnóstico. 405

Quadro 11 - Método de análise climática de Mahoney – indicadores climáticos. 407

Quadro 12 - Métodos de análise climática de Mahoney – recomendações arquitetônicas 408

Quadro 13 - Agrupamento dos 1712 pontos classificados pelo método de Mahoney para zoneamento bioclimático de Minas Gerais 419

Quadro 14 - Recomendações arquitetônicas para as zonas bioclimáticas obtidas pelo método de Mahoney no zoneamento bioclimático de Minas Gerais. 420

Apêndice D

Quadro 15 - Características dos sensores utilizados no monitoramento contínuo em campo 439

Quadro 16 - Equipamentos utilizados nos ensaios em túnel de vento 447

Quadro 17 - Características dos sensores utilizados no escaneamento tridimensional 447

RESUMO

Esta tese investiga a aplicação de simulações computacionais térmicas e fluidodinâmicas de variáveis climáticas internas, como ferramentas diagnósticas para a conservação preventiva de coleções, abrangendo aspectos relativos aos materiais constituintes, agentes e mecanismos de deterioração e sua interação com o microclima. Ela debate como os resultados das simulações podem ser usados para a obtenção de parâmetros mensuráveis e comparáveis – as métricas de preservação – e o uso prático de tais métricas na conservação preventiva, com foco na sua relação com ventilação natural. O estudo de caso apresentado é a Capela da Santa Ceia localizada no Santuário de Bom Jesus de Matosinhos em Congonhas, Minas Gerais, Brasil, sítio patrimônio mundial da UNESCO. O edifício abriga esculturas em madeira policromada talhadas pelo principal escultor do barroco brasileiro, o Aleijadinho. O texto contextualiza a problemática estudada no âmbito da Ciência da Conservação e áreas de conhecimento conexas, com destaque para a Ciência da Sustentabilidade. Aborda-se o uso da ventilação natural ou forçada como estratégia sustentável de gerenciamento ambiental e o potencial das simulações fluidodinâmicas na conservação do patrimônio cultural. A metodologia e resultados principais incluem: Preparação e calibração de sensores de *T* e *UR;* Monitoramento contínuo em campo (*T* e UR) por 15 meses; Processamento de dados climáticos medidos em campo e meteorológicos; Climogramas externos e internos obtidos com base em monitoramento em campo; Determinação de limites "seguros" para flutuações ambientais pelas metodologias Bratasz-Koslowski e Camuffo-Pagan; Determinação do potencial de aplicabilidade da ventilação natural para o caso estudado; Simulações do regime climático interno por meio do programa *Energy Plus* © e de um modelo preditivo por regressão linear múltipla; Simulações fluidodinâmicas utilizando o programa *Ansys CFX ©;* Validação por medições em túnel de vento; Derivação e análise de diversas métricas de preservação, com base nos dados monitorados e simulados. Os resultados obtidos mostram que dentre os mecanismos de deterioração investigados, os que oferecem o menor potencial de risco são os mecanismos de deterioração físico-mecânica, relacionados a oscilações microclimáticas no interior da Capela. Os riscos de deterioração química foram considerados pouco relevantes. Já os riscos de contaminação biológica por micro-organismos são significativos, principalmente no verão, devido à temperatura e umidade relativa elevadas. Apesar de demandar uma carga significativa de conhecimento e bom senso, bem como recursos consideráveis em termos de máquinas e programas, o uso de métricas de preservação permite uma avaliação quantitativa, mensurável, padronizada, reprodutível, facilmente compreensível e comunicável das condições de conservação de coleções, bem como de riscos para a sua preservação, ligados a fatores ambientais de deterioração.

Palavras-chave: Conservação preventiva, Métricas de Preservação, Simulações computacionais, Ventilação natural, Ventilação forçada, Conforto ambiental para pessoas e coleções.

ABSTRACT

This thesis investigates application of thermal and fluid dynamic computational simulations of indoor climate variables, as diagnostic tools aiming at preventive conservation of collections, including aspects of constituent materials, deterioration agents and mechanisms and their interaction with microclimate. It debates how simulation results can be used for obtaining measurable and comparable parameters - preservation metrics - and the practical use of such metrics in preventive conservation, with focus on their relationship with natural ventilation. The case study presented is the Chapel of Last Supper located at the Sanctuary of Bom Jesus de Matosinhos in Congonhas, Minas Gerais, Brazil, a UNESCO World Heritage Site. The building houses wooden polychrome sculptures by the main Brazilian baroque sculptor, Aleijadinho. The text contextualizes the studied problem in the fields of Conservation Science and related areas, with emphasis on Sustainability Science. They address the use of natural or forced ventilation as a sustainable strategy for environmental management and the potential of the fluid dynamic simulations in the conservation of Cultural Heritage. The methods and main results include: Preparation and conformity checking of RH and T sensors; Continuous in situ environmental monitoring (T and RH) during 15 months; Processing of field acquired and meteorological data; External and internal climographs obtained from field data monitoring; Determination of "safe" limits of environmental fluctuations for the case study by Bratasz-Koslowski and Camuffo-Pagan methods; Determination of potential use of natural ventilation for the case study; Simulations of internal climate conditions using the *Energy Plus* software and a predictive model by multiple linear regression; Fluid dynamic simulations using *Ansys CFX* ©; Validation through wind tunnel measurements; Derivation and analysis of several preservation metrics, from field acquired and simulated data. The results show that among investigated deterioration mechanisms, physical-mechanical deterioration offers the lowest potential risks, related to microclimatic fluctuations inside the Chapel. Chemical deterioration risks were considered of low relevance. On the other hand, risks of biological contamination by micro-organisms are significant, particularly in the summer, due to high temperature and relative humidity. Despite they demand a fair amount of knowledge and good sense as well as significant hardware and software resources, use of preservation metrics allow a quantitative, measurable, standardized, reproducible, easily understandable and communicable assessment of collections conservation conditions, as well as of the risks to their preservation, due to environmental deterioration agents.

Keywords: Preventive Conservation, Preservation metrics, Computational simulations, Natural ventilation, Forced ventilation, Environmental comfort for people and collections.

INTRODUÇÃO

A Conservação Preventiva abrange táticas diversas que concorrem para o objetivo de preservar o Patrimônio Cultural. Envolve várias posturas e ações com a finalidade de anular ou reduzir ao mínimo possível a magnitude dos múltiplos riscos que podem ameaçar os bens culturais. Compreende providências mediatas, que tangem aspectos diferentes do cotidiano das instituições responsáveis pela guarda de coleções. Abrange questões que tocam todos os ângulos institucionais, e que, em teoria, devem estar prescritas em um plano museológico: missão, organização, políticas, recursos humanos e infraestrutura. Perpassando essas questões, destaca-se a necessidade de controle do microclima das coleções, a qual, no âmbito da Conservação Preventiva e do Gerenciamento de Riscos, é tratada sob o conceito mais abrangente do ***Gerenciamento Ambiental*** (CASSAR, 1995).

Dentre as ferramentas utilizadas no gerenciamento ambiental de coleções, sobressaem as ***métricas de preservação.*** As métricas de preservação são parâmetros ou índices que permitem uma ***avaliação quantitativa, mensurável, da qualidade das condições de conservação*** das coleções, em função de condicionantes ambientais. Nesse sentido, podem ser caracterizadas como ***ferramentas diagnósticas.*** Elas permitem comparar duas ou mais situações ambientais que ocorrem em ocasiões diferentes no mesmo espaço, ou também comparar espaços distintos com diferentes condições ambientais, em termos da ***expectativa de vida*** das coleções neles abrigadas. Constituem, em última análise, critérios quantitativos que podem ser derivados de medições ou simulações ambientais, cuja interpretação pode constituir um auxilio importante nas tomadas de decisão visando à melhoria das condições de conservação, e à consequente diminuição dos riscos para a preservação dos bens culturais. O seu estudo, nesse contexto, constitui um dos temas centrais deste trabalho.

Para Ault,

> Os museus representam uma classe única de ambientes internos com requisitos de controle ambiental que são bem diferentes de edifícios tradicionalmente ocupados. Como responsáveis pela preservação de artefatos naturais e culturais, os museus e arquivos frequentemente contêm objetos insubstituíveis. De situações onde o ambiente dos objetos não é corretamente mantido e controlado, podem resultar danos permanentes. Uma maior compreensão do papel que fatores ambientais representam na preservação dos artefatos ajudaria a especificar um sistema de climatização que atendesse as necessidades especiais dos museus (...)

> A solução mais óbvia para os problemas no campo dos museus é um *retrofit* completo e uma renovação dos sistemas de ar condicionado dos edifícios[1]. (AULT, 2000, p. i)

A fala de Ault denota uma ***postura de projeto*** típica do séc. XX, ainda encontrada frequentemente na arquitetura contemporânea de museus, arquivos e bibliotecas dos países desenvolvidos. Segundo essa postura, a solução da problemática ambiental peculiar desta tipologia de edifícios passa pelo uso de sistemas artificiais (ativos) de climatização. Contudo, esse uso é, na verdade, uma ***opção projetual***, perante a possibilidade da aplicação de sistemas passivos e híbridos.

O campo da Conservação Preventiva, considerado aqui como interno ao da Ciência da Conservação, compartilha questões e recortes peculiares, provenientes de outro campo hodierno de conhecimento: o da Ciência da Sustentabilidade. Este último, por sua vez, também atrai e conforma, do campo contemporâneo da Arquitetura e Urbanismo, temáticas que interessam e se intercruzam com a Ciência da Conservação, como por exemplo, Bioclimatologia, Conforto Ambiental e Eficiência Energética.

Na conjuntura delineada acima, destaca-se, como temática interessante ao projeto dos edifícios, o uso da ventilação natural, a qual está intimamente ligada à caracterização do microclima interno dos edifícios. Ela influencia diversos aspectos do ar, determinantes em termos de riscos potenciais para as coleções, tais como: velocidade, gradiente de temperatura, conteúdo de umidade, concentração de poluentes de origem externa e interna, deposição de particulados, interação com micro-organismos, entre outros.

A circulação do ar, nas diversas escalas dos edifícios, salas, móveis ou embalagens contendo objetos de coleções, representa um papel central nos mecanismos de deterioração combatidos por meio dos procedimentos próprios da Conservação Preventiva e do Gerenciamento de Riscos. Entretanto, ela constitui apenas um dentre vários aspectos complexos derivados da dinâmica e comportamento higrotérmico das coleções e dos edifícios

[1] Museums represent a unique class of indoor environments with environmental control requirements that are quite different than traditional occupant-based buildings. As caretakers of cultural and natural artifacts, museums and archives often contain irreplaceable objects. In situations where environments for artifacts are not correctly maintained and controlled, permanent damage can result. A greater understanding of the role that environmental factors play in the preservation of artifacts would help to specify a heating, ventilation and air conditioning (HVAC) system that meets the special requirements of museums (…) The most obvious solution to the environmental control problems within the Field Museum is a complete retrofit and renovation of the building's HVAC system.

que as abrigam, os quais funcionam como filtros protetores. Para sua investigação e predição diagnóstica tem-se utilizado cada vez mais os recursos das ***simulações computacionais.***

Simulações computacionais são ferramentas que complementam outras técnicas de avaliação próprias a cada área do conhecimento aplicado, em geral, de maneira vantajosa em termos financeiros e de tempo. Assim como as métricas de preservação, no âmbito da Ciência da Conservação, as simulações computacionais também podem ser utilizadas como ferramentas diagnósticas e de suporte a tomadas de decisão. Seu uso aplicado à Conservação Preventiva de coleções constitui o outro tema central deste trabalho.

O estudo do potencial de uso de simulações computacionais na otimização da ventilação natural em edifícios que abrigam coleções, além de possibilitar a geração de novos conhecimentos na área da Conservação Preventiva, justifica-se também pela necessidade de revisão dos paradigmas da arquitetura contemporânea de museus, frente à problemática global da sustentabilidade e do desenvolvimento sustentável.

Objetivos da pesquisa

Objetivo principal

Investigar o potencial de aplicabilidade de métricas de preservação e de simulações computacionais de variáveis ambientais, como ferramentas de análise e previsão diagnóstica visando à conservação preventiva de coleções, por meio de um estudo de caso: a Capela da Santa Ceia, localizada no Santuário de Bom Jesus de Matosinhos, em Congonhas, Minas Gerais.

Objetivos específicos

i) Contribuir para um avanço metodológico-conceitual na prática profissional de conservadores-restauradores, investigando o uso de ferramentas diagnósticas aplicadas à conservação preventiva de coleções, abrangendo aspectos relativos aos materiais constituintes, agentes e mecanismos de deterioração e sua interação com o microclima;

ii) Realizar, pelo período mínimo de um ano, monitoramento ambiental de temperatura e umidade relativa no interior da Capela, de modo a viabilizar o objetivo principal;

iii) Determinar critérios-limite de temperatura e umidade relativa favoráveis à conservação das esculturas em madeira policromada abrigadas na Capela;

iv) Determinar o potencial de uso, ao longo do ano, de estratégias de ventilação natural ou forçada, baseados nos critérios acima, com vistas à melhoria das condições de conservação de esculturas em madeira policromada, abrigadas na Capela, a partir do processamento de dados climáticos cedidos pelo INMET e obtidos por meio de monitoramento contínuo no interior do edifício;

v) Simular, por meio de modelo preditivo por regressão linear múltipla e por meio da utilização do programa *Energy Plus* ©, o regime de variação de temperatura e umidade do ar no interior da Capela, em base horária;

vi) Calcular e comparar, com base nos dados monitorados no interior da Capela e nos resultados das simulações ambientais, as seguintes métricas de preservação: índices de desempenho, isopermas, índice de preservação, índice de preservação ponderado pelo efeito cumulativo do tempo, teor de umidade nas condições de equilíbrio, mudança dimensional e fator de risco de mofo;

vii) Estudar, por meio de simulações no programa *Ansys CFX* © e ensaios em túnel de vento, a circulação do ar no entorno imediato e no interior da Capela, verificando a existência de zonas potencialmente favoráveis à deposição de particulados sobre as esculturas;

Formulação do problema

O presente trabalho se propõe a responder à seguinte questão: Qual o potencial e especificidades relevantes envolvidas no uso das métricas de preservação e simulações computacionais como ferramentas de análise e previsão diagnóstica aplicadas à Conservação Preventiva de coleções?

Para responder à questão acima, a metodologia adotada, descrita no Capítulo 4, envolveu investigações e medições em campo bem como derivações, cálculos e simulações computacionais de aspectos e variáveis pertinentes ao estudo de caso, com a posterior análise e discussão quanto à validade e possibilidades de aplicação dos resultados.

A complexidade do problema proposto aumentaria sobremaneira se consideradas simultaneamente as necessidades do **conforto ambiental humano**, as condições de

preservação do acervo e os aspectos de **eficiência energética** envolvidos em ambos. Em função disso, como recorte conceitual, para o aprofundamento da investigação e considerações aqui apresentadas, **o enfoque temático escolhido foi o da conservação das coleções**.

Por motivos semelhantes, tomando como um dos objetivos específicos o estudo do potencial de uso de ventilação natural na melhoria das condições de conservação, foi **excluída**, do recorte conceitual adotado, a abordagem **quantitativa** das métricas de preservação relacionadas à **incidência de radiação.** Tal abordagem demandaria, durante o período de monitoramento em campo, o registro das condições de iluminação no interior da capela, bem como a medição do percentual de radiação ultravioleta na radiação visível e o uso de técnicas de termografia. Em alguns pontos, o texto aborda as métricas relacionadas à incidência de radiação de maneira qualitativa, reservando o enfoque quantitativo para as métricas derivadas da temperatura e umidade relativa medidas no interior da Capela ou simuladas computacionalmente.

Relevância

Cabe destacar a relevância deste trabalho como contribuição para que futuramente sejam desenvolvidas normas técnicas que tratem dos aspectos ambientais na preservação das coleções e bens culturais no Brasil. Essa potencialidade no uso das métricas de preservação foi ressaltada por STRANG e GRATTAN (2009, p. 124) ao revisarem o trabalho pioneiro de SEBERA (2001). O presente trabalho vem ampliar e atualizar a produção científica do LACICOR - Laboratório de Ciência da Conservação da UFMG, cabendo também enfatizar o seu pioneirismo em nível nacional, ao associar o uso de métricas de preservação ao uso de ferramentas de simulação computacional, ambos aplicados à preservação do Patrimônio Cultural.

No âmbito da Ciência da Conservação, a Conservação Preventiva é uma área de conhecimento cuja consolidação é recente e ainda está em curso, com desdobramentos, interfaces e aplicações específicas da área de Gerenciamento de Riscos. Ambas possuem raízes teóricas diversificadas nos campos das Artes e Humanidades, Ciências Exatas, Sociais Aplicadas, da Saúde, da Informação e Biológicas, onde este trabalho se esforça por transpor e aplicar termos, métodos e abordagens. Tal esforço põe em evidência outras áreas de epistemologia recente, como a Ciência da Sustentabilidade e a Ciência do Patrimônio.

Os mecanismos de atuação dos agentes de deterioração das coleções são dinâmicos e complexos e o uso de métricas de preservação e simulações computacionais como ferramentas diagnósticas para o gerenciamento ambiental aponta para uma **mudança de paradigma.** Tal uso pode ser considerado um avanço metodológico-conceitual, na prática profissional de conservadores-restauradores. Ele exige um conhecimento mais aprofundado sobre os materiais que constituem as coleções, sobre os agentes e mecanismos de deterioração real ou potencialmente atuantes e sua interação com o microclima circundante. Por outro lado, resulta em índices ou parâmetros facilmente interpretáveis e úteis para os profissionais envolvidos com a preservação do Patrimônio Cultural. Intenta-se ainda um passo adicional nessa quebra de paradigmas em meio à própria evolução e consolidação do campo de saber da Ciência da Conservação ao se investigar como tais métricas podem ser calculadas a partir de simulações computacionais higrotérmicas e/ou fluidodinâmicas.

Conteúdo

O capítulo 1 contextualiza, explora e demarca a abrangência das temáticas do gerenciamento ambiental de coleções de bens culturais. Compila alguns aspectos históricos e filosóficos importantes para a delimitação da Ciência da Conservação como campo de conhecimento, dentro do qual se desenvolveram e estão se consolidando as áreas de Conservação Preventiva e Gerenciamento de Riscos. Explicita as interconexões e diferenças entre o Gerenciamento Ambiental e o Conforto Ambiental, no contexto dessas duas áreas em consolidação. Discute conexões a Ciência do Patrimônio e outras áreas de conhecimento.

O capítulo 2 define o recorte conceitual do trabalho, explicitando suas interfaces com a pesquisa no campo contíguo da Ciência da Sustentabilidade. Destaca daí os rebatimentos peculiares sobre a Ciência da Conservação, na transposição de questões da Arquitetura e do Urbanismo, particularmente aquelas oriundas das áreas de Bioclimatologia, Conforto Ambiental e Eficiência Energética em Edificações. Trata da Sustentabilidade Ambiental como problemática contemporânea da Ciência da Conservação, em um cenário de mudanças climáticas globais. Enfatiza os aspectos que determinam o desempenho dos edifícios enquanto filtros protetores para as coleções, enfocando a problemática envolvida com a escolha, implantação, manutenção e gerenciamento dos sistemas de climatização. Aborda particularidades dos sistemas de climatização ativos, passivos e híbridos, no que tange à conservação das coleções, ressaltando o estado da arte da pesquisa sobre a sua utilização em

museus, arquivos e bibliotecas. Realça as implicações do uso da ventilação natural ou forçada como estratégia de gerenciamento ambiental.

O capítulo 3 trata da aplicabilidade de ferramentas de simulação computacional à conservação do Patrimônio Cultural. Mapeia e classifica as ferramentas disponíveis entre as classes de códigos nodais multizonais e códigos de dinâmica de fluidos computacional, esclarecendo as diferenças entre tais classes e introduzindo o seu embasamento físico-matemático. Apresenta, por meio de exemplos encontrados na literatura, o estado da arte da pesquisa sobre a aplicação dessas ferramentas ao gerenciamento ambiental de coleções.

O capítulo 4 trata da metodologia adotada neste trabalho. Detalha as etapas de desenvolvimento e os procedimentos adotados em cada uma delas. Finaliza com uma discussão sobre as limitações do trabalho e incertezas experimentais.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e sua análise, à luz do recorte teórico-conceitual adotado, do qual cabe destacar a descrição e discussão do embasamento teórico-metodológico das métricas de preservação, apresentadas no Apêndice A. **Recomenda-se fortemente ao leitor a leitura do Apêndice A, previamente à leitura do Capítulo 5.**

Como considerações finais são enfatizadas as conclusões e evidências mais importantes, derivadas da análise e interpretação dos resultados obtidos, em resposta aos objetivos e problemas levantados nesta introdução, bem como sugestões de trabalhos futuros para continuidade da pesquisa, a partir das questões discutidas neste trabalho.

O Apêndice A apresenta a descrição e o embasamento teórico-metodológico das métricas de preservação investigadas neste trabalho, bem como o estado da arte da pesquisa sobre a sua aplicação na conservação preventiva de coleções. São abordadas as métricas aplicáveis a mecanismos de deterioração química, físico-mecânica e biológica, bem como os índices de desempenho ambiental prescritos em manuais e normas técnicas.

O Apêndice B explora a temática da arquitetura bioclimática em suas implicações e interfaces entre o conforto ambiental humano e para coleções. Compara as zonas de segurança ambiental propostas na literatura para artefatos de madeira ou coleções diversas. Aborda os instrumentos auxiliares para as fases iniciais de projeto, que partem da análise climática e recomendações arquitetônicas. Aprofunda e discute metodologias de zoneamento bioclimático, que embasaram a localização dos estudos de caso inicialmente previstos neste

trabalho. Detalha o zoneamento bioclimático brasileiro, proposto em norma técnica, bem como a proposta de zoneamento bioclimático para Minas Gerais, com base na metodologia de análise climática e recomendações arquitetônicas de Mahoney.

O Apêndice C resume os princípios que regem a ventilação natural nos edifícios que abrigam coleções, abordando fatores de adequação climática, urbanísticos e arquitetônicos que influenciam na circulação do ar no interior das edificações.

O Apêndice D descreve detalhadamente os equipamentos utilizados e os procedimentos adotados na sua aferição.

O Apêndice E apresenta estatísticas adicionais sobre os dados climáticos de Ouro Branco, as estatísticas do modelo de regressão linear múltipla utilizado e as configurações das simulações realizadas nos programas *Energy Plus* © e *Ansys CFX* ©.

CAPÍTULO 1

GERENCIAMENTO AMBIENTAL NO ÂMBITO DA CIÊNCIA DA CONSERVAÇÃO

1.1- A Ciência da Conservação no âmbito transdisciplinar das ciências naturais – breve perspectiva histórica e desdobramentos atuais

A Ciência da Conservação, definida como campo de conhecimento **transdisciplinar**[2], é uma concretização relativamente recente (FRANTZ, 2007, p. 40; OLIVEIRA, 2006a, p. 148; ROEMICH e WEINTRAUB, 2010; SOUZA, 2008b). Este trabalho tenta realizar uma delicada mediação dialética entre as disciplinas que se miscigenam nesse campo em formação, apropriando-se de ferramentas comumente utilizadas nas Ciências Exatas de onde busca transpor métodos, linguagens e abordagens para uma área em que atuam profissionais habituados às Ciências Humanas, Sociais Aplicadas e à Arte.

Estudando-se a etimologia da palavra museu, retrocedemos à tradição clássica, em que os sacerdotes responsáveis pelo ***áditon***[3] do templo grego, onde era depositado o *thesauros* (oferendas, ex-votos, relíquias e objetos de memória), cumpriam tarefas de gestão e inventário, sendo remunerados por este trabalho e se responsabilizando também pela conservação dos objetos.

FRONER (2001) explora os caminhos do desenvolvimento deste campo científico e das profissões que nele vêm atuando e elucida, por meio de apontamentos históricos e filosóficos, como o seu **campo e hábito**[4] vão se tornando mais claros e definidos à medida que coleções privadas e públicas tornam-se mais extensas e organizadas, e constituem-se

[2] O termo diz respeito à intercomunicação entre as disciplinas, de modo que resulte uma modificação entre elas, por meio de um diálogo compreensível. (JAPIASSÚ apud ALVES et al., 2004). Vide como CASSAR e TAYLOR (2004) consideram a abordagem transdisciplinar na Conservação Preventiva. CORREA (2003, p. 137) discorre sobre a necessidade dessa abordagem na investigação museológica.

[3] Sala tipicamente encontrada nos templos da Antiguidade Clássica, acessada somente pelos sacerdotes e utilizada para o culto ou colocação de oferendas.

[4] Na conceituação de Pierre Bourdieu, o termo *campo científico* denomina o espaço simbólico, lugar empírico de socialização, no qual os agentes – dominantes ou novatos – competem e legitimam representações. Já os *hábitos* se constituem em "sistemas de esquemas gerados de percepção, de apreciação e de ação, que são o produto de uma forma específica de ação pedagógica e que tornam possível a escolha dos objetos, a solução dos problemas e a avaliação das soluções" (BOURDIEU, 1976).

como patrimônio financeiro, determinando a necessidade de pessoas capacitadas para a sua manutenção. A expansão do colecionismo no decorrer do século XVII é considerada um marco relevante neste desenvolvimento. Ele se dá como uma consequência direta da prosperidade econômica e das transformações sociais decorrentes da riqueza acumulada. Para abrigar as coleções, criam-se galerias, gabinetes de curiosidades, estúdios de leitura, salas de antiguidades nos palácios (IMPEY e MACGREGOR, 2013).

No séc. XVIII, a Revolução Francesa e em seguida o período napoleônico consolidam o caráter documental dos monumentos, anexando a eles o conceito "histórico" e a transformação de coleções particulares em museus que passam a guardar um patrimônio "público". O primeiro traço característico dos museus modernos é a sua permanência, em oposição à transitoriedade das coleções particulares. Também no séc. XVIII, coleções pertencentes à coletividade surgem no seio das universidades, que herdam e passam a ampliar os acervos dos nobres europeus.

FRONER e ROSADO (2008) destacam mudanças ocorridas neste processo, a partir do século XIX:

> quando as grandes coleções públicas – museus e bibliotecas – são formadas, os profissionais dessa área se veem confrontados com uma nova responsabilidade perante os acervos. Nesse momento, a linha limítrofe que separava a criatividade do artista e a atitude do restaurador começa a ser mais bem demarcada: o respeito estético e pela originalidade da obra passa a ser uma bandeira de muitos agentes que trabalham com cultura material.
>
> (...) As atividades de restauração intensificaram-se na Europa após o período da Revolução Francesa, das Guerras Napoleônicas e demais conflitos relacionados à construção do Estado Moderno, devido ao vandalismo, à prática do espólio de guerra e aos traslados abruptos. A segunda metade do século XIX concebe duas vertentes antagônicas em relação à prática da restauração: de um lado encontramos Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc e de outro Willian Morris e John Ruskin. (FRONER e ROSADO, 2008, p. 5-6).

As autoras apontam, em sequência cronológica, o surgimento de uma corrente historicista, no séc. XX. Segundo elas, os conceitos de Alois Riegl na obra "O culto moderno aos monumentos", de 1903 "foram utilizados como base para a prática da profissão, uma vez que é nesse primeiro texto que o respeito ao original e os critérios de seleção a partir da noção de valor são anunciados" (FRONER e ROSADO, 2008, p. 7). O pensamento de Riegl e Camilo Boito estruturou as ideias das décadas de 1930 e 1940, como por exemplo, os escritos de Gustavo Giovannoni, que vão se refletir nos documentos que estabelecem os princípios da restauração concebida como reintegração e conservação, no séc. XX. O Instituto Central de

Restauro, em Roma, o ICOM - Conselho Internacional de Museus e o ICCROM - Centro Internacional para o Estudo da Preservação e Restauração do Patrimônio Cultural, são fundados respectivamente em 1939, 1946 e 1956. Este último, fruto da colaboração entre Paul Philippot e Cesare Brandi, autores que vão influenciar toda uma geração, mantendo a Itália como centro formador de recursos humanos e teorias da restauração durante esse período.

Em 1964 é editada a carta de Veneza, no II Congresso Internacional de Arquitetos, e é fundado o ICOMOS – Conselho Internacional de Monumentos e Sítios, com a proposta de trabalhar a preservação no contexto social e urbano dos monumentos. Esse é o foco dado à Convenção do Patrimônio Mundial que estabeleceu diretrizes globais para a proteção do patrimônio cultural e ambiental da humanidade. A década de 1970 é caracterizada por estudos de suportes materiais e o desenvolvimento de técnicas e exames especiais para análise científica das obras de arte. A essa altura, o Laboratório dos Museus Reais de Berlim (1888) já era quase centenário e alguns laboratórios de pesquisa existentes em museus já contavam algumas décadas de existência: Laboratório de Pesquisa do Museu Britânico – 1920; Museu de Arte Fogg – 1928; Museu de Belas Artes de Boston – 1930; Laboratório de Pesquisa dos Museus da França – 1932; Laboratório Central dos Museus Belgas – 1948; Laboratório de Pesquisa em Conservação do Instituto Smithsonian – 1963 (STANIFORTH, 2013, parte III).

Os anos 80 assistem ao desenvolvimento de estudos de Química aplicada à Restauração. A obra *The museum environment,* de THOMSON (1986) introduziu uma série de princípios e padrões para o controle ambiental de coleções, pesquisados pela *National Gallery* de Londres, desde a 2ª Guerra Mundial (DAVIES e RAWLINS, 2013).

GUICHEN (2009) aponta o livro *The conservation of antiquities and works of art,* de PLENDERLEITH (1956) como o marco inicial do que nos anos 90 passou a se denominar **Conservação Preventiva**. Um marco importante para a consolidação da Ciência da Conservação foi um seminário internacional promovido pelo ICCRO0M, realizado em Bolonha, em 1999, cujo documento[5] resultante conclui que

> (...) não é possível pensar sobre a conservação sem a sustentação das ciências naturais. Trabalhos de arte não têm somente valor estético e histórico, mas também uma natureza física que deve ser considerada. Compreendendo as propriedades dos materiais; o macro e o microambiente; o estado de preservação e os processos da deterioração; o desenvolvimento de materiais e de métodos de conservação, a área

[5] http://www.episcon.scienze.unibo.it/episcon/bologna-document (Acessso em 23/08/2011).

> passa a consolidar um saber específico. Entretanto, enquanto os papéis dos curadores, conservadores e documentalistas parecem estar estabelecidos, o mesmo não se dá com o dos cientistas da conservação. A definição do termo, a abrangência de atuação e formação tornou-se imprescindível para a ocupação de um espaço social. (FRONER e ROSADO, 2008, p. 19).

Nos anos 2000, o movimento ambientalista, que se iniciou na década de 1970 chega também ao campo da Conservação-Restauração, sendo por vezes denominado, nos trabalhos mais recentes, de "Conservação Verde" (vide seção 2.2).

Na última década, a Ciência da Conservação ganhou o *status* de instância validadora dos procedimentos de conservação-restauração. Periódicos da área de conservação-restauração dedicaram números especiais a essa temática (GCI, 2005).

OLIVEIRA (2006, p. 148) considera que sem o conhecimento e linguagem científicos não há como montar uma equipe interdisciplinar séria para executá-los. REEDY et. al (1992) classificam os problemas típicos com que lidam os cientistas da conservação, em termos de etapas de estudo e categorias de investigação. Apresentam ainda como os diversos procedimentos do método científico se aplicam à pesquisa em conservação-restauração. CRUZ (2012) discorre sobre o contexto e modelos em que se dão as relações entre as Ciências de um modo geral e a Conservação, destacando as questões a respeito dos bens culturais, que os estudos laboratoriais procuram responder. Essa temática é abordada também por AINSWORTH (2005) e LECHTMAN et al. (2005). ESCOBAR (2013) propõe aperfeiçoar os procedimentos técnico-científicos aplicados à restauração do Patrimônio Cultural por meio de protocolos de identificação, caracterização, investigação, intervenção e difusão, aplicados à preservação de bens culturais imóveis. O grau de especialização atual da Ciência da Conservação pode ser ilustrado pelo número de grupos de trabalho específicos que existem no ICOM-CC (Comitê de Conservação do Conselho Internacional de Museus)[6]: vinte e um, entre eles, o de Conservação Preventiva.

[6] http://www.icom-cc.org/9/working-groups/#.UDJBHNeS_kA (Acesso em 20/08/2012).

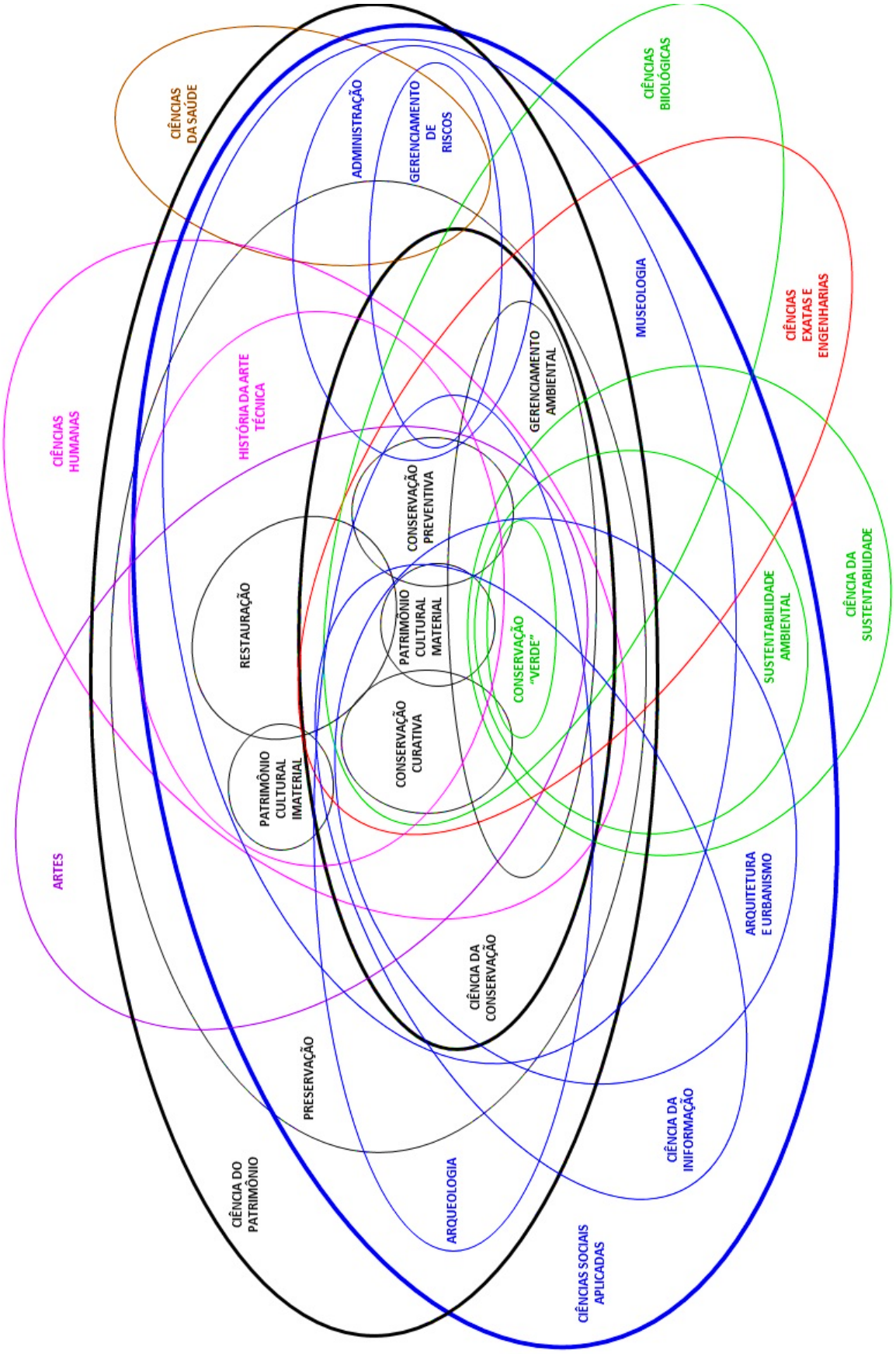


Figura 1 – Interfaces entre os campos de conhecimento envolvendo a conservação do Patrimônio Cultural.

Em 2006, o comitê de ciência e tecnologia do parlamento britânico (REINO UNIDO, 2006) propôs um novo termo para denominar um campo científico mais amplo, que inclui e configura uma extensão da Ciência da Conservação: a Ciência do Patrimônio (Heritage Science). Estariam aí contidos todos os aspectos da pesquisa realizada pelos cientistas da conservação, realizada em instituições museais, universidades e institutos de pesquisa, abrangendo não somente os aspectos físico-químicos que dão suporte à Conservação-Restauração, mas também ao acesso, registro e interpretação do Patrimônio Cultural. A Figura 1 procura ilustrar sinteticamente as interfaces entre diversos campos do conhecimento tratados nesta tese.

OLIVEIRA (2006) traça o percurso e as perspectivas futuras da formação científica como base da formação do conservador brasileiro. SOUZA (2011) também apresenta um breve histórico e aborda as relações entre as práticas científicas e a conservação de acervos no contexto nacional.

No Brasil, a partir de 1920, a temática do patrimônio começa a ser considerada politicamente relevante. Já funcionavam os grandes museus nacionais para proteção de bens móveis. Porém, ainda não havia meios para proteção de bens integrados e imóveis. Em 30 de novembro de 1937 é promulgado o decreto-lei nº 25, que cria o SPHAN e regulamenta o instituto do tombamento. Nos anos 50 destaca-se a atuação dos restauradores Edson Motta, no Rio de janeiro, João Rescala na Bahia, Jair Afonso Inácio, em Ouro Preto e Fernando Barreto em Pernambuco. As missões da UNESCO no Brasil nas décadas de 1960 e 1970 geraram um contexto de cooperação internacional que favoreceu a criação, ao final dos anos 70, do PCH – Programa de Cidades Históricas, e a articulação, em nível estadual, de alguns órgãos de proteção do Patrimônio Cultural (LEAL, 2010, 2011; SOUZA, 2008).

Na década de 1980 é fundado na UFMG o CECOR – Centro de Conservação-Restauração de Bens Culturais Móveis, com atuação destacada da profa. Beatriz Coelho, e na Bahia, o CECRE - Curso de Conservação de Monumentos e Sítios Históricos - na UFBA, pelas mãos do Prof. Mário Mendonça. Ambos com apoio do Ministério da Cultura e da UNESCO (COELHO, 2011; OLIVEIRA, 2006; SOUZA, 2008). A Associação Brasileira de Conservadores-Restauradores de Bens Culturais também foi fundada em 1980 e desde então o foco dos debates tem convergido para a regulamentação da profissão, presentemente em discussão no Congresso Nacional. Atualmente o cadastro de cursos do Ministério da Educação registra na área de Conservação-Restauração três cursos de bacharelado (UFMG,

UFRJ E UFPEL) e cinco superiores de tecnologia (IFMG, FTSG, PUCSP, UNESA e UNIEURO) [7].

Nesse contexto, destaca-se a atuação do Laboratório de Ciência da Conservação da UFMG, onde se desenvolveu a pesquisa que embasou esta tese. O LACICOR é coordenado pelo prof. Luiz Souza e vem consolidando sua atuação em duas linhas principais, a saber: análise científica de obras de arte e conservação de bens culturais. Trabalhando com a Especialização desde a fundação do CECOR, nos anos 2000 a Escola de Belas Artes da UFMG consolidou seus programas de mestrado e doutorado na área, vindo a inaugurar, em 2008, o primeiro curso brasileiro a formar conservadores-restauradores em nível de graduação.

1.2- Conservação Preventiva e Gerenciamento de Riscos no âmbito da Ciência da Conservação

1.2.1- Conservação preventiva

A Conservação Preventiva é um dos principais temas da preservação do Patrimônio Cultural. Ela abrange todas as atividades e/ou atitudes que visam evitar, retardar e/ou minimizar a deterioração dos bens culturais. Envolve medidas indiretas, abrangendo questões relativas a: capacitação e gestão de recursos humanos, políticas institucionais de preservação, acondicionamento, exposição, manuseio; transporte, segurança, gerenciamento ambiental (monitoramento e controle das condições climáticas como temperatura, umidade e pureza do ar), controle de pragas, entre outros.

De natureza multi e transdisciplinar, a Conservação Preventiva compreende conteúdos de diversas áreas do conhecimento, ilustradas na Figura 1: (i) Engenharias; (ii) Ciências Sociais Aplicadas (Museologia, Arquitetura e Urbanismo, Administração, Ciência da Informação, Arqueologia); (iii) Ciências Exatas (Física, Química); (iv) Ciências Humanas (História[8], Filosofia); (v) Artes; (vi) Ciências Biológicas e da Saúde (Botânica, Microbiologia, Entomologia).

[7] Consulta realizada em 25/08/2013.

[8] No contexto ilustrado na Figura 1, destaca-se o campo interdisciplinar denominado História da Arte Técnica (AINSWORTH, 2005; LECHTMAN et al., 2005).

STANIFORTH (2013) faz um rastreamento das perspectivas históricas do desenvolvimento da Conservação Preventiva, abrangendo aspectos que envolvem teoria e prática no âmbito da Conservação-Restauração e busca explorar as relações entre práticas antigas de conservação e a problemática contemporânea da Sustentabilidade. Para STANIFORTH (2013, p. xiii) o termo **preservação** implica na "manutenção das coisas como estão", o que seria, em realidade, impossível, uma vez que as alterações físico-químicas decorrentes do envelhecimento dos objetos são inexoráveis. Já o termo **conservação** poderia, para Staniforth, ser definido como "administração da alteração" e **conservação preventiva** como "desaceleração da taxa de alteração, deterioração ou envelhecimento" dos objetos.

Em sua 15ª Conferência Trienal, realizada em Nova Délhi em setembro de 2008, o Comitê de Conservação do ICOM adotou uma resolução[9] sobre terminologia para a área de conservação-restauração, definindo os termos "conservação preventiva", "conservação curativa" e "restauração", conforme abaixo. Cabe enfatizar que os exemplos citados em cada definição não devem ser interpretados de maneira restritiva, podendo aplicar-se a mais de uma delas, em alguns casos.

Conservação: Todas aquelas medidas ou ações que visam à salvaguarda do patrimônio cultural tangível, assegurando a sua acessibilidade às gerações presentes e futuras. A conservação compreende a conservação preventiva, conservação curativa e a restauração. Todas estas medidas e ações devem respeitar o significado e as propriedades físicas dos bens culturais em questão.

Conservação preventiva: Todas as medidas e ações que tenham como objetivo evitar ou minimizar deteriorações futuras ou perdas. São realizadas no contexto ou na área circundante ao bem, ou mais frequentemente, um grupo de bens, independentemente da sua idade ou condição. Estas medidas e ações são indiretas - não interferem com os materiais e as estruturas dos bens, não modificam sua aparência. Exemplos: medidas e ações para registro, armazenamento, manipulação, embalagem, transporte, controle das condições ambientais (luz, umidade, poluição atmosférica e controle de pragas) planejamento de emergências, treinamento de pessoal, sensibilização do público, aprovação legal.

[9] http://www.icom-cc.org/242/about-icom-cc/what-is-conservation/ (Acessso em 23/08/2011).

Conservação curativa: Todas aquelas ações aplicadas de maneira direta sobre um bem ou grupo de bens culturais que tenham como objetivo deter os processos de deterioração presentes ou reforçar sua estrutura. Estas ações só se realizam quando os bens se encontram em um estado de fragilidade notável ou estão se deteriorando a um ritmo elevado, podendo se perder em um tempo relativamente breve. Estas ações às vezes modificam o aspecto dos bens. Exemplos: higienização, desinfestação, dessalinização, desacidificação, desidratação, estabilização da corrosão, consolidação.

Restauração: Todas aquelas ações aplicadas de maneira direta a um bem individual e estável, que tenham como objetivo facilitar sua apreciação, compreensão e uso. Estas ações só se realizam quando o bem já perdeu uma parte de seu significado ou função, por meio de alterações ou deteriorações passadas. Baseiam-se no respeito ao material original. Na maioria dos casos, essas ações modificam o aspecto do bem. Exemplos: Reconstituição, remodelamento, reentelamento, reintegração de perdas.

No Brasil, em termos de esforço coordenado de pesquisa e produção científica na área, merecem menção: o CPBA - Projeto Conservação Preventiva em Bibliotecas e Arquivos[10], coordenado por Ingrid Beck, que traduziu para o português uma série de cinquenta e três títulos de referência e uma coleção de nove volumes originalmente publicada pela Comissão de Museus e Galerias de Londres e republicada aqui pela Edusp em parceria com a Fundação Vitae, sob o nome de “Museologia: roteiros práticos”. CORREA (2003, p. 138) apontou a incipiência na sistematização da produção dos grupos de pesquisa desta área no Brasil, enfatizando a ausência de autores brasileiros em publicações como as do projeto CPBA ou a coletânea organizada por MENDES et. al (2001). Nesse sentido, cabe destacar o trabalho desenvolvido no LACICOR, que está a frente da rede RECICOR - Rede de Ciências, Tecnologia e Conservação Integrada de Bens Culturais[11]. Em 2008, o LACICOR produziu para o Departamento de Museus do IPHAN, hoje IBRAM, uma série de dez cadernos técnicos

[10] http://www.arqsp.org.br/cpba/

[11] http://dgp.cnpq.br/buscaoperacional/detalhegrupo.jsp?grupo=0333803W1IXAXR (Acesso em 29/08/2013).

sobre conservação preventiva[12]. A atuação do LACICOR na América Latina é destacada por DARDES e DRUZIK (2000).

A abordagem tradicional da Conservação Preventiva procura evitar, retardar e/ou minimizar a deterioração dos materiais presentes nas coleções. Os processos de deterioração, por sua vez, estão ligados aos mecanismos de atuação de diversas **causas, fatores ou agentes de deterioração** que se encontram classificados na literatura específica da área, de maneira extremamente diversificada, variando os sistemas de classificação em função da ***origem*** ou da **natureza** dos agentes. Quanto à origem: **extrínseca** ou **intrínseca** aos objetos. Quanto à natureza, as classificações mais abrangentes são: **biológicos, químicos e físico-mecânicos**. Tais categorias podem ser ampliadas, compreendendo também fatores ambientais, climáticos, antrópicos, arquitetônicos e/ou de infraestrutura, etc. Como referências clássicas sobre os agentes de deterioração e seus mecanismos de atuação, podemos destacar PLENDERLEITH, (1956), THOMSON (1986) e GUICHEN (1983, 1984, 1987, 1998). STANIFORHT (2013) recupera referências textuais anteriores ao séc. XX, de técnicas tradicionais para evitar, bloquear ou responder aos diversos agentes de deterioração.

Esses autores contribuíram para que o enfoque principal da Conservação Preventiva recaísse sobre os fatores ambientais e climáticos, estabelecendo padrões e especificações que se baseiam mais em práticas consolidadas e na capacidade de controle ambiental dos sistemas ativos de climatização, do que nas necessidades dos objetos (BROWN e ROSE, 1996, p. 12; MICHAKSKI, 1994; STANIFORTH, 2007, p. 3).

Posteriormente, outros autores aprofundaram a investigação e questionamento em torno do mecanismo de atuação dos agentes de deterioração, demonstrando a incompletude dos padrões estabelecidos a partir da 2ª metade do séc. XX, diante da complexidade dos problemas de gerenciamento ambiental[13]. Tais padrões, além de resultarem em maiores custos de operação, também não consideravam adequadamente a diversidade dos edifícios que abrigam coleções, ampliada pela heterogeneidade de climas onde se situam (SMITH, 1999;

[12] http://www.lacicor.org/index.php?option=com_content&view=article&id=80&Itemid=57 (Acesso em 19/11/2012).

[13] (BRATASZ, 2013b; CASSAR, 1995; ERHARDT e MECKLENBURG, 1994,1995; ERHARDT et al., 2007; McCORMICK-GOODHART, 1996; MECKLENBURG, 2007a, 2007b; MECKLENBURG et al., 1998; MECKLENBURG e TUMOSA, 1999; MICHALSKI, 1993, 1994, 1996, 2002, 2007, 2011; MICHALSKI e GRATTAN, 2007; PADFIELD, s.d.a, s.d.b, 2013; WEINTRAUB, 2006)

ARTIGAS, 2007). BROWN e ROSE (1996) comentam as origens e alterações nestes padrões, ao longo do séc. XX. Em 2010 o IIC promoveu uma mesa redonda de especialistas para discutir especificamente essa questão[14].

A partir dos estudos de Stefan Michalski, o CCI – Instituto Canadense de Conservação[15] propôs agrupar em dez os agentes de deterioração relevantes para a preservação dos bens culturais, a saber: (i) forças físicas; (ii) roubo e vandalismo; (iii) fogo; (iv) ação direta da água; (v) pestes; (vi) poluentes; (vii) luz (visível, infravermelha e ultravioleta); (viii) temperatura incorreta; (ix) umidade incorreta; (x) dissociação. Essa abordagem veio a configurar um esquema conceitual para a preservação de coleções (MICHALSKI, 1990; STANIFORTH, 2013).

Desde 2003, o CCI, em parceria com o ICCROM e com ICN – Instituto do Patrimônio Holandês (hoje Agência) vem propondo ampliar teoricamente as fronteiras da Conservação Preventiva por meio de um programa conjunto para aplicar metodologias de Gerenciamento de Riscos à preservação do Patrimônio Cultural.

1.2.2- Gerenciamento de riscos

A Gestão de Riscos é uma área de conhecimento tradicionalmente vinculada à Administração de Empresas, particularmente do segmento financeiro, principalmente no que tange a atuação das seguradoras. É vinculada também às Ciências da Saúde (vide Figura 1). A esfera de atuação a que se propõe a metodologia do Gerenciamento de Riscos aplicada à preservação do Patrimônio Cultural é mais complexa que a da Conservação Preventiva, uma vez que busca incorporar rotinas de **valoração** dos bens culturais em suas análises, bem como um **horizonte de tempo** no qual essa perda pode ocorrer e a **fração da coleção** que ela pode afetar (BROKERHOF, 2006, 2007a, 2007b; DE LA TORRE, 2002; MICHALSKI apud GCI, 2007; RUSSEL, 2009). Além de considerar o microclima onde os objetos estão contidos, o Gerenciamento de Riscos procura determinar qual a chance de eles sofrerem algum tipo de dano ou perda de valor. (MARTENS, 2012, p.13, 16).

---

[14] *The Plus/Minus Dilemma: The Way Forward in Environmental Guidelines.* Disponível em: http://www.iiconservation.org/node/1234 (Acesso em 05/09/2012). Vide também (CASSAR, 2011a).

[15] http://www.cci-icc.gc.ca/caringfor-prendresoindes/articles/10agents/index-eng.aspx (Acesso em 21/08/2012).

Apesar do conhecimento científico produzido na área, profissionais e instituições que lidam com a preservação dos bens culturais costumam aplicar normas, orientações e práticas, sem uma noção clara de como estabelecer prioridades ou de como considerar os custos envolvidos, de forma a utilizar melhor os recursos disponíveis. O Gerenciamento de Riscos trabalha com aspectos de **previsão** e **proação** procurando antecipar e priorizar as atitudes e procedimentos que possam minimizar os riscos diversos a que os bens culturais estão expostos (ASHLEY-SMITH, 1999; TAYLOR, 2005; WALLER e MICHALSKI, 2004). Trata-se de uma ferramenta que permite embasar tomadas de decisão e estabelecimento de prioridades considerando as opções de tratamento e minoração dos riscos com melhor relação custo/benefício.

Assim como a da Conservação Preventiva, essa metodologia também é interdisciplinar e permite uma visão integrada dos danos e perdas esperadas para os bens culturais, bem como da sua mitigação, proporcionando uma ferramenta útil para a elaboração de estratégias de conservação mais eficientes (MICHALSKI, 2007; HOLLÓS e PEDERSOLI JR., 2009). De certa forma ela abrange a Conservação Preventiva, na medida em que envolve o estudo dos cenários e mecanismos de ação dos **agentes de deterioração**, com base na Ciência da Conservação. Ela inclui as seguintes etapas, definidas na norma técnica ISO/DIS 31000 (ISO 2009): (i) estabelecimento de contexto; (ii) identificação de riscos; (iii) análise dos riscos; (iv) avaliação dos riscos; (v) desenvolvimento de opções para tratamento e mitigação dos riscos e (vi) comunicação e consulta.

As etapas iniciais, de estabelecimento do contexto e identificação dos riscos, compõem um **diagnóstico das condições de conservação da coleção**, que visa principalmente: (i) apontar os agentes de deterioração que interferem diretamente no estado de conservação da coleção em diversos **níveis de controle**, mostrados na Figura 2 (ASHLEY-SMITH, 1999; MICHALSKI, 2004; TOLEDO, 2010, p. 73); (ii) identificar os **riscos** a que a coleção está exposta, estabelecendo os **cenários** e **mecanismos** de atuação dos agentes de deterioração, determinando possíveis ameaças à preservação dos objetos, como elas atuam, e que tipos de dano podem causar, o que por sua vez depende da vulnerabilidade dos materiais (ASHLEY-SMITH, 1999); (iii) identificar aspectos da **gestão institucional** que interferem na conservação da coleção, como: a limpeza e manutenção, segurança, capacitação profissional, etc. (BECK, 1997).

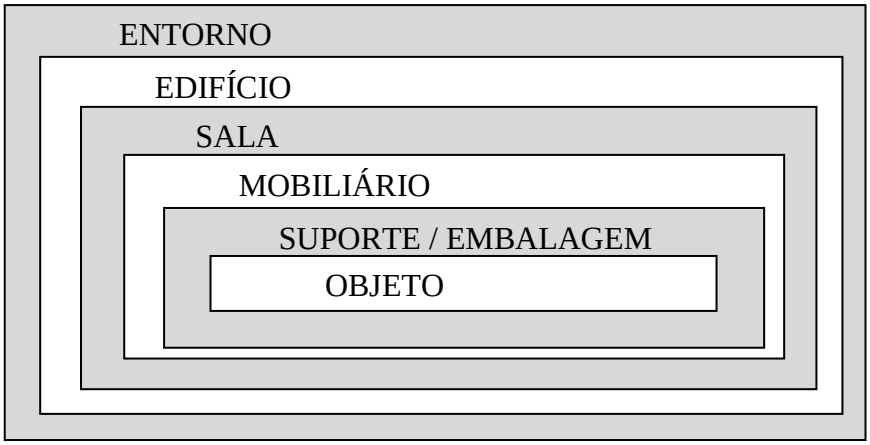


Figura 2 – Níveis de controle considerados na Conservação Preventiva e no Gerenciamento de Riscos.

As ferramentas utilizadas para o diagnóstico podem ser classificadas em três categorias:

(i) ***Listas de verificação (checklists)*** – Normalmente arrolam diversas questões sobre os aspectos de infraestrutura, vulnerabilidade dos materiais encontrados na coleção e institucionais descritos acima, às vezes utilizando sistemas de ranqueamento. Dentre as mais conhecidas estão a que foi desenvolvida pelo Instituto Getty de Conservação (GCI, 1999), traduzida para o português pela Fundação Vitae[16] e que embasou o roteiro elaborado pelo LACICOR (SOUZA et al., 2008). O ICCROM desenvolve, desde 2008 (ICCROM, 2008), uma lista de verificação que foi atualizada recentemente no projeto RE-ORG[17]. Vale igualmente verificar as listas propostas por D'AGOSTINO (2006), DE TAPOL (2002, 2011), IPI (2005, 2010), PATKUS (1984) e RESOURCE (2004).

(ii) ***Conceituais*** – Envolvem o uso de esquemas, padrões e diretrizes que classificam conceitualmente as variáveis e dados de entrada e/ou resultam em critérios de análise mensuráveis ou comparáveis. A abordagem em níveis, ilustrada na Figura 2 se encaixa nesta categoria. As **métricas de preservação**, investigadas nesta pesquisa (vide Apêndice A) inserem-se nesta classe. MARTENS (2012) e HUIJBREGTS et al. (2012) investigaram como as métricas de preservação podem ser integradas ao gerenciamento de riscos. LA

[16] http://www.icom.org.br/Diagnostico_de_Conservacao_Modelo.pdf (Acesso em 16/08/2012).

[17] http://www.re-org.info/en/download/243/34/16 (Acesso em 16/08/2012).

GENNUSA et al. (2005) propõem um indicador de risco baseado em valores de temperatura e umidade relativa obtidos por meio de monitoramento ambiental;

(iii) ***Híbridas*** – Procuram combinar as vantagens das anteriores, associando listas de verificação dentro de uma estrutura conceitual. Como exemplo, podemos citar o *Preservation Framework* desenvolvido pelo Instituto Canadense de Conservação[18] (MICHALSKI, 1990), o sistema de avaliação Herity[19,20] e também os modelos híbridos apresentados por KEENE (1984), TAYLOR (2005), e WALLER e MICHALSKI (2005).

As etapas posteriores de análise e avaliação dos riscos permitem a sua quantificação, e consequentemente a hierarquização e estabelecimento de prioridades na adoção de medidas que possam tratar (diminuir) os riscos estudados, em função da relação custo/benefício. A magnitude de um risco é quantificada avaliando-se a sua **probabilidade de ocorrência** e os **impactos** causados na coleção. Estes últimos, por sua vez, podem ser descritos em termos da **perda de valor** que pode ocorrer para cada risco avaliado e da **fração da coleção** afetada. Existem metodologias diferentes para o cálculo das magnitudes dos riscos, que apesar de utilizarem escalas numéricas diferentes, levam à mesma interpretação dos resultados. Entre elas destacam-se a escala linear de WALLER (1994, 1996, 2002), BROKERHOF (2006) e as escalas exponenciais "ABC" de MICHALSKI (2004), incorporadas ao manual de gestão de riscos do CCI-ICCROM-ICN (ICCROM, 2009; MICHALSKI e PEDERSOLI JR., 2011). BARBOZA (2010) apresenta e compara essas escalas.

Os procedimentos e resultados apresentados neste trabalho são pertinentes às etapas de estabelecimento de contexto e tratamento de riscos descritas acima, uma vez que podem contribuir tanto para o diagnóstico do estado de conservação quanto para a avaliação da eficácia de soluções técnicas para problemas de gerenciamento ambiental das coleções. Ademais, se caracterizam como ferramentas diagnósticas conceituais, que trabalham com dados quantitativos mensuráveis, permitindo assim sua verificação, comparação e eventual reprodução. O trabalho de MARTENS (2012), publicado por MARTENS e SCHELLEN

[18] http://www.cci-icc.gc.ca/caringfor-prendresoindes/collections-eng.aspx (Acesso em 16/08/2012).

[19] http://www.herity.it/ (Acesso em 17/08/2012)

[20] http://www.mnarqueologia-ipmuseus.pt/documentos/Herity.pdf (Acesso em 17/08/2012)

(2013) e HUIJBREGTS et al. (2012) é um exemplo de integração de metodologias de gerenciamento de riscos e ferramentas de simulação computacional.

1.3- Gerenciamento e Conforto Ambiental no âmbito da Conservação Preventiva e da Gestão de Riscos

No âmbito do Gerenciamento Ambiental incluem-se todas as operações, etapas, serviços, equipamentos e instalações relacionados com o **monitoramento** e **controle ambiental**, compreendendo-se aí também os recursos arquitetônicos, materiais e componentes construtivos de que são dotados os edifícios que abrigam as coleções. Na visão de DARDES e DRUZIK (2000), a gestão ambiental abrange estratégias técnicas e organizacionais, envolvendo todo o corpo institucional responsável pela guarda das coleções, e não somente os aspectos relativos ao edifício.

> **O 'Gerenciamento Ambiental' agora se aplica a todos os riscos potenciais para as coleções,** sejam eles os parâmetros ambientais onipresentes, como a umidade relativa ou temperatura; fenômenos que são periódicos e raros (como desastres naturais); ou simplesmente acesso, manuseio e uso das coleções pelo pessoal encarregado. **O Gerenciamento Ambiental abrange estratégias técnicas e organizacionais - e envolve idealmente a instituição inteira.** (DARDES e DRUZIK, 2000, p. 5, grifos nossos).

O gerenciamento ambiental estratégico constitui uma postura mais abrangente do que o **monitoramento e controle** do microclima interno (LINDEN et al., 2013). Seu conceito ultrapassa a visão – hoje considerada obsoleta – de que o conservador / restaurador é o principal (senão o único) guardião de tesouros do passado (CASSAR apud DARDES e DRUZIK, 2000). Impõe-se uma **nova perspectiva**, que privilegia o **trabalho em equipe** e **redes de colaboração** entre profissionais e instituições. (PUTT e SLADE, 2004).

Um aspecto importante do gerenciamento ambiental é a definição de **critérios e padrões** (*set-points*) para o funcionamento dos sistemas de climatização. Existe aí um **conflito** em potencial entre as **necessidades das coleções, dos edifícios e dos usuários**, que são difíceis de conciliar simultaneamente, exceto em circunstâncias raras[21]. Os edifícios e seus sistemas apresentam-se como a dimensão física onde diversos problemas decorrentes desse conflito potencial se manifestam, impondo riscos variados à preservação das coleções.

[21] (BALOCCO, 2007a, p. 371; BERNARDI, 2008; BROWN e ROSE, 1996; COSTANZO et al., 2007; LA GENNUSA et al., 2008; MICHALSKI, 1998; ORESZCZYN et al., 1994; PADFIELD et al., 2007a, p. 33; TOLEDO, 2007, p. 5).

O tema da arquitetura bioclimática, suas implicações e interfaces entre o conforto ambiental humano e para coleções é discutido em profundidade no Apêndice B desta tese, cabendo destacar de lá o Quadro 7, em que MICHALSKI (1998) delineia comparativamente o conflito citado acima. O gerenciamento ambiental visando à preservação em longo prazo das coleções deve ser objeto de um **planejamento estratégico** (AULT, 2000; BROWN et al., 2002; IPI, 2005). De uma forma geral, os aspectos desse planejamento são contemplados no **diagnóstico de conservação**, e dizem respeito às três dimensões (materiais presentes nas coleções e sua vulnerabilidade / infraestrutura / instituição) discutidas acima.

Cabe destacar a relevância deste trabalho como contribuição para que futuramente sejam desenvolvidas normas técnicas brasileiras que tratem dos aspectos ambientais na preservação das coleções e bens culturais, adequadas à necessidade e realidade das nossas instituições, a exemplo de outras normativas existentes[22] e em discussão[23].

[22] (ALCÁNTARA, 2002; ASHRAE, 2009, cap. 21; BLADES, 2000; BROWN et al., 2002; BSI, 2011; COSTANZO et al., 2006; D'AGOSTINO, 2006; MICHALSKI, 2000; UNI, 1999, 2002).

[23] Vide as normas técnicas sobre conservação do patrimônio cultural atualmente em discussão no Comitê Europeu de Normatização: http://www.cen.eu/CEN/Sectors/TechnicalCommitteesWorkshops/CENTechnicalCommittees/Pages/WP.aspx?param=411453&title=CEN%2FTC+346 (Acesso em 23/02/2013).

CAPÍTULO 2

VENTILAÇÃO NATURAL OU FORÇADA COMO ESTRATÉGIA SUSTENTÁVEL DE GERENCIAMENTO AMBIENTAL

2.1- Sustentabilidade Ambiental em um contexto de mudanças climáticas globais

Durante o século XIX aprofundam-se descontinuidades entre História e Memória, cujos primórdios remontam ao século anterior ou até mesmo ao pensamento de Francis Bacon e Galileu no século XVI. Consolidam-se as premissas **modernas**, traduzidas na **valorização do tempo e fragmentação do espaço, crença no progresso, busca da inovação e da objetividade.** Essas rupturas trouxeram alterações profundas na escala da relação homem-natureza, mediada pelas inovações tecnológicas em velocidade crescente: eletricidade, mídia e comunicações (telégrafo, cinema, rádio, telefone, cinema, fotografia), transportes (automóvel, trem, navegação a vapor), medicina, etc. A mudança de inclinação nas linhas do progresso acarretou mudanças radicais na tessitura tempo-espaço válida até então, tanto na vivência cotidiana como na teorização acadêmica (p. ex. com a teoria da relatividade). A racionalidade positiva construída ao longo da Idade Moderna, sustentada na tecnocracia, estendeu a dessacralização e o desencantamento do mundo a todos os horizontes, terminando por romper, ao fim do século XX, as poucas fronteiras restantes nos conflitos éticos entre público e privado, sagrado e profano, natural e artificial, real e virtual. Os impactos dessas transformações nas práticas e no pensamento museológico são discutidos por HUYSSEN (1994) e LARA FILHO (2006). Para STANIFORTH (2013, p. xii) essa ruptura ocorre também com relação aos conhecimentos tradicionais a respeito da conservação dos objetos, que passam a ser produzidos industrialmente em série, ao mesmo tempo em que o acesso às matérias primas é ampliado pela revolução industrial.

Em termos arquitetônicos e urbanísticos, a vanguarda do final do século XIX e início do século XX é marcada pela Arquitetura do ferro e do vidro, materiais construtivos que expressam o triunfo da revolução industrial e que vão fundamentar as proposições da Arquitetura Moderna, impulsionadas pelas demandas de reconstrução resultantes das duas grandes guerras, pretensamente respondidas pelo desenvolvimento tecnológico e uso em grande escala do concreto armado. Antes que a Revolução Industrial tornasse o transporte universalmente acessível, os materiais e o trabalho eram obtidos localmente e os edifícios eram projetados para requerer o mínimo de manutenção (ENGLISH HERITAGE, 2008a). Ao

longo do século XX, os edifícios tornam-se cada vez mais dependentes de sistemas e máquinas para resolver demandas arquitetônicas básicas: o elevador se impõe como alternativa a rampas e escadas, a iluminação artificial à natural e os sistemas de climatização ao condicionamento climático passivo (HENRY, 2007a).

A arquitetura de museus construiu suas relações com a cultura de massa ao longo do séc. XX, caracterizando-se por aspectos que a preenchem de elementos espetaculares, carregados de virtualidade e simbolismo, construindo a concepção de que o museu é um "lugar de entretenimento", entre o parque de diversões e o *shopping center* (HUYSSEN, 1994, p. 36). EDWARDS (2011, p. 209) discorre sobre a pressão sobre as bibliotecas contemporâneas para seguirem o mesmo caminho. BAIRD (2001) discute a expressividade arquitetônica dos sistemas de climatização artificial, analisando casos de diversos museus e bibliotecas.

A crise do petróleo na década de 1970 colocou em cheque essa postura, demonstrando e questionando, entre outras coisas, os altos custos – inclusive ambientais e sociais – do consumo energético exagerado nos edifícios (CHUSID, 2010). O fim do século assiste o advento de um pensamento "ecológico" em vários campos do saber, que se traduz no surgimento de organizações como o Greenpeace, em 1971 e a proliferação de pesquisas científicas em torno da temática que passou a se chamar **aquecimento global.** Os eventos e publicações direcionados aos arquitetos refletem essa tendência com a publicação de livros que vieram a se tornar referências clássicas[24]. A OMM – Organização Meteorológica Mundial estabeleceu em 1988 o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.

A ascensão do pensamento ecológico culmina na década de 1990 com a Convenção da ONU sobre mudanças climáticas - ECO 92 - à qual se seguiu a negociação, ratificação e entrada em vigor do protocolo de Quioto de 1997 a 2005. Seguiram-se grandes conferências sobre mudanças climáticas em 2009 (COP15 – Copenhagen) e 2012 (RIO+20). Todo esse processo criou e difundiu um conceito que se tornou extremamente popular e que passou a permear praticamente todos os aspectos da vida contemporânea, cuja definição é difícil e ampla em função de sua abrangência: a **Sustentabilidade Ambiental (**CHUSID, 2010, p.44).

[24] (BANHAM, 1969; FATHY et al., 1986; KOENIGSBERGER et al., 1977; OLGYAY, 1963; WACHBERGER, 1984).

Começa-se a discutir epistemologicamente um novo campo: a Ciência da Sustentabilidade (KATES, 2000).

Na Arquitetura, a evolução desse conceito tem envolvido a revalorização e ressignificação contemporâneas da **Arquitetura Bioclimática**. Trata-se de uma **postura projetual** que visa aperfeiçoar as relações do edifício com o clima externo, por meio do uso de recursos como a forma e orientação, proteção solar, ventilação e inércia térmica, dentre outros[25]. Por vezes, encontramos o termo "bioclimática" substituído por "verde". Sinteticamente, entre os aspectos trabalhados no âmbito da sustentabilidade na Arquitetura e Urbanismo bioclimáticos podemos elencar: (i) Análise de ciclos de vida de materiais, processos e produtos (ISO, 2006); (ii) Usos / fluxos de recursos naturais; (iii) Emissões / resíduos / rejeitos; (iv) Avaliação de impactos ambientais, em níveis global, regional e local; (v) Equipamentos e sistemas prediais eficientes / automação predial; (vi) Legislação / regulamentação / normalização / certificação, destacando-se aí a proposição e aplicação de sistemas internacionais de ranqueamento da sustentabilidade e eficiência energética das edifícios e conjuntos (LUCAS, 2011; SILVA, 2007b).

Devido à grande relevância e afinidade com os assuntos pesquisados neste trabalho, no Apêndice B são apresentadas considerações mais detalhadas em torno desse tema, incluindo reflexões em torno do uso de ferramentas de projeto, como cartas e zoneamentos bioclimáticos. A próxima seção discute como os conceitos e práticas da Sustentabilidade Ambiental são rebatidos no campo da Ciência da Conservação, suscitando questões cada vez mais discutidas nos periódicos e fóruns técnico-científicos voltados à preservação do Patrimônio Cultural.

2.2- "Conservação Verde": um recorte peculiar no campo da Sustentabilidade Ambiental

O rebatimento de conceitos, preocupações e práticas da Ciência da Sustentabilidade sobre a Ciência da Conservação, particularmente sobre o Gerenciamento Ambiental, de vez em quando é chamado de "conservação verde" ou "preservação verde" - como transposição do termo "arquitetura verde" (LODI, 2010; SILVA, 2007b, p. 5) - ou também "preservação

[25] (ADAM, 2001; ALMUSAED, 2011, parte III; GIVONI, 1981; LAMBERTS, 2004; MACIEL, 2006; ROMERO, 2009; WILLIAMSON et al., 2003; YEANG, 1995, 2006).

sustentável”[26]. UNVER (2006) faz um rastreamento de como este conceito vem permeando as práticas de gestão do patrimônio desde a década de 1970. DE SILVA e HENDERSON (2011) discutem como ele se aplica especificamente à prática da conservação nos museus e CHUSID (2010) ao ensino dos profissionais envolvidos com a preservação do Patrimônio Cultural. Para ROEMICH e WEINTRAUB (2010) os conservadores desempenham um papel chave no cenário da Sustentabilidade.

Essa transposição se deve, de certa maneira, às previsões de impactos que as mudanças climáticas globais terão sobre o Patrimônio Cultural, particularmente sobre os sítios considerados paisagens culturais (CASSAR, 2005; ENGLISH HERITAGE, 2008a; FRANTZ, 2007; SABBIONI et al., 2006; UNESCO, 2008). Outra motivação para esse interesse pode estar relacionada com custos envolvidos na mitigação desses impactos (ASHLEY-SMITH, 2013; PODANY apud CARROON et al., 2011, p.18; HENRY, 2007b, p. 18).

Para STANIFORTH (2013, p. xii) trata-se em realidade de um retorno a práticas tradicionais, com menor demanda energética e de recursos naturais que permitiram a nossos ancestrais manterem preciosas coleções em boas condições, sem o aparato tecnológico atual.

Além das alterações dos padrões climáticos de temperatura, umidade e pluviosidade, que apresentarão flutuações mais extremas, outros efeitos adversos das mudanças climáticas são esperados, tanto em macro escala (aumento no nível do mar, efeitos sobre a poluição, aumento da frequência e intensidade de tempestades, enchentes, furacões e incêndios) como em microescala (aceleração de mecanismos de deterioração como ataques biológicos, erosão eólica, eflorescências salinas, corrosão, danos estruturais e físico-mecânicos) (HENRY, 2007b, p. 18).

A UNESCO publicou em 2008 um documento para orientar políticas dos estados-membros com vistas à **mitigação** e **adaptação** a esses impactos e estabelecer critérios para identificação dos bens culturais mais afetados (UNESCO, 2008). A realização de pesquisas nessa área têm se concentrado no Reino Unido e na Europa (CASSAR, 2011b, p. 10). Lá têm sido realizados levantamentos e mapeamentos da vulnerabilidade do Patrimônio Cultural às mudanças climáticas, incluindo equações preditivas de danos esperados para diversos

[26] (CARROON, 2010; HIMMELSTEIN e APPLEBAUM, 2007; LUBECK, 2010; PADFIELD et al., 2007a; POWTER e ROSS, 2005).

materiais[27]. Em 2011, a UNESCO estabeleceu uma cátedra em Gestão do Patrimônio e Sustentabilidade, no Instituto de Estudos Sociais e Europeus, da Universidade Corvinus em Budapeste[28]. Há vários cursos de pós-graduação mundo afora que incluem esta temática em seu currículo, entre eles o Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da UFMG[29].

Para CASSAR e YOUNG (2001), o conceito de sustentabilidade na conservação de coleções está ligado a estratégias de gerenciamento ambiental que minimizem a deterioração ao longo do tempo, sem reduzir o acesso do público, com o menor custo possível para o ambiente global. Já para Michael Henry,

> uma abordagem sustentável do Patrimônio Cultural é uma filosofia abrangente que deve permear nossos pensamentos e ações. O gerenciamento ambiental, um aspecto da implementação dessa filosofia, é singularmente importante por causa de suas consequências para a conservação do Patrimônio Cultural, consumo de energia e custos de investimento e manutenção30 (HENRY, 2007a, p. 8).

Henry destaca a ambiguidade com que lida a Preservação Sustentável. Se por um lado os museus procuram prolongar a existência material dos bens culturais, de outro vêm contribuindo para diminuí-la, ao utilizar sistemas ativos com alto consumo energético para o controle de condições ambientais (HENRY, 2007b, p.19).

Algumas instituições colocam questões sobre a sustentabilidade nos museus e recomendam adoção de princípios de sustentabilidade na gestão museológica[31]. O conceito transposto de sustentabilidade é entendido de maneira abrangente, compreendendo não só a

---

[27] (BRIMBLECOMBE, 2012; BRIMBLECOMBE e GROSSI, 2006; CASSAR, 2005, 2011b; DE LA FUENTE, 2011; LANKESTER e BRIMBLECOMB, 2012; SABBIONI et al., 2007, 2010; STRLIC et al., 2013; ZANIRATO, 2010;).

[28] http://www.unesco.org/en/university-twinning-and-networking/access-by-region/europe-and-north-america/hungary/unesco-chair-in-cultural-heritage-management-and-sustainability-940/(Acesso em 01/09/2012).

[29] https://www.ufmg.br/pos/ambienteconstruido/ (Acesso em 01/09/2012).

[30] A sustainable approach to cultural heritage is an overarching philosophy that should permeate our thoughts and actions. Environmental management, one aspect of the implementation of this philosophy, is singularly important because of its consequences for cultural heritage conservation, energy consumption, and capital and operating costs.

[31] (ENGLISH HERITAGE, 2008a; IFLA, 2008; MUSEUMS ASSOCIATION, 2008; MUSEUMS AUSTRALIA, 2003; POWTER e ROSS, 2005).

dimensão ambiental, mas igualmente as dimensões ***econômica, social e cultural***[32]**.** Entre os aspectos contemplados nesses princípios e recomendações podemos enumerar:

(i) Utilização de sistemas passivos / arquitetura bioclimática;

(ii) Gestão, abrangendo reciclagem, reuso e reaproveitamento de recursos naturais (p. ex. água), energia e resíduos, não somente ao nível dos edifícios mas também nas rotinas institucionais, incluídas aí as exposições, procedimentos e materiais de conservação curativa e restauração (FIDLER et al., 2011) ;

(iii) Maximização do uso de materiais locais (NORDSTROM, 2004);

(iv) Minimização do uso de sistemas ativos e planejamento estratégico dos custos de implantação e manutenção desses sistemas (MALDONADO, 2004; NEUHAUS, 2013; vide seção 2.4.3);

(v) Reciclagem, reuso e reaproveitamento de edifícios antigos, evitando demolições sempre que possível. Nesse aspecto as associações discutem inclusive a forma como os museus devem planejar o crescimento de suas coleções, repensando as necessidades de expansão com foco na qualidade ao invés de na quantidade[33]. STANIFORTH (2007; 2013, p. 388) chama essa estratégia de *slow conservation;*

(vi) Elaboração de planos de prevenção e resposta a desastres;

Diversos autores propõem questões e listas de verificação com tópicos e princípios de sustentabilidade, tanto em nível de proposta quanto para averiguar o nível de adesão dos museus com respeito aos aspectos acima[34]. EDWARDS (2011) mapeia a aplicação dos conceitos da Sustentabilidade Ambiental ao projeto contemporâneo de bibliotecas.

Em contraponto, Padfield (apud GCI, 2007, p. 57) entende que a adaptação de edifícios históricos para museus deveria ser banida e que novos museus deveriam ocupar somente novos edifícios, construídos especificamente para isso. O autor lembra que, às vezes,

[32] (AVRAMI, 2011; PEREIRA, 2007; POWTER e ROSS, 2005; STANIFORTH, 2011, THROSBY, 2013)

[33] (TOLEDO, 1999b, 2006, 2007; PARK, 1999; MUSEUMS ASSOCIATION, 2008; MERRIMAN, 2008; MOE, 2008; DE SILVA e HENDERSON, 2011; AVRAMI, 2011).

[34] (AVRAMI, 2011; CHUSID, 2010; DE SILVA e HENDERSON, 2011; ENGLISH HERITAGE, 2008a; HENRY, 2007b; MUSEUMS ASSOCIATION, 2008; PARK, 1998; STANIFORTH, 2011).

os museus contemporâneos conseguem ser bem piores que os edifícios históricos em termos de desempenho ambiental e imputa isso aos arquitetos[35]. Em relação ao consumo energético dos museus, Padfield reconhece que ele é excessivo, mas acredita que ele seja apenas "uma gota no oceano" (GCI, 2007, p. 21; PADFIELD et al., 2007a, p. 10). CHUSID (2010, p. 48) questiona até que ponto *retrofits* luminotécnicos em museus, visando economia de energia, são significativos em escala global. FIDLER et al. (2011) expressam uma opinião parecida, com relação aos prejuízos ambientais causados pelos materiais utilizados para restauração.

Observa-se que na literatura, a temática da Preservação Sustentável é associada à da Sustentabilidade na Arquitetura, campo de onde se transpõe o recorte temático escolhido para este trabalho. Para AVRAMI (2011), a preservação do patrimônio é, na realidade, parte de um sistema complexo de gerenciamento do ambiente construído. A próxima seção discorre sobre esse assunto, enfocando o papel dos edifícios como filtros para a proteção das coleções.

2.3- O edifício como um filtro protetor para as coleções

Os edifícios atuam como um filtro protetor sobre as coleções, operando como uma envolvente que interage com as demais, desde o entorno até a embalagem/suporte dos objetos, conforme o esquema mostrado na Figura 2 [36]. No planejamento do gerenciamento ambiental, é necessário considerar o grau de proteção possível em cada nível de controle.

No caso das coleções abrigadas em edifícios vernáculos ou construídos antes do advento dos sistemas ativos de climatização, em geral, o próprio edifício consegue moderar razoavelmente o clima interno de forma passiva, por meio de sistemas construtivos apropriados, e do efetivo controle manual de aberturas e outros componentes, exercido pelos usuários. Nesses casos, o gerenciamento ambiental deve atentar também para os problemas de preservação do edifício como bem cultural imóvel. Para muitas instituições, o próprio edifício é o item mais valioso a considerar em um diagnóstico de riscos. Outro aspecto particular dos edifícios para museus, arquivos e bibliotecas é que seus componentes são multifuncionais.

[35] (BAMBARU, 1989; VARLAMOFF, 2005).

[36] (CORREA, 2003, cap. 2; DARDES apud GCI, 2007; HENRY, 2007a, 2007b, p. 6; IPI, 2005, 2010; RIBEIRO, 2010; ROSE, 1994; VARLAMOFF, 2005)

Uma janela, por exemplo, além das funções de iluminar e ventilar, tem que atender também a requisitos de segurança e evitar a entrada de animais e insetos[37].

Embora a literatura específica sobre Arquitetura Bioclimática tenha se expandido em função do crescente interesse nos temas da Sustentabilidade Ambiental, são poucas e relativamente recentes as referências sobre aplicação de estratégias bioclimáticas à preservação do Patrimônio Cultural e ao projeto de museus, arquivos, bibliotecas e outros edifícios que abrigam coleções[38]. ANTUNES (2011) indica os princípios que devem ser observados no projeto de arquivos e VARLAMOFF (2005) no de bibliotecas. ARUP (2010) enumera e classifica diversas estratégias sustentáveis passíveis de adoção por museus, arquivos e bibliotecas. TOLEDO (1999b, 2006, 2007, 2010) estudou o papel da arquitetura na conservação preventiva das coleções, com foco nos edifícios construídos em regiões quente-úmidas, destacando o papel da ventilação natural. CARVALHO (1998) trata do mesmo tema, enfocando a preservação de acervos em papel. ZHAI e PREVITALI (2010) classificaram edifícios vernáculos com base na avaliação de suas características construtivas e simularam o consumo energético de um edifício padrão utilizando materiais de construção típicos de cada categoria.

Como estratégias para restabelecer o papel de filtro protetor dos edifícios, considerando os aspectos acima, pode-se elencar: (i) implantação e orientação (solar e em relação aos ventos dominantes); (ii) redução da carga térmica; (iii) ventilação natural ou forçada; (iv) adequação da posição, tamanho e tipo de aberturas; (v) uso de pilotis; (vi) áticos ventilados; (vii) dispositivos de sombreamento (para-sóis, galerias, varandas); (viii) isolamento e inércia térmicos; (ix) minimização do uso de iluminação artificial e sistemas ativos de climatização[39]. Essas estratégias compõem grande parte d o repertório da Arquitetura Bioclimática de museus, arquivos, bibliotecas e outros edifícios que abrigam coleções, tratado com mais detalhes no **Apêndice B** deste trabalho.

---

[37] (CHUSID, 2010; HENRY, 2007a; PARK, 1998; STANIFORTH, 2007; THARAZI, 2011, 2012; TOLEDO, 2004, 2007; ZHAI e PREVTALI, 2010).

[38] (EDWARDS, 2011; FRANTZ, 2007; RIBEIRO, 2010; SANDS, 2004; SCHAPER e SCHERER, 2012; TOMBAZIS et al., 2004).

[39] (BERNARDI, 2008, seção 3.7; EDWARDS, 2011; FRANTZ, 2007; HENRY, 2007b; PADFIELD e LARSEN, 2004; PARK, 1998; RIBEIRO, 2010; TOLEDO, 1999b, 2006, 2007).

Um edifício bem concebido não só abriga o seu conteúdo da chuva, vento e radiação solar, mas também reduz internamente a amplitude das flutuações climáticas externas. Um prédio projetado especificamente para um gerenciamento ambiental passivo irá mais longe: com um bom planejamento e escolha de materiais apropriados e, especialmente, adequação do sistema de ventilação, dependendo da região climática, pode-se conseguir a desumidificação e resfriamento do ar interno (recursos adequados aos climas quente-úmidos) ou o aquecimento passivo (recurso adequado aos climas frios). Um edifício mal projetado, por sua vez, vai sofrer mais internamente com a amplitude das flutuações climáticas externas, às vezes chegando a atingir temperaturas máximas internas maiores que as externas. Para compreender como um edifício atua como um filtro climático é necessário compreender e considerar as diversas variáveis mostradas nas figuras 3 e 4.

Os componentes da carga térmica determinantes do microclima interno podem ser resumidos em seis fatores: (i) insolação; (ii) ocupação humana; (iii) ganhos térmicos de iluminação e equipamentos; (iv) transmissão de calor através das envoltórias; (v) infiltração; (vi) ventilação[40].

Embora as diversas propriedades físico-químicas dos materiais e componentes construtivos devam ser consideradas e influenciem nas simulações computacionais de fluidodinâmica investigadas neste trabalho, uma explicação mais detalhada sobre elas extrapolaria os objetivos deste texto. O mesmo vale para as variáveis específicas que interferem no conforto ambiental humano. Para uma visão completa sobre as primeiras, indica-se a consulta ao manual de fundamentos da ASHRAE (2009) e a documentação do programa *Energy Plus ©,* em especial o manual de referência de parâmetros de entrada e saída (EUA, 2012). Sobre as variáveis envolvidas no modelamento físico matemático do conforto humano, consulte-se ASHRAE (2009, cap. 9), GONÇALVES (2000) e MICHALSKI (1998), que trata da sua relação com o gerenciamento ambiental em edifícios históricos.

[40] (AULT, 2000; BERNARDI, 2008; CARVALHO, 1998, p. 16; CONRAD, 1999; CONRAD apud GCI, 2007, p.59; IPI, 2005, p. 29; PAVLOGEORGATOS, 2003).

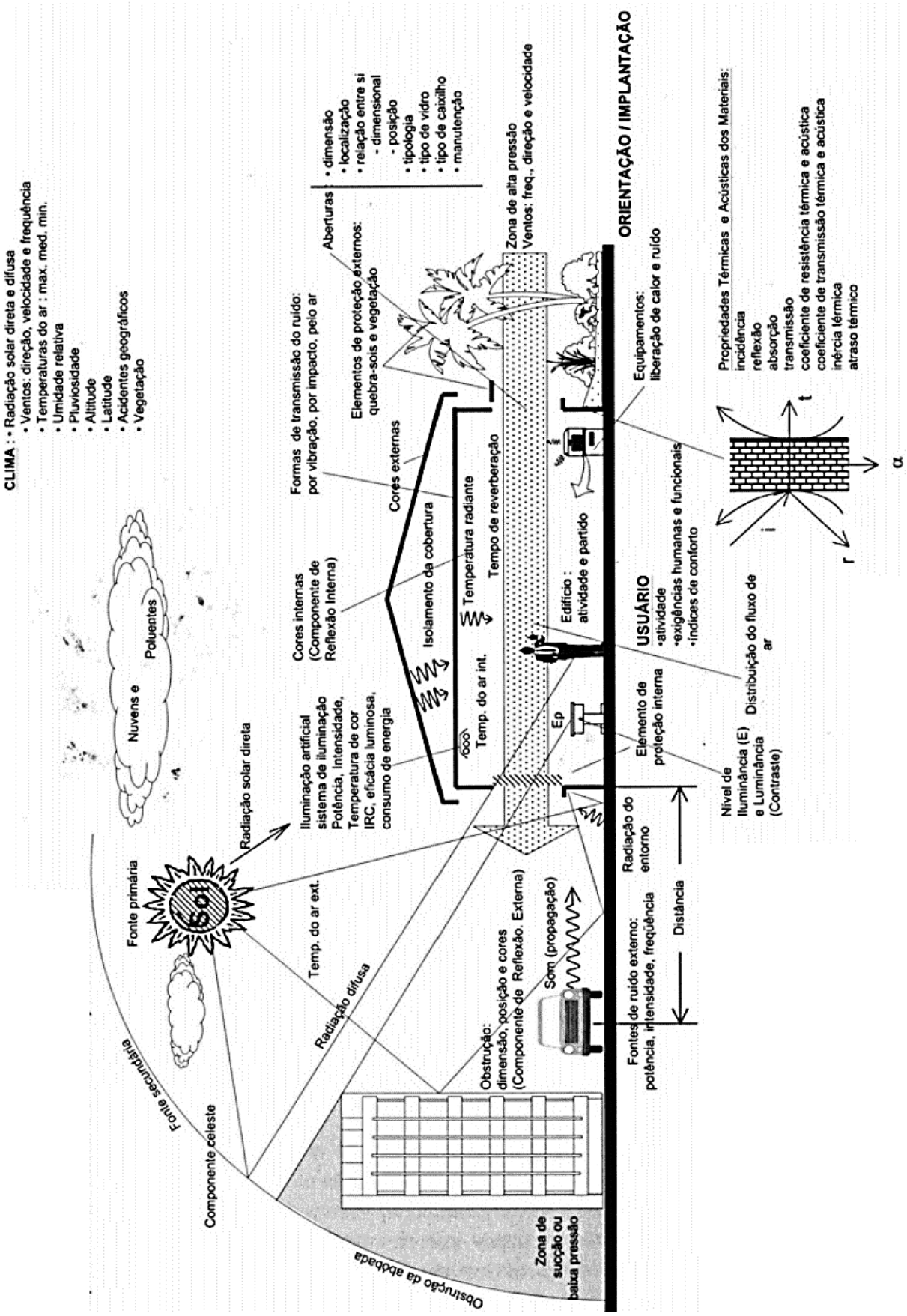


Figura 3 – Variáveis do conforto ambiental (térmico, luminoso e acústico), segundo VIANNA (2004). Para o projeto bioclimático dos edifícios são relevantes aquelas que influenciam no desempenho termoenergético.

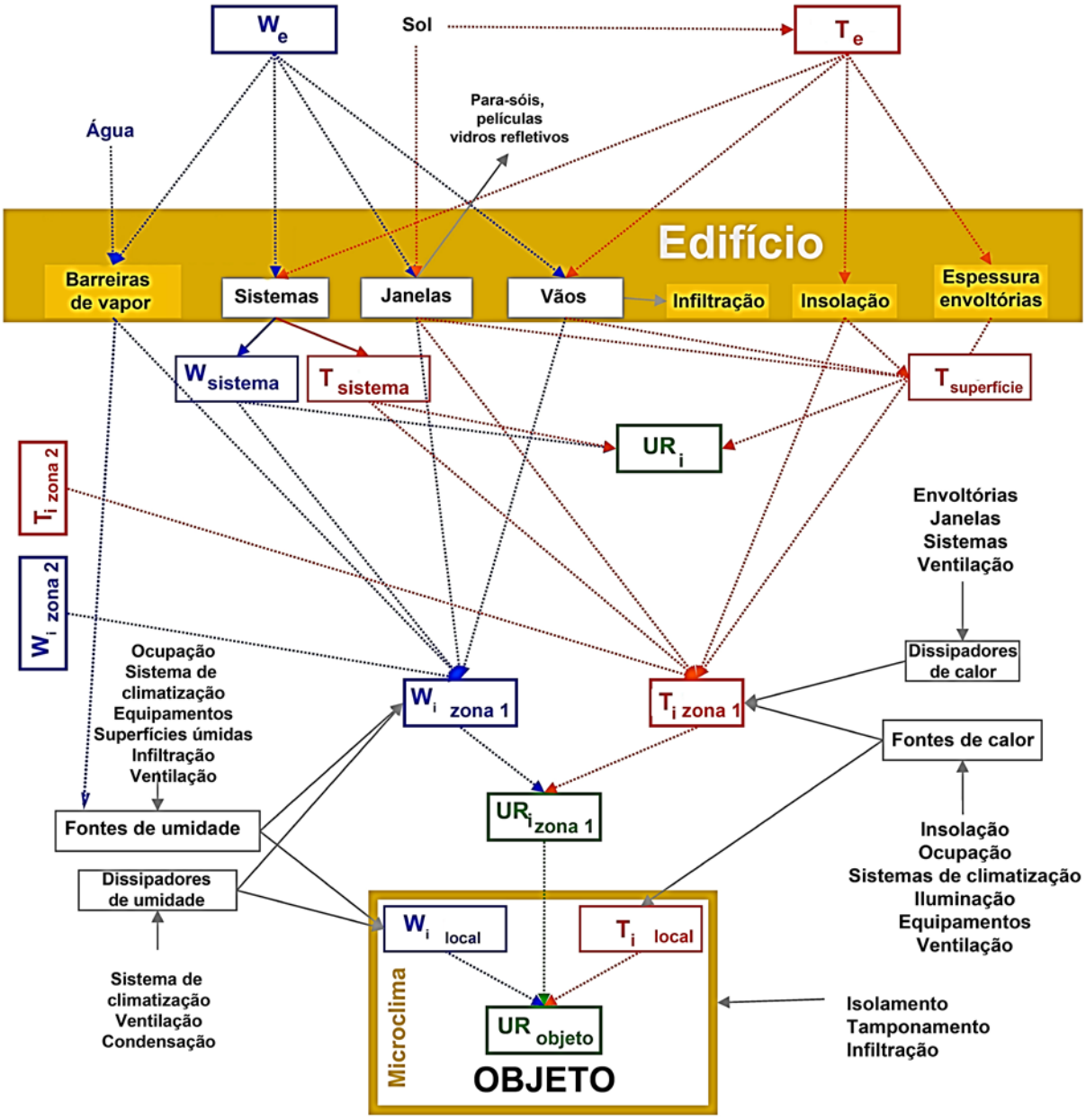


Figura 4 – Relação entre o desempenho termoenergético do edifício e o microclima ao nível do objeto. (Adaptado do material preparado por Bart Ankersmith para o curso *Managing Indoor Climate Risks*, promovido pela Agência Holandesa de Patrimônio Cultural em Olinda, março de 2011)

Para desempenhar o seu papel de envoltória protetora das coleções, os edifícios contam também com diversos sistemas de climatização, abordados a seguir.

2.4- Sistemas de climatização passivos, ativos e híbridos e seu papel na conservação de coleções

O controle dos microclimas internos em um edifício pode ser conseguido por meio de sistemas, controles, estratégias e recursos arquitetônicos **passivos**, **ativos –** ou mecânicos – e **híbridos**[41]**.** Os primeiros são também chamados de naturais ou bioclimáticos, e envolvem técnicas que dispensam ou minimizam o consumo de energia elétrica e/ou de outros recursos 0naturais (vide Apêndice B). Já os ativos dependem de um consumo energético em equipamentos e sistemas prediais, como por exemplo, sistemas de condicionamento de ar para refrigeração ou aquecimento. CASSAR e YOUNG (2000) comparam os sistemas ativos e passivos em termos de suas vantagens e desvantagens para o gerenciamento ambiental de coleções. AWBI (2008, cap. 7) compara os sistemas passivos e híbridos em termos de consumo energético. STANIFORTH (2013) compila textos anteriores a 1950 que tratam da teoria e prática da ventilação (MCCABE, 2013; REID, 2013).

O conjunto de soluções arquitetônicas adotadas em um edifício pode englobar uma mistura desses recursos, ora com predominância de um, ora de outro, caracterizando os sistemas híbridos. Nesse caso, a eficiência energética do edifício é determinada pelo funcionamento em conjunto dos sistemas sendo que, normalmente, o objetivo do uso dos sistemas passivos é diminuir o consumo de energia por parte dos sistemas ativos. Os sistemas híbridos são os que apresentam a melhor relação custo-benefício (MICHALSKI apud GCI, 2007, p.72).

A implementação de estratégias passivas, como as que são apresentadas no Apêndice B deste trabalho é relativamente simples, em comparação com os requisitos dos sistemas ativos. O funcionamento adequado dos sistemas ativos depende de **protocolos de controle** ou **regimes de operação** específicos, que sejam capazes de responder às mudanças climáticas externas (HENRY, 2007b, p. 13). Na tradição técnica da engenharia brasileira esse tipo de protocolo é adotado somente em sistemas de médio e grande porte.

Por outro lado, para que os sistemas passivos funcionem, geralmente eles contam com um efetivo controle manual por parte dos usuários, o que nem sempre acontece. Como exemplo, pode-se citar a operação manual de para-sóis móveis, que costumam emperrar por

[41] (AWBI, 2008, cap. 7; KLEIVEN, 2003, P. 46; TOLEDO, 2010, p. 74, UNI, 2010;YANG, 2004, p. 9).

falta de uso. Essa ação dos usuários pode se dar de maneira **reativa** (p. ex. fechar a janela se começa a chover), mas pode se dar também de uma forma **planejada,** antecipando-se a eventos externos (p. ex., abrir as janelas para ventilar em períodos que favorecem a ventilação natural) (HENRY, 2007b, p. 13). Em um nível básico, a **hibridação** de sistemas pode dar-se por meio do uso de sistemas **portáteis** de controle de umidade (umidificadores e desumidificadores) e em um nível mais sofisticado, pode envolver sistemas de **automação predial.** SALA e GALLO (2004) discorrem sobre o estado da arte dos sistemas de automação predial para gerenciamento ambiental e energético em museus.

O controle do microclima ao nível do mobiliário é relativamente mais simples do que nos níveis mais externos da sala e do edifício. Dentro de vitrines ou outros móveis, suportes e embalagens de exposição e/ou guarda também é possível utilizar sistemas passivos, ativos e híbridos para o gerenciamento ambiental. Normalmente os sistemas passivos envolvem o uso de materiais tampão como a sílica-gel. Mas é possível se pensar também em sistemas ativos de escala reduzida, que condicionam uma vitrine ou até mesmo uma moldura, individualmente[42].

A adaptação de edifícios históricos para museus envolve uma problemática peculiar e às vezes implica na instalação de sistemas de ar condicionado[43]. A arquitetura vernácula lança mão de recursos arquitetônicos diversos (p. ex. varandas e áticos ventilados) para garantir a adaptação ao clima local. Frequentemente, as adaptações necessárias para instalação dos novos sistemas impõe a eliminação de estratégias arquitetônicas de ventilação natural, para aumentar a estanqueidade, não só do edifício como um todo, mas também ao nível dos componentes, por exemplo, nas barreiras de vapor das envoltórias (ENGLISH HERITAGE, 2008b; TOLEDO, 2007). Hoje em dia, as estratégias arquitetônicas que garantiam aos edifícios bom desempenho e durabilidade não são mais de uso geral[44]. Porém, a partir do momento em que o edifício é selado, diminuem-se as oportunidades de utilizar passivamente os períodos em que o clima externo é favorável (HENRY, 2007b, p. 56). Nestas

[42] (BERNARDI, 2008, seção 3.11; CAMUFFO, 1998; CAMUFFO et al., 2000; CASSAR, 1985; DINIZ e SOUZA, 2002; DINIZ, 2006; LONY et al., 2010; MICHALSKI, 1985; PADFIELD, 1966, 1985; RAMER, 1984; ROTHE e METRO, 1985; SHINER, 2007; SEASE, 1991; STOLOW, 1984; TOLEDO et al., 2007; VAN SHIJNDEL et al., 2008; WEINTRAUB, 2002; YU et al., 2001)

[43] (CARROON, 2006; GONÇALVES, 1992; HENRY, 2007a; PADFIELD, 1987; PARK, 1999; TOLEDO, 1999b, 2006, 2007).

[44] (HENRY, 2007a, p.8; MARTENS, 2012, p. 29; PARK, 1999, p. 83; TOLEDO, 1999b, 2006, 2007).

circunstâncias, é frequente a ocorrência de ataques biológicos por fungos e bactérias, que proliferam particularmente nos componentes de umidificação do sistema (VALENTIN, 2007, p.1). Isso aconteceu, por exemplo, com o sistema híbrido instalado no Museu Paraense Emílio Goeldi, após uma pane nos equipamentos (vide seção 2.4.2).

Quadro 1 – Categorias de potencial de controle climático em função da qualidade das envoltórias. Adaptado de (ASHRAE, 2007, p. 21.14; CONRAD, 1999; IPI, 2005, 2010). A última coluna se refere às classes de controle mostradas no Quadro 2.

Categoria de controle	**Classe**	**Sistema construtivo típico**	**Tipologia edilícia típica**	**Uso típico**	**Sistema de climatização usado**	**Limites práticos do controle climático**	**Classe de controle possível**
Edifícios sem controle climático	I	Estrutura aberta	Galpões abertos dos lados, serrarias	Sem ocupação, exposições permanentes	Nenhum	N/A	D (em climas favoráveis)
	II	Estrutura fechada	Galpões fechados com estrutura e envoltórias leves (pequena inércia térmica) silos, celeiros	Sem ocupação, usados em eventos especiais	Exaustão ou insuflação forçada, janelas abertas, ático ventilado, sem aquecimento	Ventilação	C (em climas favoráveis) D (exceto em climas úmidos
Edifícios com controle climático parcial	III	Edifícios fechados com envoltórias leves (pequena inércia térmica) em madeira ou alvenaria leve Alvenaria não isolada termicamente, sem barreiras de vapor ou materiais isolantes, painéis de vedação com estrutura autônoma, janelas simples	Galpões fechados com estrutura e envoltórias leves (pequena inércia térmica)	Sem ocupação, Uso no verão Fechado no inverno	Controle climático limitado, exaustão no verão, aquecimento umidostático no inverno, janelas simples, térmicos, sem controle de umidade	Aquecimento e ventilação	C (em climas favoráveis) D (exceto em climas úmidos
	IV	Edifícios com envoltórias pesadas, alvenarias revestidas, janelas de boa qualidade Baixa infiltração e isolamento térmico modesto. Ático ventilado e isolado termicamente.	Edifícios históricos típicos: Casas, Igrejas, Câmaras de reunião, edifícios de escritórios	Ocupação limitada. Pessoas em salas separadas, lojas, visitação curta. Sem uso no inverno	Sistema dutado de aquecimento e resfriamento, com controle de umidade limitado (umidificação e desumidificação) Sistema de reaquecimento	Climatização básica	B (em climas favoráveis) C (climas com invernos brandos) D
Edifícios com controle climático	V	Edifícios novos com estrutura metálica, envoltórias isoladas termicamente e janelas duplas. Bem isolados termicamente e com barreiras de vapor.	**Museus, bibliotecas, galerias, exposições, reservas técnicas**	Grupos de visitantes, ocupação normal de museus.	Sistemas dutados, com controles automatizados de resfriamento e aquecimento umidificação e desumidificação.	Controle climático com variações sazonais	AA (climas com invernos brandos) A (A1, A2) B
	VI	"Caixa dentro da caixa" – Construção com paredes duplas, grande estanqueidade.	Reservas técnicas e cofres construídos especificamente para controle climático preciso	Sem ocupação, acesso controlado	Construídos para atender a requisitos ambientais específicos com controles climáticos precisos, com pequena amplitude de flutuação de temperatura e umidade relativa	Ambientes especiais com clima constante	AA A (A1, A2)

CONRAD (1999) considera que um ambiente realista para a preservação só pode ser conseguido mediante um processo lógico de análise para especificação do melhor sistema a ser adotado. O Quadro 1 mostra o sistema de classificação elaborado por esse autor, adotado pela ASHRAE (2007, p. 21.14) e cujas definições refletem a tradição construtiva norte-americana de vedar os edifícios, em favor dos sistemas de climatização ativos. Não obstante, ele pode ser interessante como um guia para a especificação desse tipo de sistemas (HENRY, 2008, p. 16). MARTENS apresenta outro sistema de classificação que considera o grau de alterações no edifício e utiliza também uma matriz cruzando o nível de controle climático com a qualidade das envoltórias (MARTENS, 2012, p. 32).

O uso de um sistema ativo não é garantia absoluta de boas condições de conservação para as coleções. Os microclimas internos estão fortemente relacionados às propriedades físicas das envoltórias (coberturas, paredes, janelas, portas e pisos) do edifício. Eles não são uniformes, seja em função dos materiais utilizados nas envoltórias, seja em função de fatores como conteúdo de umidade nos materiais, orientação solar e aos ventos e ocupação (BAKER, 2008, 2011; CARDINALE et al., 2011; RYE, 2010). Cada sala e/ou mobiliário pode conformar um microclima diferente e para garantir os objetivos de conservação podem ser necessárias medidas nesses níveis ou mesmo no nível da embalagem e do objeto (vide Figura 2) (BATTERHAM e WIGNELL, 2008; MARTENS, 2012, p. 19; TOLEDO, 2010, p. 74).

O conceito de **análise do ciclo de vida,** originalmente desenvolvido para avaliação dos impactos ambientais de produtos vem contribuindo, desde a década de 1990, para o desenvolvimento de **metodologias de avaliação do desempenho ambiental dos edifícios**. Tais metodologias em geral constituem **sistemas de ranqueamento e certificação de sustentabilidade,** e buscam analisar o nível de eficiência dos edifícios em relação ao consumo de recursos naturais e ao conforto ambiental, bem como à integração e eficiência de sistemas ativos, como os descritos no Quadro 1.

A guisa de contextualização, pode-se citar o sistema LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), adotado desde 1994 pelo USGBC (*US Green Building Council*)[45]. FRANTZ (2007) e LODI (2010) investigaram a aplicação deste sistema a edifícios de museus. LUCAS (2011), LAMBERTS et al. (2008), SATTLER (2009) e SILVA (2007b)

[45] http://www.usgbc.org/DisplayPage.aspx?CategoryID=19 (Acesso em 03/09/2012).

estudaram os principais sistemas de ranqueamento de sustentabilidade em nível internacional e comentam sobre o estado da arte da sua aplicação no Brasil. JACKSON (2010) analisa a aplicabilidade dessas ferramentas à preservação do Patrimônio Cultural, levando em conta os critérios considerados por elas: adequação ao sítio, consumo energético, uso de recursos (água e materiais), qualidade do ar interior, entre outros. EDWARDS (2011) analisa o impacto ambiental dos materiais utilizados na arquitetura contemporânea de bibliotecas.

A utilização de sistemas ativos de climatização, ainda que bem pontuados em sistemas de ranqueamento de sustentabilidade não deve ser considerada uma solução *a priori* para os problemas de gerenciamento ambiental de coleções[46]. É curioso ver que, na literatura, encontramos referências à vedação dos edifícios e aos sistemas de climatização como se fossem parte integrante, *sine qua non,* de edifícios para abrigar coleções[47]. Sob esse prisma, procedimentos de vedação de frestas para evitar infiltrações do ar externo podem até ser vistos como uma abordagem prática de controle climático passivo (BAKER e LUGANO, 1999).

Diretrizes para um gerenciamento ambiental exitoso dos sistemas de climatização (adaptadas de BORDAS e LEAMAN apud HENRY, 2007b): (i) Quanto menos o edifício exigir dos sistemas, melhor. Ao se pensar um sistema de climatização uma abordagem minimalista deve ser considerada, e até mesmo "não fazer nada" pode ser uma opção a ser considerada (KERSCHNER, 2008; NEUHAUS, 2013, p. 117; PADFIELD et al., 2007a, p.13; STANIFORTH, 2007, p. 5); (ii) Passivo é melhor que ativo. Esteja certo de que as coisas que foram projetadas para operar nos bastidores operem adequadamente; (iii) Simples é melhor que complexo, mas quando a complexidade é necessária, tente compacta-la, isolá-la e provê-la de interfaces simples; (iv) Equipamentos que necessitam reparos ou cuidados especiais devem ser utilizados, preferencialmente, por quem tem tempo de se preocupar com eles; (v) Preveja situações de risco e como as pessoas lidarão com elas; (vi) Preveja falhas e como evita-las, o sistema deve fornecer indicadores monitoráveis que ajudem a identificar e saber como lidar com problemas antes que eles ocorram (filosofia do uso das métricas de preservação utilizadas neste trabalho - vide Apêndice A).

---

[46] (NEUHAUS, 2013; ORESZCZYN et al., 1994, KING e PEARSON, 2001, p. 45; STANIFORTH, 2007, p. 5)

[47] (EDWARDS, 2011, p. 197; FRANTZ, 2004, p. 43; IPI, 2005, p. 23; THOMSON apud ORESZCZYN et al., 1994, p. 1; PADFIELD, 2007b, p. 11)

2.4.1- Sistemas passivos ou híbridos de ventilação

A ventilação natural dos edifícios é tradicionalmente vista como um recurso arquitetônico passivo para propiciar condições de conforto ambiental e também de eficiência energética, na medida em que pode reduzir o consumo de energia em relação à utilização de sistemas de condicionamento ativos.

O movimento do ar no entorno e dentro das edificações deve-se à combinação de forças convectivas com zonas de pressão diferenciada. O princípio básico para o entendimento desse movimento é que ele se dá de uma zona de alta pressão para outra de baixa pressão. A ventilação natural depende de fatores fixos como: forma e características construtivas do edifício; forma e posição dos edifícios e espaços abertos vizinhos; localização e orientação do edifício em relação à direção dominante dos ventos; posição, tamanho e tipo das aberturas. Ela é influenciada também por fatores variáveis, como: direção, velocidade e frequência do vento; diferença de temperaturas interiores e exteriores (vide Apêndice C).

Nos edifícios que abrigam coleções expostas à ventilação natural, o regime e características desta podem ser determinantes de riscos de deterioração do acervo, como por exemplo: grandes flutuações ambientais, contaminantes atmosféricos e **infestações biológicas por insetos.** São questões que devem ser cuidadosamente avaliadas ao se pensar na ventilação natural como recurso para o gerenciamento ambiental das coleções. No caso dos sistemas ativos, podem ser utilizados filtros. O uso de vitrines também pode fornecer uma camada a mais de proteção.

Muitos centros urbanos nos países recém-industrializados têm sérios problemas de poluição, inclusive os hipercentros das grandes cidades brasileiras. Encontrar um método eficiente e de baixo custo para remoção de poluentes do ar é um desafio para os museus. Contudo, considerando a realidade da grande maioria dos museus brasileiros, a preocupação com a filtragem do ar que entra no edifício chega até mesmo a ser utópica, diante de outros fatores de risco, ligados à falta de infraestrutura nos edifícios, que têm magnitude muito maior. Ao comentar sobre a adequação de rotinas de monitoramento ambiental, PADFIELD (2007a, p. 159) afirma que não se medem taxas de renovação de ar em museus, porque são difíceis de medir.

Em função do isolamento e inércia térmica das envoltórias (sistema cobertura, paredes, esquadrias e pisos) o ambiente interno dos edifícios ventilados naturalmente tende a

acompanhar mais de perto as flutuações ambientais externas, o que pode ser prejudicial para materiais sensíveis a essas flutuações. A natureza estocástica do vento e outras incertezas nos processos físicos envolvidos (por exemplo, as trocas convectivas junto às superfícies) também dificultam um controle ambiental preciso (ALLARD et al., 1998, p. 6; DEFRAEYE e CARMELIET, 2010).

A desconsideração de parâmetros de conservação preventiva pode levar a uma aplicação incorreta de conceitos de arquitetura bioclimática aos edifícios de museus, arquivos e bibliotecas, como por exemplo no projeto descrito por ANDRADE (2010).

Na literatura sobre uso de ventilação na arquitetura bioclimática é comum a recomendação ou ilustrações de que barreiras e desvios externos sejam feitos, aproveitando a **vegetação** do paisagismo, como auxiliar no direcionamento dos ventos e como recurso de resfriamento evaporativo[48]. Essa estratégia também é citada na literatura de conservação, como exemplo de tecnologia apropriada à conservação de coleções (AGRAWAL, 2013, p. 48). Porém, nos museus, arquivos e bibliotecas, e outros edifícios que abrigam coleções, deve-se evitar a presença de vegetação próxima das aberturas de ventilação, principalmente de espécies frutíferas, por aumentarem os riscos de ataque biológico.

Esse risco pode ser diminuído com o **uso de telas**, que por sua vez aumentam a perda de carga nas aberturas, diminuindo o fluxo de ar (ALLARD et al., 1998, p. 176, CÓSTOLA, 2006, p. 151). Essa perda é função da direção e velocidade do vento (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2006, p. 70). Pelo mesmo motivo, o uso de **tetos verdes** ou **tetos-jardim,** frequente em projetos de arquitetura bioclimática, deve ser especificado com muito cuidado no projeto de museus, arquivos e bibliotecas. Apesar do ganho em termos de isolamento térmico, é necessário atentar para o risco adicional de infiltrações (ALMUSAED, 2011, cap. 15; FRANTZ, 2007, p. 60). Como exemplos construídos de edifícios com esse recurso podem ser citados o Canadian War Museum em Ottawa; biblioteca da Universidade de Tecnologia de Delft, Holanda; biblioteca pública Ballard em Seattle, EUA; Museu Oakland da Califórnia, EUA; L'Historial de la Vendée, em Lucs-sur-Boloigne, França; Apêndice Ao Horniman Museum, Londres.

[48] (ALMUSAED, 2011; BROWN e DEKAY, 2004; KWOK e GRONDZIK, 2007; ROAF, 2006; ROMERO, 2000, 2001; VAN LENGEN, 2004; WATSON e LABS, 1993)

Mais detalhes sobre os princípios que regem a ventilação natural das edificações que abrigam coleções, em função dos condicionantes do entorno e do próprio edifício, bem como exemplos construídos são apresentados no **Apêndice C** deste trabalho.

A aplicabilidade da ventilação natural é habitualmente associada a uma redução nos riscos relacionados a ataques biológicos, como mofo, fungos e bactérias, especialmente em climas úmidos, que favorecem a sua proliferação. STANIFORTH (2007, p. 6) relata casos de museus em regiões quente-úmidas, onde uma excelente adaptação do edifício ao clima minimiza este tipo de risco por meio do uso da ventilação. O risco de deterioração de uma coleção devido a uma infestação biológica é bem maior que os riscos oferecidos pelo envelhecimento químico ou danos físico-mecânicos devidos a flutuações ambientais[49]. A minimização desse segundo tipo de risco está relacionada principalmente com as condições de umidade relativa do ar. Portanto, quando pensamos em possíveis aplicações de ventilação no gerenciamento ambiental das coleções, o tipo de ventilação a ser adotada vai variar em função da tipologia climática, sendo a umidade do ar o parâmetro condicionante.

Segundo BITTENCOURT e CÂNDIDO (2006, p. 13), "a alusão de que níveis acima de 80% de umidade relativa causariam o desenvolvimento de bolor dentro das construções não parece ser aplicável em construções bem ventiladas, como as encontradas na maioria das regiões quentes e úmidas. Nestas regiões, o desenvolvimento do bolor não é normalmente encontrado em construções arejadas, embora ocorra com frequência em locais abafados". Tal afirmação, conquanto se refira ao conforto ambiental humano, está em acordo com os aspectos comentados na seção A.5 do Apêndice A, sobre a influência da taxa de ventilação na proliferação de microorganismos.

Para que a função de desumidificação seja cumprida pela ventilação natural, é essencial que a razão de umidade do ar externo que está sendo admitido seja menor que a do ar interno ao qual está se misturando e empurrando. O processo envolve ainda a difusão de umidade no interior e as trocas térmicas úmidas (evaporação e condensação) na superfície das envoltórias internas (BERNARDI, 2008, seção 4.1; CORREA, 2003; KORJENIC e BEDNAR, 2012; PADFIELD, 2005). Nos sistemas ativos e híbridos é possível utilizar o **aquecimento umidostático**, discutido na próxima seção.

[49] (MAEKAWA e TOLEDO, 2001b, p. 1; 2010, p. 1; MICHALSKI apud GCI, 2007, p. 27; STANIFORTH, 2011, p. 13; TOLEDO, 2010).

2.4.2- Estado da arte da pesquisa sobre sistemas passivos e híbridos de ventilação aplicados ao gerenciamento ambiental de coleções

O GCI – Instituto Getty de Conservação desenvolve, desde 1997, uma linha de pesquisa sobre controles climáticos alternativos para edifícios históricos[50], em regiões tropicais, enfocando a aplicabilidade de sistemas passivos e híbridos de ventilação e de estratégias de aquecimento com desumidificação (aquecimento umidostático) à conservação de coleções e sua relação com o conforto ambiental dos usuários (MAEKAWA, 2007a, 2007b; TOLEDO, 2004).

O projeto, coordenado por Shin Maekawa, contou com a colaboração das brasileiras Franciza Toledo e Cláudia Carvalho (vide na lista de referências citadas os trabalhos destes autores). Esse projeto incluía, em suas metas, a investigação de sistemas de controle climático simples em termos tecnológicos, com baixo custo de implantação e manutenção, mas que pudessem prover ambientes de conservação estáveis em climas tropicais, mediante intervenções mínimas nos edifícios. Foram realizadas investigações em diversos museus, entre eles a Fundação Casa de Rui Barbosa, no Rio de Janeiro e o Museu Paraense Emilio Goeldi, em Belém (MAEKAWA, 2007a, 2007b). Em abril de 2007, o GCI organizou uma mesa redonda de especialistas (arquitetos, engenheiros, conservadores e cientistas da conservação) sobre estratégias sustentáveis de gerenciamento climático, visando o intercâmbio de conhecimentos, identificação de fronteiras na pesquisa específica da área, educação e treinamento[51].

Entre as estratégias de gerenciamento ambiental estudadas pelo grupo destaca-se o uso de sistemas de **aquecimento umidostático** ou **aquecimento para conservação** (*conservation heating*) (SMITH, 1999; STANIFORTH e HAYES, 1987) [52].

O aquecimento umidostático é uma estratégia de gerenciamento ambiental baseada no controle da temperatura para alteração da umidade relativa. O nome vem da idéia de usar um umidostato no lugar de um termostato para o controle ambiental (CONRAD, 2011;

---

[50] http://www.getty.edu/conservation/science/climate/ (Acesso em 22/08/2011)

[51] http://www.getty.edu/conservation/our_projects/science/climate/climate_experts_roundtable.html (Acesso em 02/09/2012).

[52] TOLEDO (2010, p. 74) traduz o termo como **aquecimento *de* conservação**.

STANIFORTH, 2007, p. 7). O método se baseia nas relações psicrométricas entre a temperatura e a umidade relativa do ar: a um aumento na temperatura corresponde uma diminuição da umidade relativa[53]. Com o auxílio de uma carta psicrométrica, pode-se facilmente calcular, a partir de uma dada condição de *T* e *UR*, o quanto o ar necessita ser aquecido ou resfriado para atingir uma determinada umidade relativa.

O uso dessa estratégia no gerenciamento ambiental de coleções impõe algumas restrições: (i) Em climas frios, necessita um ambiente livre de infiltrações de umidade, sob pena de causar danos ao edifício, devido a ciclos de congelamento nas paredes; (ii) Prejudica o conforto ambiental humano (temperaturas muito altas no verão e muito baixas no inverno); (iii) Não permite um controle climático preciso, necessitando de recalibração frequente; (iv) Alto custo de implantação e manutenção, devido à necessidade de sistema de automação funcionando continuamente[54].

Geralmente essa técnica se aplica a regiões de inverno rigoroso[55]. Em climas frios, a quantidade de energia necessária para fins de preservação é cerca de um terço da energia necessária para manter o conforto ambiental humano (BLADES e RICE, 2010). A aplicabilidade da técnica foi testada para o clima da Holanda, por meio de simulação computacional, concluindo-se que ela é ideal para edifícios que permanecem fechados no inverno e não abrigam coleções muito vulneráveis[56]. O aquecimento pode ser conseguido mediante a inserção de tubulação com água quente nas envoltórias, alternativa que traz riscos de vazamentos[57]. Um sistema desse tipo foi empregado no Museu de Arte de Stuttgart (BAUER, 2010, p.175). Pode-se utilizar também um sistema radiante/convectivo passivo, (Figura 5), porém problemas com estratificação higrotérmica e deposição de particulados podem ocorrer em edifícios com pé direito alto, como igrejas e palácios, dependendo da

[53] Algumas das métricas de preservação estudadas neste trabalho, como as isopermas e o Índice de Preservação também se baseiam nessa relação. Para maiores detalhes vide o Apêndice A. Sobre as propriedades psicrométricas do ar, consulte-se ASHRAE (2009, cap. 1).

[54] (BAKER e LUGANO, 1999; BLADES e RICE, 2010; CONRAD, 2011; PADFIELD, 1987; STANIFORTH, 2007, p. 8; TOLEDO, 2010, p. 74).

[55] (BROWN e ROSE, 1996, p. 21; CONRAD, 2011; NEUHAUS e SCHELLEN, 2007, 2010; SCHELLEN, 2002; SCHELLEN e VAN SCHIJNDEL, 2007).

[56] (NEUHAUS e SCHELLEN, 2007, 2010; SCHELLEN, 2002; SCHELLEN e VAN SCHIJNDEL, 2007).

[57] (ALTERIO e BARBARO, 2010; KAEFERHAUS, 2010; OLESEN e LIEDELT, s.d.; ŠIJANEC ZAVRL, 2004)

posição do sistema de aquecimento. Essa estratificação aumenta os riscos de contaminação biológica fúngica[58]. BROWN e DEKAY (2004, p. 261) apresentam um nomograma para dimensionamento desse tipo de sistema.

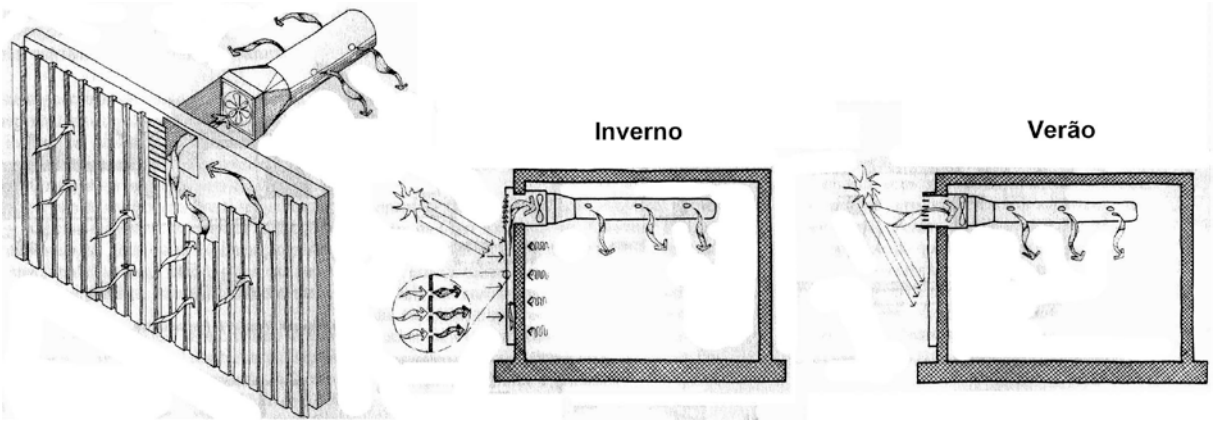


Figura 5 – Ventilação com aquecimento passivo. Adaptado de (BROWN e DEKAY, 2004, p. 261)

As paredes do tipo "Trombe-Michel"[59] que combinam ganhos térmicos por radiação solar e massa térmica, mediante a colocação de um vidro em frente a uma superfície termo-acumuladora, com o controle do fluxo de ar no espaço enclausurado entre o vidro e a parede, podem surtir o mesmo efeito (Figura 6). O Museu de Arte Iwamura Kazuo em Tochigi, Japão utiliza um sistema deste tipo na cobertura (GOMEZ e MORALES, 2005).

Definido o limite crítico de umidade relativa, normalmente entre 60 e 70%[60], são utilizados sensores interligados a um sistema de controle automatizado para determinar os modos de operação do sistema. Se a umidade interna está abaixo do limite, o ar é apenas recirculado ou o sistema fica desligado. Se a umidade interna está acima do limite e a externa está abaixo, o ar externo mais seco é insuflado mecanicamente. Se ambas estão acima do limite, o ar interno é aquecido (MAEKAWA e TOLEDO, 2002, p. 5)

FISCHER (2004) demonstra os possíveis usos de recuperadores de calor passivos no projeto de museus, arquivos e bibliotecas. GRALA DA CUNHA et al. (2007) desenvolveram

[58] (CAMUFFO, 1998, 2010; CAMUFFO et al., 1999, 2004a; CAMUFFO e DELLA VALLE, 2007; PADFIELD apud GCI, 2007, p. 69; SAMEK et al., 2007; SCHOFFELEN et al., 2004).

[59] (ALMUSAED, 2011, p. 389; BROWN, 2002, p. 58; CUNHA, 2006, p. 53, GOULDING et al., 1992; KWOK e GRONDZIK, p. 113; MAZRIA, 1985, p. 54; ROAF et al., 2006, cap. 7; WACHBERGER, 1984; WRIGHT, 1983)

[60] Para mais detalhes sobre valores críticos de umidade relativa, com relação à contaminação biológica, vide seção A.5 do Apêndice A.

o projeto de um aquecedor utilizando aquecimento solar passivo, dispositivo que pode ser utilizado neste tipo de sistema, diminuindo ainda mais os custos.

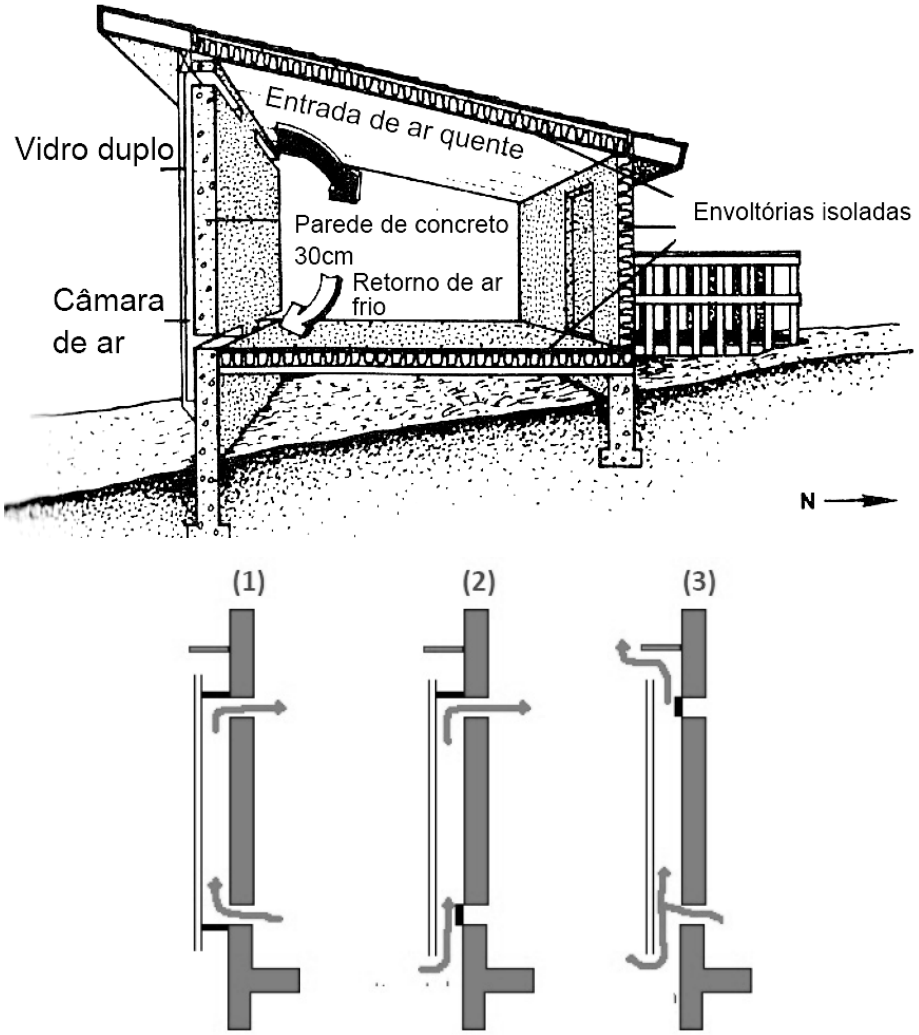


Figura 6 – Corte original da casa Trombe-Michel em Odeillo, França. Possibilidades de circulação de ar com sistema Trombe-Michel: (1) Recirculação de ar quente no inverno; (2) Renovação com aquecimento; (3) Exaustão forçada no verão. Fonte: (MAZRIA, 1985).

Um risco associado a essa estratégia é o aumento na taxa de deterioração química acarretado pelo aumento da temperatura. Não obstante, MAEKAWA et al. (2009b, p.262) argumentam que a deterioração química é considerada uma ameaça menor nas regiões quente-úmidas, uma vez que o processo é relativamente lento, e a maioria das coleções já atingiu estágios quimicamente estáveis em reservas técnicas e espaços expositivos. Tal argumentação parece carecer de sustentação teórica. Daí a importância de se diferenciar as estratégias de gerenciamento ambiental que utilizam processos psicrométricos de **desumidificação** – mais

convenientes – daquelas que utilizam o **aquecimento umidostático (aquecimento com desumidificação)**. Considerando somente os riscos de deterioração química, é melhor ter um ambiente frio com uma umidade relativa alta, do que ter um ambiente seco com uma temperatura alta[61]. Outros aspectos a considerar são: (i) a dificuldade de controlar o ambiente em salas de exposição, onde a variação do número de visitantes introduz flutuações significativas na umidade relativa do ar; (ii) no caso dos climas tropicais, as alterações necessárias no sistema original de ventilação do edifício, para aumentar a estanqueidade (GCI, 2007; ENGLISH HERITAGE, 2008b); (iii) a eficiência energética e as trocas térmicas envolvidas (LARSEN, 2010).

Maekawa e Toledo propõem o uso desse sistema em regiões tropicais úmidas, com o formato que KERSCHNER (2008) denominou **ventilação para conservação**, incorporando o aquecimento umidostático a um sistema híbrido de ventilação. O objetivo seria diminuir os riscos de infestação biológica[62]. Vale lembrar que a contaminação biológica fúngica pode também ser reduzida por taxas de renovação de ar adequadas (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2006; VALENTIN, 2007)[63].

Em contraponto, KRUGER e DINIZ (2010, p.722) consideram a possibilidade do uso controlado do aquecimento para desumidificação na região bioclimática (vide seção B.5 do Apêndice B) ao sul do Brasil, que representa cerca de 7% do território. Tal uso poderia dar-se nos períodos mais frios do ano, quando ocorrem temperaturas entre 10 e 20ºC.

Maekawa e Toledo argumentam ainda que o uso de estratégias combinando ventilação natural ou forçada com o aquecimento é mais simples, econômico, eficaz e sustentável do que os sistemas convencionais de ar condicionado, tanto em termos de instalação, quanto de manutenção (MAEKAWA e BELTRAN, 2004; MAEKAWA e TOLEDO, 2002; TOLEDO, 2004, 2010, p. 74). No caso do Museu Goeldi, foi estimado um custo de instalação de cerca de um quinto de um sistema convencional (MAEKAWA, 2007, p. 12; 2007b, p. 230; MAEKAWA e TOLEDO, 2010, p. 3).

---

[61] (LARSEN e BROSTROM, 2010, p. 40; PADFIELD, 2005, p. 21; 2007, p. 5; PADFIELD apud GCI, 2007, p. 68; PADFIELD et al., 2007b).

[62] (MAEKAWA e BELTRAN, 2004; MAEKAWA et al., 2007, 2009a, 2009b; MAEKAWA e TOLEDO, 2001b, 2002, 2003, 2010, 2011; STANIFORTH, 2007, p. 8; TOLEDO, 2010).

[63] Uma discussão mais detalhada sobre como os fatores ambientais influenciam no risco de contaminação biológica é apresentada no Apêndice A.

Reservas técnicas e arquivos localizados em edifícios com envoltórias de grande inércia térmica podem ser gerenciados ambientalmente por meio de métodos passivos, utilizando ventilação forçada (insuflação e eventual exaustão) combinada com o efeito de tamponamento *(buffering)* de umidade relativa de envoltórias maciças e porosas internamente e do próprio acervo[64]. O Museu de Arte de Stuttgart utiliza esse princípio, aliado a um sistema híbrido de aquecimento das envoltórias (BAUER, 2010, p. 175).

PADFIELD (1998, 2005, 2007b) estudou o efeito das taxas de ventilação sobre a estabilidade climática de arquivos. Uma estabilidade maior, que se traduz em menor amplitude de oscilação das variáveis ambientais, é atingida reduzindo a renovação do ar. Mas nesse caso é necessário considerar e tratar possíveis fontes internas de poluentes, bem como riscos de infestações biológicas[65]. Padfield comenta sobre as dificuldades de manter a estabilidade interna por meio de aquecimento umidostático, quando há problemas de infiltração e muita umidade nas paredes. Nessas circunstâncias, o tempo de resposta do edifício para atingir um equilíbrio final pode demorar anos. O mesmo pode acontecer em arquivos documentais muito cheios. Padfield chega a afirmar que, em arquivos, nunca haveria necessidade de sistemas ativos, devido às propriedades de tamponamento do acervo documental (CHRISTENSEN et al., 2010; KORJENIC e BEDNAR, 2012; PADFIELD, 2007b, p. 7; PADFIELD et al., 2007a, p.13; 2007b, p. 4). BATTERHAM e WIGNELL (2008) comprovaram o efeito de tamponamento de umidade em embalagens de papelão. Para climas quente-secos PADFIELD (2007b, p. 11) propõe o uso de um dispositivo acumulador térmico e hídrico móvel a ser acoplado na tomada de ar externo. O autor também não descarta a possibilidade de uso do resfriamento e tamponamento do próprio solo. A taxa de evaporação nas paredes pode ser obtida por métodos termográficos (GRINZATO et al., 2002).

Na Fundação Casa de Rui Barbosa foi utilizado o sistema híbrido de ventilação com aquecimento umidostático, com filtros de purificação do ar e controle automatizado, permitindo a alternância entre modos ativo e passivo de ventilação, desumidificação, modo

---

[64] (BROWN, 2002; CAMUFFO, 1998; CARMELIET et al., 2005; KUNZEL et al., 2005; JANSSEN e CHRISTENSEN, s.d.; KORJENIC e BEDNAR, 2012; PADFIELD, 1998, 2005, 2007b; PADFIELD e LARSEN, 2004, 2005; PADFIELD et al., 2007b; RODE, 2004, 2005; TIME, 1998; VAN SCHIJNDEL, 2008; YANG et al., 2007). Para mais detalhes sobre o comportamento higroscópico dos materiais, vide seção A.4 do Apêndice A.

[65] (COSTANZO et al., 2007; PADFIELD, 2007; PADFIELD et al., 2007; SIMONSON et al., 2004, p. 815). Vide também seção A.5 do Apêndice A.

híbrido, resfriamento e umidificação. Quando o ar externo está mais seco e fresco que o interno, utiliza-se a ventilação forçada (10% do tempo). Caso contrário, quando necessário, o ar insuflado é desumidificado por uma unidade de climatização do tipo *split* convencional, com elemento de reaquecimento. Foram utilizados filtros nas tomadas de ar. O sistema mantém a umidade relativa em 60 ± 5% e a temperatura a 25 ± 3ºC. Segundo os autores, na concepção do sistema, além dos objetivos de conservação foi também considerado o conforto ambiental humano, determinando taxas de renovação do ar elevadas (MAEKAWA e BELTRAN, 2004; MAEKAWA et al., 2009a, 2009b).

Um sistema de climatização similar ao da Casa Rui Barbosa já havia sido testado por Maekawa, entre 2001 e 2005, em um museu da Georgia, porém sem um controle automatizado (MAEKAWA, 2007a, 2007b; MAEKAWA et al., 2007).

CORBELLA e YANNAS (2003) estudaram o comportamento do edifício da Fundação Casa Rui Barbosa, anteriormente à instalação do sistema de climatização, analisando a forma e sistema construtivo do edifício, seu *layout* interno e apresentam resultados de medições de temperatura no verão e no inverno. Os autores ressaltam o bom desempenho térmico do edifício antigo do museu. Corbella e Yannas também analisam os mesmos aspectos do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro, ressaltando como a implantação e os pilotis do edifício favorecem a ventilação cruzada. Ressaltam, contudo, a vedação do bloco de exposições e da reserva técnica, climatizados artificialmente por um sistema centralizado. Comparam dados de temperatura medidos no verão e no inverno, demonstrando o acoplamento convectivo acarretado pela ventilação.

O sistema instalado no Museu Goeldi visa manter a umidade relativa abaixo de 60%. Ele consiste em conjuntos de ventiladores centrífugos (insuflação), axiais (exaustão) e oscilantes (circulação), que entram em operação quando a umidade relativa ultrapassa os 70% e são desativados quando ela cai abaixo de 60%. Foram utilizados desumidificadores mecânicos portáteis, sem aquecimento. A tomada de ar é filtrada e protegida contra a entrada de insetos com uma tela. A saída de ar foi protegida com aletas móveis, acionadas por gravidade, para impedir o retorno do ar e a entrada de insetos. Trata-se, portanto, de um sistema com controle umidostático e com temperatura flutuante. O isolamento térmico do edifício foi melhorado. Foi utilizado mobiliário compactador com laterais perfuradas, para permitir a circulação de ar. O monitoramento ambiental após a instalação (Figura 7) mostrou que para manter a umidade interna na faixa desejada, o sistema trabalhou em média quatro

horas por dia, com temperaturas internas entre 30 a 33ºC e com os ventiladores produzindo um ruído de 61dB. Como resultado do monitoramento biológico, os autores relatam a ocorrência de infestações por insetos e por fungos, que imputaram a falhas de operação do sistema, em algumas ocasiões, por mais de dois dias. Para contornar o problema, o *set-point* de umidade relativa foi rebaixado para 50%. Apesar de reconhecer o risco de deterioração química devido às temperaturas elevadas decorrentes de seu método de gerenciamento ambiental (MAEKAWA, 2007b, p.15), posteriormente Maekawa (2010, p.3) escreveu que o envelhecimento químico e os danos mecânicos não foram considerados ameaças (MAEKAWA, 2007b; MAEKAWA e TOLEDO, 2010, 2011).

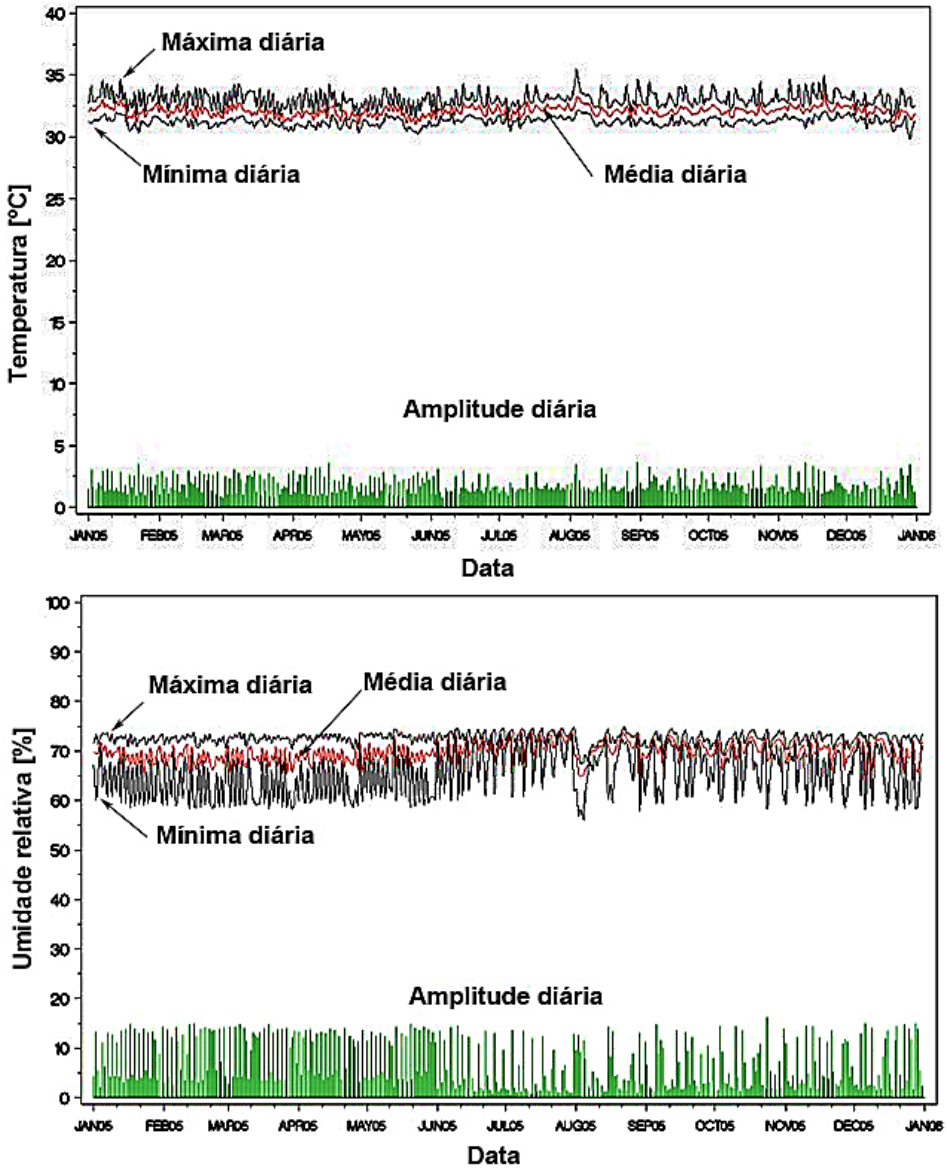


Figura 7 – Museu Paraense Emílio Goeldi - *T* e *UR* máximas, médias, mínimas e amplitudes diárias medidas na reserva técnica. Fonte: Prof. Luiz Souza.

Além dos trabalhos de Toledo citados acima, no Brasil, no campo da pesquisa sobre ventilação aplicada à conservação de bens culturais merecem menção os trabalhos de CARVALHO (2005b), CORREA (2003), CORREA et al. (2002), e KRUGER et al., (2004).

CÓSTOLA (2006, cap. 4) descreveu o estado da arte da pesquisa em ventilação natural, visando o conforto humano e a eficiência energética de edificações, internacionalmente e no Brasil, apontando que em nosso país, pouco se pesquisa sobre o tema, apesar de sua reconhecida relevância e aparato teórico, experimental e computacional disponíveis. Contudo, em seu levantamento, Cóstola não menciona nenhum trabalho na área de gerenciamento ambiental para coleções. No periódico especializado *International Journal of Ventilation*[66], em circulação desde 2002, até o presente momento também não foi publicado nenhum artigo especifico sobre esse tema.

RIBEIRO (2011) apresenta um panorama sobre intervenções realizadas nos museus brasileiros sob a tutela do IBRAM visando à conservação preventiva das coleções, com destaque para a presença ou ausência de sistemas de climatização e equipamentos de monitoramento ambiental.

CARVALHO (2005b) propõe o uso de metodologia de **equações preditivas,** obtidas por meio de **análise de regressão linear múltipla**, para avaliação das condições ambientais em museus. Essa metodologia foi introduzida internacionalmente por Givoni e no Brasil por KRUGER e GIVONI (2004). As equações preditivas permitem verificar a viabilidade do acionamento de sistemas de insuflação de ar (ventilação forçada), em edifícios que abrigam coleções, estimando os períodos do ano mais adequados ao funcionamento. KRUGER et al. (2004) aplicaram a metodologia na avaliação das condições ambientais do museu do Seminário de São Luiz de Tolosa em Rio Negro. Uma metodologia similar foi utilizada por LANKESTER e BRIMBLECOMB (2012) para estudar o impacto das mudanças climáticas globais no clima interno de uma galeria. O uso de equações preditivas foi incluído entre os métodos de simulação computacional empregados neste trabalho.

CORREA et al. (2002) apresentam os resultados de um estudo de gerenciamento ambiental realizado para o Museu Universitário Professor Oswaldo Rodrigues Cabral, no campus da UFSC. Esse museu utiliza o sistema *CLIMUS* ©, desenvolvido pelo professor

[66] http://www.ijovent.org.uk/index.html (Acesso em 17/10/2012).

Saulo Guths[67]. Esse sistema vem, desde 1997, sendo implantado com sucesso em algumas instituições que abrigam bens culturais no Brasil e consiste num sistema de aquisição e tratamento de sinais ligados a um computador, sendo configurado para diversas tarefas relacionadas ao gerenciamento ambiental de coleções. O sistema foi instalado no Arquivo Público Mineiro e na Biblioteca dos Jesuítas, em Belo Horizonte e também na Fundação Casa de Rui Barbosa, no Rio de Janeiro (CORREA et al., 2002; GUTHS, s.d., 2006a, 2006b). O *CLIMUS* © calcula as métricas *IP* (Índice de Preservação) e *IETP* (Índice de preservação considerando o efeito cumulativo do tempo) utilizadas neste trabalho (vide seção A.3 do Apêndice A). Guths desenvolveu também um dispositivo de reaquecimento, o REAQUIS © para ser acoplado a unidades compactas de ar condicionado (GUTHS, s.d., p. 2).

CORREA (2003) trata dos aspectos técnicos relacionados à atividade de conservação de museus, enfocando a interação entre os edifícios e os fatores climático-ambientais a que eles estão expostos. A autora apresenta em sua metodologia procedimentos que permitem avaliar o potencial de aplicação da ventilação natural ou forçada visando à regulação da umidade relativa no interior dos ambientes, o que coincide com um dos objetivos deste trabalho. Ela também apresenta métodos para avaliar o potencial de desumidificação e resfriamento do ar interno, frente às condições do ar externo, através de índices de desempenho[68], em que avalia a porcentagem do tempo de medição em que as variáveis temperatura e umidade relativa permanecem dentro de uma faixa predeterminada, seguindo uma metodologia semelhante àquela apresentada por LA GENNUSA et al. (2005), CORGNATI et al. (2009), CORGNATI e FILLIPI (2010) e COSTANZO et al. (2006). Correa avalia ainda as estratégias arquitetônicas empregadas nos museus estudados, em termos do conforto humano.

KLUPPEL e GOMES (2009) e KLUPPEL et al. (2010) relatam os projetos desenvolvidos para adequação ambiental e aumento da eficiência energética do Museu de Arte Sacra da UFBA, considerando a conservação preventiva das coleções e o conforto humano. Foram projetadas proteções contra a incidência direta de radiação solar e sistemas de

[67] Professor visitante do LMPT - Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais, da UFSC (MENDES et al., 2005)..

[68] Vide seção A.1 do Apêndice A.

ventilação híbridos no mobiliário de exposição permanente e um sistema de circulação de ar forçada para a reserva técnica.

2.4.3- Sistemas de ar condicionado para gerenciamento ambiental de coleções

O uso dos sistemas de ar condicionado constitui uma alternativa para o gerenciamento ambiental das coleções, mas com uma delicada relação custo benefício, em função dos seus altos custos financeiros: de implantação, manutenção, e energético (GCI, 2007; MARTENS, 2012, p. 20; STANIFORTH, 2007, 2011). Esse último, se considerarmos a produção de energia em usinas termoelétricas, remonta inclusive a problemas ambientais de maior amplitude, como as mudanças climáticas globais, na medida em que a demanda por mais energia faz com que aumente a presença de gases poluentes que causam o efeito estufa na atmosfera (HENRY, 2007b, p.19).

O funcionamento adequado de um sistema de ar condicionado (ativo) depende de uma boa estanqueidade dos ambientes climatizados, bem como de um bom isolamento térmico, que por sua vez é função das propriedades térmicas dos materiais e componentes construtivos[69]. Necessário considerar ainda os custos relativos à implantação e manutenção destes recursos e instalações, que se multiplicam quando se trata de reformas em edificações existentes, uma vez que serviços de demolição e adaptação deverão ser feitos para que os sistemas possam ser implantados. Tudo isso sem falar nos aspectos relativos a questões de tombamento, que frequentemente impedem alterações nas fachadas e na volumetria dos edifícios históricos (MAEKAWA e BELTRAN, 2004).

O estado da arte no projeto e funcionamento dos equipamentos de climatização vem paulatinamente incorporando parâmetros que visam à melhoria de sua **eficiência energética**, o que constitui um campo de pesquisa específico na área da Engenharia Mecânica, com o seu equivalente na Arquitetura. Embora o escopo desse trabalho não inclua uma investigação detalhada do tema, cabem algumas considerações para entender melhor porque a ventilação natural ou forçada se coloca como alternativa aos sistemas ativos, no gerenciamento ambiental das coleções.

[69] Para detalhes sobre os componentes básicos dos sistemas de ar condicionado e seu funcionamento, no contexto do gerenciamento ambiental para coleções consulte-se (PARK, 1991; GUTHS, 2006b; MALDONADO, 2004; PADFIELD, 2005; FRANTZ, 2007; MARSHALLSAY e LUXTON, 2006; IPI, 2005, 2010).

Segundo Collin Pearson,

> sistemas de ar condicionado são muito caros para instalar e manter, e a menos que sistemas de alta qualidade (e consequentemente alto custo) sejam utilizados, podem frequentemente causar mais danos do que na sua ausência. Infelizmente há uma neurose de que sem um sistema de ar condicionado, as coleções dos museus, galerias, bibliotecas e arquivos vão deteriorar rapidamente. Este não é o caso. É mais importante ter um ambiente estável do que especificar níveis de temperatura e umidade relativa e isso pode ser conseguido com um planejamento cuidadoso dos edifícios. (PEARSON apud BROWN et al., 2002, p. 6.)

A colocação de Pearson é especialmente verdadeira para os casos de instituições de pequeno porte, onde o uso de sistemas de ar condicionado nem sempre é uma opção prática. E ainda mais aplicável à situação de muitas instituições brasileiras que fazem a salvaguarda de bens culturais, contando com poucos recursos financeiros. Devido à incapacidade de facear os custos de manutenção, são conhecidos casos de instituições que mantém os sistemas desligados, às vezes por anos a fio. Nessas circunstâncias, além dos danos físico-químicos, as coleções são ameaçadas por infestações biológicas que podem irromper nas unidades e dutos dos sistemas. DANIEL (apud TOLEDO, 2007, p. 5) apresenta evidências experimentais que comprovam a fala de Pearson.

Os custos de implantação, operação e manutenção destes sistemas devem ser cuidadosamente previstos e avaliados pelas instituições **antes** da sua instalação. Muitas instituições, na impossibilidade de arcar com os custos de operação, adotam a prática de desligar o sistema após o expediente. Isso não somente no Brasil, mas também na Europa (BERNARDI, 2008; CAMUFFO et al., 2001, 2002; GCI, 2007). Embora esse procedimento produza uma economia na conta de energia ao final do mês, aumenta significativamente os riscos de que as flutuações ambientais diárias de temperatura e umidade relativa provoquem danos às coleções – a se considerar o isolamento térmico e a estanqueidade do mobiliário e/ou suportes em questão.

Na literatura encontramos diversos estudos e relatos sobre o consumo e desempenho energético de museus, arquivos, bibliotecas e igrejas[70]. Na página de internet do projeto EULEB[71] bem como na publicação coordenada por TOMBAZIS et al. (2004) encontram-se

[70] O site do projeto *Microclimate for Cultural Heritage*, apresenta uma resenha de medições realizadas em museus, igrejas e edifícios históricos europeus, climatizados. Disponível em: http://www.isac.cnr.it/~microcl/microclima/default2.php (Acesso em 03/09/2012).

[71] http://www.new-learn.info/packages/euleb/en/home/index.html (Acesso em 04/09/2012).

dados de alguns museus europeus quanto ao consumo energético, conforto ambiental humano, sistemas construtivos, instalações e sistemas de climatização (passivos, ativos e híbridos). Uma avaliação comparativa do consumo energético dos museus incluídos naquela publicação é apresentada por ZANNIS et al. (2006). CASSAR (1994, 2011a) discute os diversos fatores envolvidos com a eficiência energética de museus. MAEKAWA (2007a, p. 230; 2007b, p. 10) e PARK (1999, p. 87) informam sobre custos operacionais típicos de instalações de climatização. MAEKAWA e TOLEDO (2010, 2011) compararam o consumo energético de uma reserva técnica operando com um sistema convencional e com um sistema híbrido, encontrando economia da ordem de 90%. GIVONI (1981) discute os fatores que determinam o consumo energético em edifícios históricos e as estratégias arquitetônicas bioclimáticas passivas para minimizá-lo. ASCIONE et al. (2008) estudaram, através de simulações com código multimodal, diferentes estratégias para redução do consumo energético em museus. BLAIR (2011) investigou padrões de referência para o consumo energético dos edifícios históricos no Reino Unido. FARRENY et al. (2012) estimaram o consumo energético com base no número de visitantes de 28 museus espanhóis. ORESZCZYN et al. (1994) compararam o clima interno de museus condicionados e não condicionados. KRAUSSE et al. (2007) compararam o consumo energético de uma biblioteca em Coventry, Inglaterra, com os consumos típicos de edifícios de escritórios europeus. RYHL-SVENDSEN et al. (2009) compararam o consumo energético de três reservas técnicas na Dinamarca. ARTIGAS (2007), AYRES et al. (1989), BELLIA et al. (2007) e MUELLER (2010) compararam o consumo energético e custos de diferentes sistemas de climatização ativos utilizados em diversos museus. ARTIGAS (2007) demonstrou que quanto mais fino o controle das variáveis ambientais, maiores são esses custos.

GUTHS (2006a) alerta que em sistemas de condicionamento do tipo central, um dos riscos é a pane na geração de água gelada. O sistema de ventilação (*fan-coil*) pode continuar operando, trazendo ar quente e úmido do exterior para dentro do ambiente. Dependendo dos níveis de temperatura e umidade pode ocorrer condensação nas paredes internas, e sobre os objetos. Segundo o autor, trata-se de um caso grave, e relativamente fácil de acontecer. PADFIELD (1987) cita alguns exemplos. Deve-se evitar, na medida do possível, que tubulações hidráulicas de qualquer tipo passem nas envoltórias dos ambientes com coleções. É igualmente importante que os responsáveis por coleções tenham à mão esquemas *as-built*, que mostrem a localização de tubos (hidráulicos, de esgoto, ar condicionado, elétricos, etc.) no interior das paredes. Outra restrição aos sistemas que utilizam evaporadores com água

gelada é a possibilidade de congelamento na serpentina do evaporador secundário, quando a temperatura do ar que passa por ela está com temperatura abaixo de 4ºC (PADFIELD, 2005, p. 18). O ruído e vibrações produzidos pelos equipamentos, se não considerados e minimizados adequadamente na instalação, podem prejudicar não somente o conforto ambiental humano, como também ocasionar riscos ao edifício e às coleções (PARK, 1991).

Uma questão ainda em debate aberto no campo da Conservação Preventiva é a dos **padrões ambientais a serem adotados para a conservação das coleções**. A definição dos *set-points* do sistema deve ser embasada no diagnóstico e na análise dos riscos que podem afetar as coleções. A especificação de critérios muito restritivos pode aumentar desnecessariamente os custos (MARTENS, 2012, p. 22). A norma europeia EN15757 (UNI, 2010) propõe uma metodologia para determinação do *set point* de umidade relativa compatível com o conceito de **umidade "provada"**[72]. PADFIELD (2007a) aponta as limitações desse conceito elaborado por Stefan Michalski, uma vez que demanda o registro histórico das condições climáticas do objeto, quanto da sua aplicabilidade somente à prevenção de danos mecânicos.

A obra "O ambiente dos museus" (THOMSON, 1986) introduziu uma série de princípios e padrões para o controle ambiental de coleções, que a partir da década de 1990 começaram a ser questionados e revisados, admitindo-se uma maior flexibilidade[73]. Uma razão para isso é que os bens culturais são compostos por mais de um tipo de material, o que dificulta o estabelecimento de padrões muito rígidos para a sua conservação. BRATASZ (2013b) apresenta uma revisão criteriosa desses padrões, concluindo que desde a década de 1980, tem-se admitido especificações climáticas mais flexíveis. BROWN e ROSE (1996) discutem como a evolução desses padrões se relaciona com o desenvolvimento dos sistemas ativos de climatização, ao longo do séc. XX. MARTENS (2012, p. 21) e PARK (1991) traçam um histórico do desenvolvimento destes sistemas.

[72] (ERHARDT et al., 1996, p. 909; MICHALSKI, 1993, 2007, 2010; MICHALSKI e GRATTAN, 2007; vide também seção A.4 do Apêndice A)

[73] (BRATASZ, 2013b; CASSAR, 1995; ERHARDT e MECKLENBURG, 1994,1995; ERHARDT et al., 2007; McCORMICK-GOODHART, 1996; MECKLENBURG, 2007a, 2007b; MECKLENBURG et al., 1998; MECKLENBURG e TUMOSA, 1999; MICHALSKI, 1993, 1994, 1996, 2002, 2007, 2011; MICHALSKI e GRATTAN, 2007; PADFIELD, s.d.a; PARK, 1999; WEINTRAUB, 2006).

Atualmente, a discussão em torno de estratégias efetivas de conservação preventiva em longo prazo é resultado de esforços coletivos de colaboração. A publicação do capítulo 21, sobre museus, arquivos e bibliotecas no manual de aplicações da ASHRAE (2007) é um exemplo do tipo de esforço colaborativo que vem sendo realizado no campo do Gerenciamento Ambiental nos últimos anos. PADFIELD (apud GCI, 2007, p. 65) argumenta que esse capítulo do manual deveria ser precedido de outro que ensinasse como projetar um edifício que **não necessitasse** de ar condicionado. Até 1999, o manual citado só tinha **um** parágrafo sobre projeto desta tipologia de edifícios, a bem dizer, escondido em um capítulo sobre aplicações especiais dos sistemas, especificando simplesmente manter T=21ºC e UR=50%, com flutuações mínimas (CONRAD apud GCI, 2007, p. 87; MICHALSKI, 2007, p. 2).

MICHALSKI (2007, 2011) explica os princípios que regeram a elaboração do citado capítulo, cuja síntese encontra-se no Quadro 2: (i) incorporação de princípios de gerenciamento de riscos – avaliação do que pode dar errado, quais são os problemas que podem ocorrer e como podem ser contornados, ao invés de especificar o melhor padrão possível; (ii) flexibilização em torno dos set-points – "algo para todos, dos ricos aos pobres"; (iii) possibilidade de ajustes sazonais. A Figura 8 ilustra as flutuações sazonais típicas das classes de controle AA, A1, A2 e B.

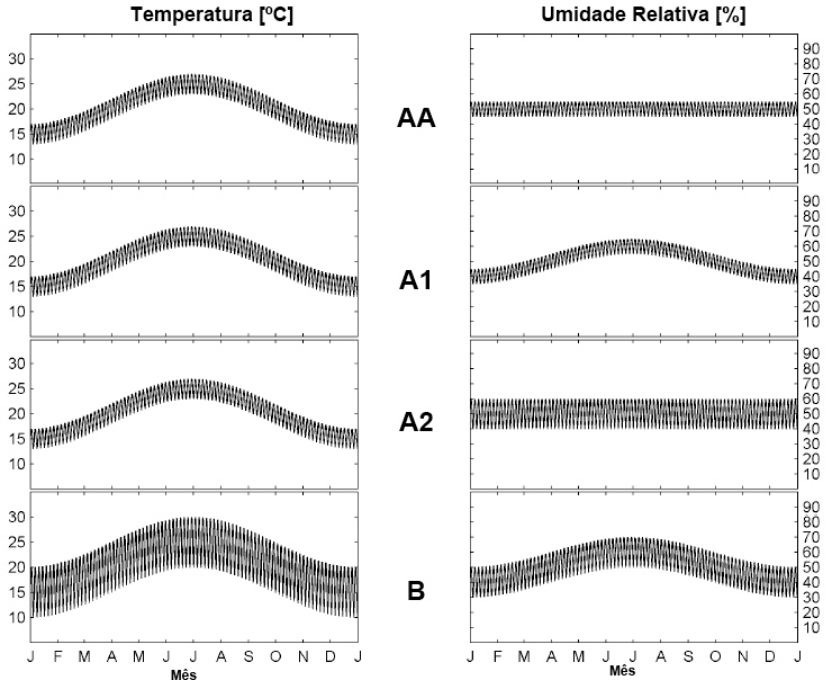


Figura 8 – Exemplos de flutuações sazonais das classes de controle climático definidas pela ASHRAE. Adaptado de (MARTENS, 2012). Vide também os exemplos de MICHALSKI e GRATTAN (2007).

Quadro 2 – Especificações de padrões de temperatura e umidade relativa para coleções. Adaptado de ASHRAE (2007, p. 21.13) e GUTHS (s.d.).

<table>
<tr><th rowspan="2">Tipo</th><th rowspan="2">Set point ou média anual</th><th colspan="3">Flutuações máximas e gradientes em espaços controlados</th><th rowspan="2">Riscos e benefícios para as coleções</th></tr>
<tr><th>Classes de controle</th><th>Flutuações curtas e gradientes no espaço da sala</th><th>Ajustes sazonais no set point do sistema</th></tr>
<tr><td rowspan="11">GERAL (Museus, Galerias de Arte Bibliotecas e Arquivos)

abrigando coleções quimicamente instáveis</td><td rowspan="11">UR: 50%

(ou a média anual p/ coleções permanen-tes)

T: 15-25 ºC

(observar condições requisitadas em empréstimos)</td><td rowspan="2">AA
Controle preciso, s/ alterações sazonais de UR</td><td>UR: ± 5%</td><td>UR: sem alterações</td><td rowspan="2">Nenhum risco de danos mecânicos para a maioria dos artefatos e pinturas.</td></tr>
<tr><td>T: ± 2ºC</td><td>5ºC acima;
5ºC abaixo</td></tr>
<tr><td rowspan="5">A1/A2
Controle preciso, c/ algum gradiente ou alterações sazonais, não ambos</td><td>UR: ± 5%</td><td>UR: 10% acima
10 % abaixo</td><td rowspan="5">Pequeno risco de dano mecânico para artefatos de alta vulnerabilidade, nenhum risco mecânico para a maioria dos artefatos, pinturas, fotografias e livros.</td></tr>
<tr><td>T: ± 2ºC</td><td>5ºC acima;
10ºC abaixo</td></tr>
<tr><td colspan="2">ou</td></tr>
<tr><td>UR: ± 10%</td><td>UR: sem alterações</td></tr>
<tr><td>T: ± 2ºC</td><td>5ºC acima;
10ºC abaixo</td></tr>
<tr><td rowspan="2">B
Controle preciso, c/algum gradiente e diminuição de temperatura sazonal</td><td>UR: ± 10%</td><td>UR: 10 % acima
10 % abaixo</td><td rowspan="2">Risco moderado de danos mecânicos para artefatos de alta vulnerabilidade, risco minúsculo para a maioria de pinturas, fotografias, alguns artefatos, alguns livros e nenhum risco para muitos artefatos e a maioria dos livros</td></tr>
<tr><td>T: ± 5ºC</td><td>T: 10º C acima mas sempre abaixo de 30ºC. Abaixar T o necessário para controlar UR</td></tr>
<tr><td rowspan="2">C
Previne riscos extremos</td><td colspan="2">UR: entre 25 e 75% durante o ano</td><td rowspan="2">Alto risco de dano mecânico para artefatos de alta vulnerabilidade. Risco moderado para a maioria das pinturas e fotografias, alguns livros e artefatos. Pouco risco para a maioria dos livros e artefatos.</td></tr>
<tr><td colspan="2">T raramente acima de 30ºC, e normalmente abaixo de 25ºC</td></tr>
<tr><td>D
Previne riscos de umidade</td><td colspan="2">UR abaixo de 75%</td><td>Alto risco de dano mecânico para a maioria dos artefatos e pinturas com baixa resistência à umidade. É evitado o crescimento de mofo e rápida corrosão.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Arquivos e Bibliotecas

abrigando coleções quimicamente instáveis</td><td>Reserva técnica refrigerada
UR: 40%
T: -20ºC</td><td colspan="3">UR: ± 10 %
T: ± 2ºC</td><td>Flutuações de umidade abaixo de um mês não afetam a maioria dos objetos empacotados corretamente</td></tr>
<tr><td>Reserva técnica fria
UR: 30-50%
T: 10ºC</td><td colspan="3">É vantagem para a coleção, até mesmo se só alcançar estes limites durante o período de inverno, contanto que não ocorra excesso de umidade.</td><td>Objetos quimicamente instáveis utilizáveis por um século ou mais.</td></tr>
<tr><td>Coleções Especiais c/ Metais</td><td>Sala seca:
UR: 0-30%</td><td colspan="3">Umidade relativa não pode exceder ao valor crítico, tipicamente 30% UR</td><td></td></tr>
</table>

Cabe destacar que os limites adotados no Capítulo 5 deste trabalho para a análise do potencial de aproveitamento da ventilação natural para melhoria das condições climáticas internas nos ambientes que abrigam coleções foram parcialmente embasados nas considerações apresentadas no Quadro 2, bem como nas considerações apresentadas no Apêndice A.

Cabe também enfatizar que, se a metodologia de classificação da ASHRAE por um lado **intenta propor um sistema em que qualquer instituição possa se classificar**, por outro **se insere na filosofia convencional de projeto de sistemas de climatização**, quando embasa a classificação em critérios de flutuação das variáveis ambientais que remetem à **estanqueidade** dos edifícios, conforme já se discutiu acima. Os critérios e observações mencionados no quadro síntese (Quadro 2) denotam a **preocupação com a estabilidade química e físico-mecânica das coleções.** Porém, do ponto de vista dos agentes de deterioração biológicos, foi considerada apenas a possibilidade de crescimento de mofo, **sem se aprofundar na questão da infestação por insetos**, que está também conectada a questões bioclimáticas e à permeabilidade aérea dos edifícios. Contudo, essa é, também, uma limitação do presente trabalho.

MARTENS (2012) estudou alguns museus holandeses, verificando a porcentagem de tempo ao longo do ano em que cada classe de controle da ASHRAE corresponde aos dados climáticos monitorados e conclui que **tais classes não são totalmente adequadas para um diagnóstico de riscos, quando não correspondem à totalidade do período monitorado** (p. 80, 93), e considera que é mais importante determinar o que ocorre com as coleções quando o clima interno não atende à classe pretendida. HUIJBREGTS et al. (2012) aplicaram o método desenvolvido por MARTENS (2012) para analisar o impacto das mudanças climáticas sobre o desempenho ambiental de museus na Holanda e na Bélgica. O método de MARTENS (2012) e MARTENS e SCHELLEN (2013) consiste no desenvolvimento e aplicação específica de **índices de desempenho**[74]**.**

[74] Esse tipo de índice considera a porcentagem de tempo que os parâmetros de temperatura e umidade relativa permanecem dentro de determinada faixa de valores previamente estabelecida (CORGNATI et al., 2009; CORGNATI e FILLIPI, 2010; LA GENNUSA et al., 2005). CORGNATI et al. (2009) e CORGNATI e FILLIPI (2010) consideraram como satisfatórios, no monitoramento de temperatura e umidade relativa, índices de desempenho maiores que 90%. COSTANZO et al. (2006) e D'AGOSTINO (2006) descrevem os índices adotados nas normas italianas UNI 10829 e UNI 10969 que constituem ***indicadores de desvio***, a serem aplicados na análise das flutuações de temperatura e umidade relativa, quando fora dos limites de segurança.

Um sistema de climatização com um controle preciso não é garantia de condições ideais de conservação (BROWN e ROSE, 1996, p. 20; NEUHAUS, 2013, p. 124). Pode-se pensar que o controle fino das flutuações ambientais é uma exigência prioritária do gerenciamento ambiental para coleções, a favor do uso dos sistemas ativos. Entretanto, os riscos impostos por infestações biológicas ou ação de forças físicas na embalagem, manuseio e transporte de objetos têm geralmente magnitudes bem maiores que os riscos de deterioração físico-química por flutuações ambientais[75].

Os sistemas ativos apenas proporcionam um regime climático diferenciado, que pode ser bom ou ruim para a preservação das coleções (MICHALSKI apud GCI, 2007, p. 28) Problemas com adsorção, dessorção e condensação de umidade podem ocorrer devido ao posicionamento inadequado de grelhas de insuflação (BERNARDI, 2008, p. 27; CAMUFFO apud GCI, 2007). Há que se considerar também a problemática envolvida na relação projetista-fornecedor-fabricante, no mercado de sistemas de ar condicionado. Normalmente os sistemas são dimensionados para fazer frente a extremos climáticos, que ocorrem com pequena frequência (ORESZCZYN et al., 1994, p.1, CONRAD apud GCI, 2007, p. 28).

Diretrizes e aspectos a serem observados quanto ao projeto e especificação de sistemas de ar condicionados para edifícios históricos (a partir das observações de BULLOCK, 1996 e PARK, 1991, 1999): (i) Considerar os usos efetivos do edifício e a real capacidade da instituição para implantar e manter o sistema, buscando simplicidade, viabilidade e eficiência; (ii) Buscar uma equipe multidisciplinar qualificada para um projeto integrado, que deve estar baseado em um diagnóstico do edifício e das coleções; (iii) Conceber e avaliar a viabilidade de diferentes tipos e tamanhos de sistemas; (iv) Padrões restritivos de gerenciamento ambiental adotados em passado recente têm sido flexibilizados; (v) Adotar estratégias bioclimáticas para reduzir a carga térmica; (vi) Uso de vitrines para gerar um microclima para os objetos é uma opção a considerar; (vii) Adotar uma abordagem sistemática que respeite o caráter histórico do edifício e considere seu potencial de adaptação ao novo sistema: sistemas "históricos" ou com baixa tecnologia agregada podem ser mantidos e eventualmente utilizados[76]; (viii) Evitar remoção de materiais e estruturas; (ix) Observar a localização do

[75] (GUTHS, s.d., p. 2; MAEKAWA e TOLEDO, 2001b, p. 1; MICHALSKI apud GCI, 2007, p. 27; TOLEDO, 2010, p. 1; STANIFORTH, 2011, p. 13).

[76] Vide o exemplo estudado por BALOCCO (2008).

sistema para minimizar impactos visuais, provendo condições adequadas de funcionamento e manutenção; (x) Analisar as características do edifício, incluindo todos os fluxos de calor e umidade e padrões de circulação do ar - toda dinâmica climática nova causa impacto sobre os materiais adjacentes; (xi) Treinar a equipe para operação e procedimentos de emergência; (xii) Monitorar o sistema continuamente após a instalação.

CAPÍTULO 3

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E SEU POTENCIAL NA CONSERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO CULTURAL

As ferramentas de simulação computacional são **complementares** às técnicas gerais de **teste e experimentação** específicas de cada área de aplicação, geralmente implicando numa redução de tempo e recursos gastos nessas técnicas tradicionais. CLARKE (2001), KRAMER et al. (2012) e SAMUEL (2006) apresentam um histórico da evolução dessas ferramentas. LI e NIELSEN (2011) discutem o estado da arte da pesquisa para o seu desenvolvimento. Seu embasamento teórico e metodológico pode ser verificado em ASHRAE (2009, cap. 13).

Elas encontram grande aplicabilidade na Ciência da Conservação, pois a previsão e o conhecimento das condições ambientais, seu comportamento e/ou variação temporal e distribuição espacial constituem um dado de entrada para estudos de gerenciamento de riscos, diagnóstico de problemas, elaboração de diretrizes de intervenção. Podem ser extremamente úteis como suporte em tomadas de decisão (CORGNATI e PERINO, 2012, p. 2).

Atualmente, as ferramentas de simulação computacional permitem investigar questões do tipo “e se”, com relação ao desempenho dos edifícios, ambientes, ou microambientes, sob um conjunto de condições reais ou prováveis. É possível averiguar, por exemplo, as respostas dos edifícios e seus sistemas a mudanças na carga térmica, na ventilação natural, no fluxo de visitantes, etc. Profissionais de diversas áreas envolvidos no projeto, construção e manutenção podem utilizar simulações na fase de pré-projeto ou nas fases de avaliação pós-ocupação, para avaliar em que medida os edifícios satisfazem padrões e metas estabelecidos. O uso na fase pós-ocupação tem sido mais frequente, porém a integração nas rotinas de projeto de edificações de maneira geral é ignorada pelos arquitetos, salvo algumas exceções. (MACIEL, 2006; CASSAR e YOUNG, 2001; WU et al., 2011). Uma aplicação extremamente interessante das ferramentas de simulação fluidodinâmica, do ponto de vista do Gerenciamento de Riscos ao Patrimônio Cultural, é a simulação de cenários de incêndio.

Os programas de simulação do edifício como um todo, chamados por CLARKE (2001) de **modelos integrativos**, utilizam códigos que podem ser classificados em dois grupos: (i) redes nodais multizonais; (ii) dinâmica de fluidos computacional (*CFD - Computational Fluid Dynamics*) (CHEN, 2004, p. 1200; HAGHIGHAT e MEGRI, 2007, p.

887). O primeiro grupo pode ser subdividido em programas de simulação energética (*BES – Building Energy Simulation* ou *BEPS – Building Energy Performance Simulation)* e simulação de transferência de calor, ar e umidade em componentes construtivos (*BEHAM - Building Element Heat, Air and Moisture Simulation*) (CÓSTOLA et al., 2011, 2012; ETHERIDGE, 2012; MIRSADEGUI, 2011; SORENSEN e NIELSEN, 2003). Diversos autores têm estudado o acoplamento de modelos dos dois subgrupos - cuja maior dificuldade é o modelamento das trocas de calor convectivas - bem como entre os códigos de rede nodais e de CFD[77].

Essas ferramentas computacionais baseiam-se em rotinas complexas de cálculo numérico e envolvem aplicações de diversos campos do conhecimento das ciências exatas, principalmente da matemática e da física (CLARKE, 2001). Dentre algumas aplicações no campo da Arquitetura e Urbanismo, cabe enumerar: (i) Desempenho higrotérmico, quanto ao conforto ambiental e/ou à eficiência energética; (ii) Clima e ventilação urbanos; (iii) Difusão e/ou dispersão de contaminantes no ar, água ou solo[78]; (iv) Prevenção e controle de enchentes; (v) Ventilação natural e/ou sistemas de condicionamento de ar; (vi) Insolação; (vii) Iluminação natural e artificial; (viii) Prevenção/segurança e comportamento dos materiais e estruturas sob condições de incêndio (CHEN, 2009). O escritório internacional de consultoria em engenharia Arup e Associados acumula, de longa data, experiência neste campo. Um resumo dos casos estudados por esta empresa, que cobre grande parte das aplicações acima pode ser encontrado em ARUP (s.d.).

Uma simulação computacional, em geral, compreende três fases: (i) pré-processamento; (ii) processamento; (iii) pós-processamento. A análise começa na fase de pré-processamento, pelo modelamento matemático-geométrico do problema, com a definição de um **domínio de análise.** A **escala** do domínio pode variar desde a escala urbana, passando pelo edifício, um determinado ambiente até uma vitrine no interior de um ambiente (Figura 2).

---

[77] (ALLARD et al., 1998; ASFOUR e GADI, 2007; AXLEY, 2007; GRIFFTHS e CHEN, 2004; GHIAUS e ALLARD, 2005, p. 76; HAGHIGHAT e MEGRI, 2007; HENSEN, 2004; HOLM et al., 2003; JOHNSON et al., 2012; KARAGIOZIS e SALONVAARA, 2001; KRAMER et al., 2012; KUNZEL et al., 2005; MIRSADEGHI, 2011; STESKENS et al., 2010; TARIKU et al., 2010a, 2010b; TEODOSIU, 2003; TUOMAALA e RAHOLA, 1995; VAN SCHIJNDEL, 2007, 2009; WANG e CHEN, 2007, 2008; ZHAI e CHEN, 2003, 2005, 2006).

[78] Alguns autores chamam essa aplicação de *EFM – Environmental Fluid Mechanics* (BLOCKEN e GUALTIERI, 2012).

Uma diferença entre os dois tipos de códigos de simulação citados acima é a forma como o domínio de análise é **discretizado**. No caso dos códigos nodais multizonais, em geral, cada ambiente do edifício constitui uma ou mais **zonas** em uma **malha estruturada**[79] e os resultados são obtidos para pontos nodais no centro dessas zonas e no centro das superfícies envoltórias de cada uma delas. Já nós códigos de simulação fluidodinâmica, o domínio é discretizado em milhares de volumes de controle ou células, que não necessariamente formam malhas estruturadas. A escolha da forma e tamanho das células da malha é variável e constitui um tema à parte, pois interfere na solução do problema que está sendo modelado (CÓSTOLA, 2006, p. 123).

Depois, ainda na fase de pré-processamento, são definidas as propriedades físicas dos materiais (sólidos, fluidos, misturas, etc.) e também as **condições de contorno e condições iniciais** da simulação. Para SCHELLEN (apud GCI, 2007, p. 78) e YANG (2004, p. 32) essa é a etapa mais importante para que os resultados sejam confiáveis. A definição destas condições, entretanto, não é simples e geralmente introduz incertezas e erros na simulação, especialmente quanto à caracterização do escoamento e superfícies (SORENSEN e NIELSEN, 2003, p. 5). Posteriormente, na fase de processamento são obtidos os resultados desejados para cada problema estudado e na fase de pós-processamento, obtém-se a visualização desses resultados e de outros eventualmente derivados. Os programas de CFD comumente possuem sub-rotinas específicas para cada uma destas etapas. O *Ansys CFX ©,* por exemplo trabalha com módulos separados para tratamento da geometria (*design modeller),* da malha (*CFX mesh*), configurações da simulação (*CFX Pre*), obtenção dos resultados (*CFX solver*) e apresentação dos resultados (*CFX Post*).

Os procedimentos de simulação computacional adotados neste trabalho, incluindo o refinamento da malha adotada, são apresentados na seção 4.6.

3.1- Códigos de redes nodais multizonais

Também chamados de **métodos computacionais interativos** (ASSIS e FERREIRA, 2006), os códigos desta categoria têm sido mais frequentemente utilizados para estudar problemas pertinentes ao desempenho higrotérmico de edifícios visando conforto ambiental

[79] Numa malha estruturada, os pontos nodais formam retas ou curvas paralelas aos eixos do sistema de coordenada (CÓSTOLA, 2006, p. 123; YANG, 2004, p. 44).

humano e/ou à eficiência energética (MENDES et al., 2005). Eles produzem simulações energéticas e/ou higrotérmicas transientes, resolvendo simultaneamente balanços higrotérmicos e de fluxo de ar (balanços de massa e de energia) para cada zona do domínio, considerando as propriedades físicas atribuídas a cada envoltória, a presença de equipamentos (iluminação, ar condicionado, etc.) e pessoas. Geralmente o processamento é feito a partir de um **arquivo climático**, contendo dados horários do clima externo com um ano completo de diversas variáveis, como temperatura, umidade relativa, radiação solar, pluviosidade, etc. Por causa da dependência não linear entre o fluxo de ar e as diferenças de pressão, os modelos necessitam usar métodos numéricos iterativos para solução das equações envolvidas (ALLARD et al., 1998; CHEN, 2009; GRIFFITH e CHEN, 2004; JOHNSON et al., 2012, RODE e WOLOSZYN, 2007).

Os modelos de ventilação mais comuns utilizados nos programas multizonais são o *COMIS* (FEUSTEL, 1999) e o *CONTAM* (DOLS e WALTON, 2002). Dentre os códigos mais populares, cabe enumerar: (i) *BLAST* (AL-RABGHI e HITTLE, 2001); (ii) *DOE-2* (BIRDSALL et al., 1994); (iii) *Energy Plus* (CRAWLEY et al., 2000, 2001); (iv) *BSim*; (v) *TRNSYS*; (vi) *Esp-r* (CLARKE, 2001); (vii) *AIOLOS* (ALLARD, 1998); (viii) *WUFI+* (HOLM et al., 2003); (ix) *HAM* – utilizado por MARTENS (2012) na elaboração de um método de gerenciamento de riscos para os museus holandeses (CÓSTOLA, 2012; SCHELLEN e VAN SCHIJNDEL, 2007).

Uma descrição detalhada dos programas acima e de cerca de outros 250 programas pode ser consultada no diretório de programas de eficiência energética para edifícios (*Building Energy Software Tools Directory*) do DOE - Departamento de Energia dos Estados Unidos[80].

AXLEY (2007) e HAGHIGHAT e MEGRI (2007) fazem um histórico do embasamento teórico e desenvolvimento dos códigos multizonais. CÓSTOLA (2006, cap. 10) estuda a fundamentação teórica dos modelos de cálculo de vazões internas comumente utilizados neste tipo de código. JANSSENS et al. (2008) listam os códigos multizonais utilizados na tarefa 41 da Agência Internacional de Energia e comparam seus modelos de cálculo de umidade com os dos modelos CFD. JOHNSON et al. (2012) compararam os

[80] http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/ (Acesso em 20/09/2012).

resultados de diversos códigos multizonais, para estudos de caso padronizados, em diversas situações de ventilação natural. MENDES et al. (2005) apresentam uma síntese do desenvolvimento de pesquisas relacionadas à área de simulação do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil, nas quais os códigos multizonais têm sido utilizados. OROSA e OLIVEIRA (2011) revisaram as aplicações de programas deste tipo à pesquisa de sistemas de climatização.

Dentre as limitações deste tipo de código, cabe destacar: (i) os efeitos viscosos no deslocamento do ar (equações de momento) não são considerados; (ii) o fluxo de ar é função apenas das diferenças de pressão; (iii) não permitem estudar distribuições espaciais (p. ex. temperatura e umidade do ar, contaminantes atmosféricos) dentro de cada zona – as variáveis calculadas são consideradas uniformemente distribuídas em cada zona; (iv) não permitem estudar deposição de partículas[81].

O DOE fornece gratuitamente o programa *Energy Plus* ©[82], utilizado neste trabalho. O programa foi escolhido para as simulações higrotérmicas, em função da gratuidade e porque combina recursos dos programas *BLAST* e *DOE-2*, permitindo a simulação de aquecimento, refrigeração, ventilação, iluminação e outros fluxos relacionados ao desempenho higrotérmico e energético dos edifícios. Sua interface não é muito amigável, mas permite a importação de modelos desenhados no programa *SketchUp* ©, por meio do *plugin OpenStudio*, facilitando o trabalho de entrada dos dados. ZHAI e CHEN (2003, p. 493) apontam como uma das limitações do programa a suposição de que o ar em cada zona está uniformemente misturado e o uso de modelos empíricos para estimar as trocas de calor convectivas com as superfícies envoltórias. Essas limitações são especialmente relevantes para ambientes com grande estratificação da temperatura do ar, por exemplo, em salas com grande pé-direito. HONG et al. (2011) utilizaram o *Energy Plus* © para comparar o consumo energético dos arquivos nacionais do Reino Unido em diferentes cenários, considerando mudanças na densidade de ocupação nas reservas técnicas, mudanças no edifício, na operação do sistema de climatização e nas cargas térmicas de origem externa e interna.

[81] (ASFOUR e GADI, 2007; CHEN, 2009; SAMUEL, 2006; SAMUEL e STRACHAN, 2005; WANG e CHEN, 2007, 2008).

[82] http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/ (Acesso em 20/09/2012).

3.2- Códigos de dinâmica de fluidos computacional

Os códigos de CFD permitem uma avaliação ambiental completa do ambiente projetado e têm sido também aplicados com vistas ao aperfeiçoamento do gerenciamento ambiental para coleções. Trata-se de um campo multidisciplinar do conhecimento que trabalha com a predição e análise de escoamento de fluidos. Eles possibilitam o estudo de fenômenos cuja análise é difícil ou inviável em verdadeira grandeza, no mundo real, como situações de incêndio, explosões ou enchentes, ensaios com objetos de grandes dimensões, p. ex., edifícios, aviões ou navios, ou envolvendo contaminantes diversos (poluição, radiação, agentes biológicos, etc.)

Nos modelos de simulação fluidodinâmica, considera-se que há conservação de massa, momento e energia no domínio de análise. Após a definição da malha e sua discretização, é necessário escolher o modelo numérico que descreve adequadamente os fenômenos físicos envolvidos (escoamento laminar e/ou turbulento, adsorção de vapor nas superfícies, mudança de fase, etc.). Depois da definição e configuração das condições de contorno, são estabelecidas as condições iniciais da simulação e os parâmetros físicos matemáticos do algoritmo (número de iterações, intervalo temporal, critério de convergência, etc.)

Na fase de processamento, dentro de cada volume de controle na malha, são resolvidas simultaneamente diversas **equações diferenciais parciais** – equações de Navier-Stokes – as quais envolvem múltiplos termos em que aparecem **velocidade** (u,v,w) **pressão** (p), **temperatura** (*T*), **energia** (*E*) e **densidade** (ρ). Cada uma dessas variáveis é descrita por uma função dependente do tempo (t) e das coordenadas espaciais que melhor se adequem ao problema (cartesianas, polares, cilíndricas, esféricas ou generalizadas, se o domínio for muito irregular; os sistemas de coordenadas podem ser transformados entre si, mediante funções matemáticas).

Em cada volume, considera-se que há conservação de massa, momento e energia, e o balanço dessas propriedades pode ser descrito, em síntese, como:

$$\begin{matrix}\textit{Parcela acumulada}\\ \textit{(termo transiente)}\end{matrix} = \left(\begin{matrix}\textit{Parcela}\\ \textit{transportada por}\\ \textit{difusão}\end{matrix} - \begin{matrix}\textit{Parcela}\\ \textit{transportada por}\\ \textit{convecção}\end{matrix} \right) + \begin{matrix}\textit{Parcela gerada}\\ \textit{(fonte)}\end{matrix} \qquad (1)$$

Em notação vetorial, escreve-se a eq. (1) como

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho\phi \quad = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi - \phi\rho\,\mathbf{u}) + S \tag{2}$$

Onde ϕ é a propriedade considerada, Γ e S correspondem respectivamente a termos de fluxo (difusividade) e geração para cada propriedade e **u** é o vetor velocidade do escoamento. A eq. (2) é chamada de **equação de transporte** da propriedade ϕ (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007, p. 25 e 26). Desdobrada nos balanços de massa, momento (quantidade de movimento) e energia, a eq. (2) pode ser escrita como:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial\rho u}{\partial x} + \frac{\partial\rho v}{\partial y} + \frac{\partial\rho w}{\partial z} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho\,\mathbf{u}\right] = 0 \tag{3}$$

$$\rho\left(\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{u} + \mathbf{u}\cdot\nabla\mathbf{u}\right) = -\nabla p + \mu\nabla^2\mathbf{u} + \rho\mathbf{g} \tag{4}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + \rho g_x \tag{5}$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial t} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) + \rho g_y \tag{6}$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) + \rho g_z \tag{7}$$

$$\nabla \cdot H\rho\mathbf{u} = \nabla \cdot k\nabla T + S_h \tag{8}$$

Onde

u é o vetor velocidade, decomponível nos escalares *u*, *w*, e *v*, respectivamente nas direções x, y, e z;

g é o vetor da gravidade, decomponível nos escalares g_x, g_y, e g_z;

H é a entalpia;

k é a condutividade térmica;

μ é a viscosidade;

a eq. (3) é a equação de continuidade;

a eq. (4) é a equação de momento para um fluido newtoniano com densidade e viscosidade constantes em notação vetorial, desdobrada em coordenadas cartesianas nas equações (5, 6, e 7);

a eq. (8) é a equação de energia, simplificada (fluxo laminar sem dissipação viscosa) em notação vetorial[83].

Conforme descrito na metodologia apresentada no Capítulo 4, neste trabalho as simulações fluidodinâmicas foram realizadas considerando uma condição isotérmica, sem resolver, portanto, a eq. (8).

Para descrever o fenômeno da turbulência, é necessário incorporar termos adicionais às equações acima, denominados *tensores de Reynolds* (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007, p. 65). Há diversas opções de modelos físico-matemáticos para solução numérica de problemas considerando esse fenômeno[84].

As equações **discretizadas** para cada volume de controle são resolvidas **iterativamente** (em cada intervalo de tempo previamente definido)**.** Para a discretização das equações pode-se utilizar as seguintes técnicas: **(i) diferenças finitas –** os resultados são obtidos para pontos nodais no centro de cada volume de controle, utilizando-se aproximações de primeira e segunda ordem e malhas estruturadas; **(ii) elementos finitos –** técnica usada para calcular tensões em materiais sólidos, também aplicável em fluidodinâmica, usa funções

[83] Para mais detalhes sobre o embasamento físico-matemático dos códigos CFD, consulte-se (ALLARD et al., 1998, apêndice B; APSLEY, 2012; AWBI, 2005, cap. 8; 2008, cap. 4; BAKKER, s.d.; BRÄNNBACKA, s.d.; CLARKE, 2001; DATE, 2005; ETHERIDGE, 2012, cap. 9; GHIAUS e ALLARD, 2005, cap. 3; LOOMANS, 2004; MIRSADEGHI, 2011; SORENSEN e NIELSEN, 2003; WANG E CHEN, 2008; WOOLFSON, 1999; YANG, 2004; ZEVENHOVEN, 2012; ZUO, 2005).

[84] O modelamento físico matemático de fluxos turbulentos é bastante complexo. Entre os modelos mais comuns utilizados, pode-se enumerar: *RANS - Reynolds-averaged Navier–Stokes equations* (aproximação de Boussinesq, modelo k-ε), *RNG – Renormalization Group (*modelo k-ε), *RSM - Reynolds Stress Model, SST – Shear Stress Transport* (modelo k-ω), *LES – Large Eddy Simulations, DES – Detached Eddy Simulation, PDF – Possibility Density Functions*. CÓSTOLA (2006, p. 125) e YANG (2004, p. 47) apresentam um quadro comparando os modelos de turbulência em termos de sua hierarquia. Para mais detalhes, consultar (ALLARD et al., 1998, apêndice B; APSLEY, 2012; ASHRAE, 2009, cap. 13; AWBI, 2005, cap.8; 2008, p. 26; BAKKER, s.d.; BRÄNNBACKA, s.d.; CLARKE, 2001; DATE, 2005; ETHERIDGE, 1996, cap. 9; EVOLA e POPOV, 2006; GHIAUS e ALLARD, 2005, cap. 3; LOOMANS, 2004; MIRSADEGHI, 2011; PAPAKONSTANTINOU et al., 2000a; SORENSEN e NIELSEN, 2003; VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007, cap. 3; WANG e CHEN, 2008; WOOLFSON, 1999; YANG, 2004; ZEVENHOVEN, 2012; ZUO, 2005).

de ponderação e pode ser usada para malhas não estruturadas, por exemplo, utilizando triângulos como elementos de controle; **(iii) volumes finitos –** integra o balanço físico das propriedades avaliadas no domínio ao modelamento matemático, permitindo o uso de malhas não estruturadas.

Como as equações são altamente não lineares, elas não podem ser resolvidas por métodos **explícitos ou analíticos** (modelos fechados), mas apenas por métodos **numéricos** que fornecem uma **aproximação** da solução exata – daí a importância dos **critérios de convergência**. Geralmente o critério utilizado é de comparar as mudanças na solução de uma iteração para outra. Podem-se monitorar os "resíduos" (desvios quadráticos médios) ou o momento em que o balanço das propriedades é atingido.

Após atingir o critério de convergência, os resultados são **pós-processados**, para extrair quantidades derivadas. Um recurso interessante oferecido pelas ferramentas de simulação CFD é a visualização, na etapa de pós-processamento, da **distribuição espacial e/ou temporal** das variáveis ambientais calculadas e de outras derivadas delas, como por exemplo, as métricas de preservação estudadas neste trabalho (vide Apêndice A). Normalmente as interfaces de visualização dos resultados permitem rotacionar e navegar por partes do modelo interativamente, ampliar detalhes, e ver os resultados projetados em planos de corte ortogonais ou inclinados. Esse é um importante **recurso de comunicação e consulta** – etapa fundamental no gerenciamento de riscos para coleções – e que permite, por parte de profissionais não habituados com a complexidade dos fenômenos da física, uma **compreensão visual** dos resultados das simulações. Isso pode ser determinante em uma tomada de decisão ou aprovação de um orçamento (HUSSEIN e EL-SHISHINY, 2009, KINNEAR et al., 2006).

Entre os códigos CFD comerciais mais populares podemos citar o *PHOENICS* © [85], o *COMSOL* © [86] e o *Ansys CFX* © [87], utilizado neste trabalho. Uma lista bastante completa de códigos CFD de uso livre e comerciais pode ser obtida no *site* CFD Online[88]. Dentre os

[85] http://www.cham.co.uk/ (Acesso em 22/09/2012).
[86] http://www.comsol.com/ (Acesso em 22/09/2012).
[87] http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/ANSYS+CFX (Acesso em 22/09/2012).
[88] http://www.cfd-online.com/Links/soft.html (Acesso em 20/09/2012).

códigos gratuitos cabe destacar o *OPEN FOAM*[89]. CLARKE (2001) analisa a **usabilidade**[90] dos programas em termos de parâmetros como validação, interface, incertezas e aplicações. AWBI (2005, apêndice B) descreve os recursos de alguns códigos de uso livre e comerciais.

3.3- Aplicações de simulações computacionais ao gerenciamento ambiental de coleções

Uma possibilidade oferecida pelas ferramentas computacionais que interessa à preservação do Patrimônio Cultural é a **simulação de cenários** climáticos passados e/ou futuros, permitindo a exploração de causas que originaram as atuais condições de conservação de um determinado objeto, ou estudos preditivos dessas condições no futuro, considerando uma determinada progressão dos vários condicionantes envolvidos[91]. Outro aspecto é o estudo de estratégias de controle mais adequadas ao gerenciamento ambiental das coleções, por exemplo: como e quando ventilar, quando aquecer ou resfriar, qual a proporção adequada na mistura do ar externo com o interno, etc. No tocante à ventilação, a obtenção de **linhas de corrente** ou **campos de velocidade** permite estudar como a circulação do ar pode interagir com os objetos, por exemplo, quanto à deposição de particulados.

Uma fronteira no estado da arte das simulações computacionais aplicadas à preservação é a simulação do comportamento físico-químico dos materiais, sob diferentes condições ambientais[92]. Alguns trabalhos mais recentes investigam a aplicação de códigos de simulação ao **modelamento inverso** (*inverse modelling*) para obtenção das propriedades

---

[89] http://www.openfoam.com/ (Acesso em 03/11/2013).

[90] Medida na qual um produto pode ser usado por usuários específicos para alcançar objetivos específicos com eficácia, eficiência e satisfação em um contexto específico de uso. O termo usabilidade é empregado algumas vezes para referenciar mais precisamente os atributos de um produto que o tornam mais fácil de usar. O termo refere-se também ao conjunto de atributos que evidenciam o esforço necessário para se poder utilizar um programa, bem como o julgamento individual desse uso, por um conjunto explícito ou implícito de usuários (ABNT, 2011a).

[91] (BERNARDI, 2008, p.108; BLADES et al., 2006; BRIMBLECOMBE, 2012; BRIMBLECOMBE e GROSSI, 2006; CASSAR, 2005, 2011; CASSAR e TAYLOR, 2004; CHASSAGNE et al., 2007; HONG et al., 2011; HUIJBREGTS et al., 2012; LANKESTER e BRIMBLECOMB, 2012; MALAURENT et al., 2006; MARTENS, 2012; SABBIONI et al., 2007, 2010; SULAIMAN et al., 2010; TAYLOR et al., 2005; VAN SCHIJNDEL et al., 2010; ZANIRATO, 2010).

[92] (ASTRUP et al., 2005; BOU SAID, 2003; CHASSAGNE et al., 2005, 2007; DROIN-JOSSERAND, 1988, 1989; DUBOIS et al., s.d.; REMKI et al., 2012; SCHELLEN, 2002; SCHELLEN e VAN SCHIJNDEL, 2011; YOUNSI et al., 2006).

físicas de materiais e componentes de construção empregados em edifícios existentes, a partir de medições climáticas *in loco* (KRAMER et al., 2012, 2013; KRAMER e VAN SCHIJNDEL, 2012).

Os resultados das simulações precisam de alguma forma ser **verificados** e **validados**, para tentar medir sua credibilidade, e passar por uma **análise de incertezas**, a partir das suposições e simplificações adotadas no modelo. Comumente fazem-se ensaios com modelos reduzidos (maquetes) em túnel de vento, com essa finalidade. Os modelos utilizados em simulações computacionais ou em túnel de vento são baseados em diversas hipóteses que os diferenciam da situação real em estudo. Por exemplo, considerar uma parede como uma superfície totalmente coplanar e homogênea pode introduzir erros significativos, dependendo do problema estudado. Entre outros erros comuns pode-se incluir a suposição de escoamentos laminares em problemas que envolvem turbulência, negligenciar efeitos de empuxo em problemas de convecção natural, e simplificações inadequadas da geometria do domínio. Inconsistências no modelo podem ser reveladas por meio de **análises de sensibilidade**, em que alguns parâmetros (por exemplo, as propriedades dos materiais em uma parede) são alterados propositadamente para testar se o modelo responde de forma coerente[93] (vide seções 4.6.2.2 e 5.2.2.1).

Segundo CORREA (2003),

> Muitas avaliações empíricas também têm sido feitas por meio de museus brasileiros que vêm aplicando alguns dos métodos de monitoramento, porém, dificilmente estas experiências têm tido algum acompanhamento científico que comprove os ganhos ou perdas efetivas tidas com estes sistemas. Ou seja, pode-se avaliar o quanto os ambientes estão dentro ou fora dos limites estabelecidos, mas nem sempre se comprova o quanto isto está afetando o acervo, ou se, os problemas que são apresentados pelo acervo realmente são resultado das condições climáticas, ou ainda, se são decorrentes de características construtivas inadequadas (CORREA, 2003, p. 3).

As ferramentas de simulação CFD investigadas neste trabalho prestam-se ao tipo de avaliação de ganhos ou perdas dos sistemas apontados por Correa acima. Contudo, é certo que o nível de dificuldade e conhecimentos exigidos para o uso correto dessas ferramentas dificulta ou até inviabiliza o seu uso. Isso sem mencionar o custo dos programas comerciais. Embora haja alguns códigos gratuitos disponíveis na internet, geralmente eles não têm

[93] (BLOCKEN e GUALTIERI, 2012, p.4; HENRY apud GCI, 2007, p.78; McDONALD et al., 1999; ROACHE, 1997; SORENSEN e NIELSEN, 2003; STERN et al., 2006; WESTPHAL e LAMBERTS, 2005; YANG, 2004, p. 58; ZHAI e CHEN, 2006).

interfaces amigáveis e se destinam a trabalhos acadêmicos experimentais (WESTPHAL e LAMBERTS, 2005). Uma exceção é o programa *Fluxovento* (CARVALHO et al., 2005a), que pode ser útil em avaliações expeditas, bidimensionais, de movimento do ar nos ambientes. Uma alternativa para o estudo qualitativo do comportamento do ar nos edifícios é o uso de **mesas de água** (TOLEDO e PEREIRA, 2003, 2004). CHEN (2009) revisou 112 trabalhos sobre simulação de ventilação em edifícios publicados em 2008 e constatou que as ferramentas de CFD foram utilizadas em 70% deles, dez vezes mais que os trabalhos utilizando códigos multizonais. Isso demonstra a popularidade dos códigos CFD no meio acadêmico.

CLARKE (2001, p. 282) discute porque procedimentos de validação de simulações computacionais utilizando modelos reduzidos em túnel de vento são em geral mais viáveis que procedimentos realizados em escala real, nos edifícios estudados. Ele também sumariza diversos estudos da literatura específica sobre validação de simulações computacionais de edifícios, ressaltando o uso de análises de sensibilidade com essa finalidade. ASHRAE (2009, p. 16.5), DRIVAS et al. (1972) e ROULET (2008, p. 12) descrevem o uso de gases traçadores para caracterizar a eficácia da ventilação ou a contaminação de ambientes.

Além da aplicação ao estudo do consumo energético em museus, comentado na seção 2.4, as ferramentas de simulação computacional têm sido também utilizadas para estudar outros aspectos pertinentes ao gerenciamento ambiental e conservação preventiva de coleções. Observa-se na literatura uma predominância de trabalhos de autores italianos e holandeses. Na Itália, destacam-se os trabalhos de Carla Balocco, da Faculdade de Engenharia da Universidade de Estudos de Florença. Na Holanda, o grupo de pesquisa dos profs. Van Schijndel e Schellen da Universidade Técnica de Eindhoven trabalha, há quase quarenta anos, com simulação computacional de edificações[94]. A produção científica do grupo voltada para a preservação do Patrimônio Cultural é relatada por SCHELLEN e VAN SHIJNDEL (2007).

BUORO et al. (2007) estudaram o desempenho ambiental de uma Capela em São Paulo, utilizando códigos de simulação térmica multimodal e de fluidodinâmica para obter o campo de velocidades no interior da mesma. A análise da ventilação voltou-se ao conforto dos

[94] http://w3.bwk.tue.nl/en/bwk_nieuw/medewerkers/organisatie/units/sub_department_bps/ (Acesso em 03/10/2012). Os trabalhos do grupo sobre aquecimento para conservação foram comentados acima, na seção 2.4.2 e alguns detalhes sobre mudanças dimensionais na madeira são comentados na seção A.4 do Apêndice A.

usuários, enquanto que o projeto luminotécnico, segundo os autores, levou em consideração critérios relacionados à preservação arquitetônica do edifício.

CORBELLA e YANNAS (2003) utilizaram um código monozonal para simular a temperatura no atelier do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro e compararam os resultados com valores medidos no local.

ALBERO et al. (2004), GIAVARINI (2001) e SANTARELLI et al. (2009) utilizaram simulações computacionais respectivamente da ventilação e das tensões na estrutura, como auxiliares no diagnóstico e recomendações para conservação das pinturas murais da *Domus Aurea* de Nero, em Roma. Os autores relatam as diversas condições de contorno consideradas, seu impacto no resultado das simulações e comentam a aplicabilidade das ferramentas de simulação neste tipo de estudo.

ASCIONE e MINICHIELLO (2010) utilizaram códigos do tipo BES e CFD para comparar o desempenho de difusores de ar para museus, simulando e examinando a distribuição espacial de temperatura e umidade relativa, para uma sala de exposições "típica".

BAGGIO et al. (2004) analisam o microclima da *Capela Scrovegni*, em Pádua, onde estão pintados afrescos do artista Giotto. Foram usadas simulações fluidodinâmicas para estudar o impacto de contaminantes atmosféricos e ocupação humana. Os autores discutem os resultados em termos de fluxo, temperatura e umidade relativa do ar, temperaturas superficiais, e os comparam com medições feitas *in loco.*

BALOCCO (2006, 2007a) usou um código CFD para simular o movimento do ar em salões do *Palazzo Vechio* em Florença. A autora testou variações e interações entre o microclima interno e as condições externas, o desempenho higrotérmico do edifício, relacionando-as com aspectos de iluminação, presença de visitantes e o sistema de ventilação. Balocco detalha as condições de contorno e propriedades dos materiais adotadas na simulação e apresenta as variáveis climáticas simuladas, avaliando sua influência na coleção de tapeçarias presente no local. Foram utilizados dados climáticos de um dia de verão escolhido entre os dados do ano climático de referência para Florença. BALOCCO e GRAZZINI (2007) avaliaram a instalação de painéis aquecedores no piso de outro salão do mesmo edifício, também utilizando simulações fluidodinâmicas e monitoramento ambiental, desta vez utilizando os dados do dia mais frio no ano climático de referência. Balocco publicou um

estudo semelhante para o Edifício *Marchesi*, sede da biblioteca pública de Palermo, em que os resultados da simulação foram comparados com dados medidos *in loco* (BALOCCO, 2007b).

BALOCCO (2008), PROCINO et al. (2008) e BALOCCO et al. (2009) estudaram o sistema de ventilação natural de outro palácio em Florença, o *Palazzo Pitti*. Neste estudo os autores empregaram técnicas de Velocimetria por Imageamento de Partículas *(PIV – Particle Image Velocimetry)*, em túnel de vento, semelhantes às utilizadas neste trabalho, para a validação dos resultados das simulações computacionais. As condições de contorno e propriedades dos materiais consideradas são informadas nos artigos. A simulação foi feita para o dia mais quente do verão, dado do ano climático de referência. As velocidades adotadas no túnel de vento (~ 2 a 4m/s) parecem não ter considerado uma análise dimensional e os autores não discutem se houve similaridade.

BROSTROM et al (2013) avaliaram diferentes estratégias de controle microclimático, incluindo controle passivo, aquecimento umidostático, controle de umidade para sorção constante e controle por meio de flutuações livres, utilizando simulações computacionais higrotérmicas.

BULLOCK (1996) discute como os fatores temperatura, umidade relativa, luz, fluxo de ar e deposição de particulados foram considerados no projeto do sistema de climatização da Capela Sistina no Vaticano e apresenta diretrizes gerais para o projeto de sistemas similares em outros edifícios especiais. Um código CFD foi usado para estudar as condições climáticas internas, ao longo do ano considerando a influência do clima externo, equipamentos e ocupação humana.

BRATASZ (s.d., 2013a), BRATASZ e RACHWAL (2010), BRATASZ et al. (2007a, 2011), RACHWAL et al. (2012a, 2012b) e JAKIELA et al. (2008) utilizaram simulações numéricas através de métodos de elementos finitos para estudar o comportamento de camadas pictóricas sobre suportes de madeira, perante flutuações climáticas. Seus resultados incluem a determinação de zonas de risco de fissuração em relação às flutuações.

CARDINALE et al. (2011) mediram *in situ* as propriedades térmicas de envoltórias de edifícios históricos e utilizaram os valores médios encontrados em simulações com o programa *Energy Plus* © comparando os resultados da simulação com os do monitoramento ambiental.

CHANG e FALK (2009) avaliaram a permanência de contaminantes atmosféricos em um arquivo, acoplando ao modelo CFD o cálculo da Idade Média do Ar *(LMA – Local Mean Age of Air).* Esse parâmetro pode ser utilizado como uma medida da eficiência da ventilação na remoção de poluentes (BARTAK et al., 2001; COSTANZO et al., 2007; ETHERIDGE, 2012, cap. 8; SIMONS et al., 1999).

CHRISTENSEN et al. (2010), CHRISTENSEN e JANSSEN (2011) utilizaram um código multizonal para estudar o desempenho higrotérmico de um edifício com paredes de concreto, construído especificamente para abrigar uma reserva técnica e compararam os resultados com medições realizadas *in loco*. Os autores discutem e adotam uma simplificação unidimensional das trocas térmicas no piso. Eles verificaram que, quatro anos após a inauguração, o ambiente interno ainda não havia atingido um equilíbrio hígrico, mesmo com o sistema de climatização produzindo desumidificação continuamente.

CORGNATI e PERINO (2012) aplicaram simulações fluidodinâmicas na otimização da ventilação natural na Sala do Senado, no *Palazzo Madama*, em Turim. São relatadas as condições de contorno, o processo de refinamento da malha e as linhas de corrente obtidas.

DE SANTIOLI et al. (2004, 2006) testaram, por meio de simulações fluidodinâmicas, algumas alternativas para melhoria do sistema de ar condicionado da Galeria da Academia de Florença, especificamente para proteção da estátua de Davi esculpida por Michelângelo. A melhor opção resultou em uma cortina de ar ascendente que protege a estátua dos poluentes atmosféricos, podendo ser combinada com um exaustor. O modelo tridimensional da estátua foi obtido a partir de uma nuvem de pontos resultante de escaneamento tridimensional a *laser*, utilizando uma técnica semelhante à que foi utilizada neste trabalho. Os autores discutem os procedimentos para refinamento da malha de simulação adotada. Em artigos posteriores, os autores estudam os efeitos erosivos provocados pelos sistemas propostos (DE SANTIOLI et al., 2007, 2010).

DE SANTIOLI e MARIOTTI (2007) analisaram o sistema de ventilação natural do templo de Hércules Vencedor em Tivoli, por meio de simulação CFD. Os autores informaram as condições de contorno adotadas o os campos de velocidade, temperatura e umidade relativa obtidos na simulação, mas não comentam quanto à validação dos resultados.

KHALIL (2006, 2009, 2010, 2012), KHALIL e ABDEL-AZIZ (2006) examinaram, por meio de simulações fluidodinâmicas, o sistema de ventilação forçada para algumas

tumbas no Vale dos Reis, no Egito, entre elas a do famoso rei Tutancâmon. Eles discutem a influência de diversos fatores ambientais na deterioração das pinturas murais dos túmulos, incluindo o fluxo de ar, o perfil térmico e a umidade difundida pelos visitantes no ar, bem como a dispersão de CO_2. No artigo mais recente, os autores aperfeiçoaram o modelamento dos visitantes substituindo prismas de base retangular por prismas de base elíptica. A partir das características dos sistemas foi determinado o número máximo de visitantes permitidos dentro das tumbas.

LACANETTE (2010), LACANETTE e MALAURENT (2010), LACANETTE et al., (2007, 2009) e MALAURENT et al. (2006) estudaram diferentes cenários climáticos no interior da Caverna de Lascaux, por meio de simulações fluidodinâmicas, considerando um escoamento laminar. O objetivo do estudo foi determinar com precisão zonas de risco de condensação. Os autores caracterizam o comportamento higrotérmico da caverna e discutem a evolução das mudanças nos níveis de temperatura e umidade relativa, fluxo de ar, convecção natural, influência da ocupação, entre outros aspectos. Por meio das simulações foi possível confirmar hipóteses levantadas por estudos anteriores, que determinaram o fechamento da caverna na década de 1960.

LIMPENS-NEILEN (2006), LIMPENS-NEILEN et al. (2004, 2005a, 2005b), e SCHOFFELEN et al. (2004) pesquisaram a distribuição espacial da temperatura determinada por sistemas de aquecimento localizado para bancos de igrejas, comparando os resultados obtidos por meio de simulações fluidodinâmicas com medições em escala real, utilizando inclusive manequins térmicos para simular os ganhos térmicos devidos à ocupação. KOZŁOWSKI (2010) apresenta resultados de monitoramento ambiental pós-instalação em sistemas similares.

LONY et al. (2011) e VAN SCHIJNDEL et al. (2005, 2008) utilizaram modelos de simulação que integram o desempenho ao nível da sala e do mobiliário, para estudar o desempenho de sistemas de climatização compactos e individualizados.

MECKLENBURG (2007a, 2007b, 2010) utilizou um programa de simulação baseado em algoritmos de elementos finitos para simular tensões estruturais em camadas pictóricas, decorrentes de flutuações ambientais, visando à determinação de faixas aceitáveis de flutuação de temperatura e umidade relativa. MICHALSKI (2010, 2013) apresenta um algoritmo de para simulação da probabilidade de fratura em camadas pictóricas sobre painéis

de madeira, integrado a um modelo de análise de riscos e revisa de maneira ampla todos os aspectos físicos envolvidos no modelo. WILLIGEN (1999) estuda o modelamento matemático de tensões mecânicas em pinturas devidas ao comportamento mecânico das camadas pictóricas e como esse comportamento se altera com o envelhecimento das obras.

PAPADOPOULOS et al. (2008) utilizaram um código multizonal para simular as condições ambientais em uma torre histórica adaptada para ser museu, testando diferentes estratégias de controle da ventilação.

PAPAKONSTANTINOU et al. (2000a) simularam o movimento do ar no *hall* principal do Museu Arqueológico de Atenas e compararam a influência do uso de diferentes modelos de turbulência nos resultados. A análise também levou em consideração aspectos de conforto ambiental humano.

SAMUEL (2006) e SAMUEL e STRACHAN (2005) investigaram a integração da simulação de transporte e deposição de particulados à simulação ambiental do edifício como um todo, e os refinamentos possíveis nos modelos físico-matemáticos utilizados. Os autores consideraram reações entre os contaminantes, em função de sua concentração e da influência do edifício nos fluxos e pressão do escoamento. Foram feitos testes de validação analítica e empírica e um estudo de caso é apresentado.

ŠIJANEC ZAVRL (2004) simulou o gradiente térmico interno e a distribuição bidimensional da temperatura na superfície de paredes espessas em edifícios históricos eslovenos e suecos. A validação dos resultados foi feita através de medições *in loco*.

STEEMAN et al. (2010) utilizaram a simulação com um código multimodal (*TRNSYS*) para estudar as interações higrotérmicas da envoltória de uma biblioteca da Universidade de Ghent com o seu acervo, visando o diagnóstico e melhoria das condições de conservação da coleção de obras raras. Entre outros resultados, os autores apresentam os índices de desempenho do ambiente estudado em termos do sistema de classificação da ASHRAE (vide Quadro 2). Para analisar os aspectos de conforto ambiental humano, os autores adotaram um modelo adaptativo.

VAN SCHIJNDEL et al. (2010) simularam a performance do sistema de climatização do Depósito Naval Holandês, em caso de falha do sistema, utilizando um código multizonal. O modelo previu a evolução da temperatura e da umidade relativa na hipótese do sistema ter

que trabalhar somente recirculando o ar. Os autores constataram por meio da simulação o efeito da grande estanqueidade higrotérmica do edifício e o bom desempenho do sistema, que seria capaz de manter o ambiente razoavelmente estável por mais de uma semana após a falha.

WU et al. (2011) verificaram, por meio de simulações fluidodinâmicas, o desempenho da ventilação natural do Centro Cultural Jean-Marie Tjibaou, projetado pelo arquiteto Renzo Piano, localizado na Nova Caledônia. Os resultados foram comparados com os objetivos descritos pelo arquiteto em termos dos modos de funcionamento do sistema de ventilação natural e modificações no desenho original foram propostas de modo a melhorar o desempenho dos edifícios.

Na área de Arquitetura e Urbanismo os códigos CFD têm sido utilizados em estudos de **ventilação urbana**, ao nível de grupos de edifícios. Nessa escala, encontram-se na literatura trabalhos que utilizam os códigos em estudos visando à preservação de conjuntos históricos monumentais. HUSSEIN e EL-SHISHINY (2009) estudaram o impacto do vento contaminado com areia sobre os monumentos do Planalto de Gizé e confirmaram resultados de estudos diagnósticos anteriores. Os autores discutem as condições de contorno adotadas nas simulações, e a metodologia utilizada, desde a obtenção do modelo digital a partir de uma nuvem de pontos, como se fez neste trabalho, até a adaptação e refinamento da malha de simulação e a visualização dos resultados.

Cabe destacar o pioneirismo deste trabalho em nível nacional, ao lidar com simulações computacionais, em especial as simulações fluidodinâmicas, aliadas ao uso de métricas de preservação, aplicadas como ferramentas diagnósticas à conservação preventiva do Patrimônio Cultural. Essa investigação vem dar sequência e ampliar a abrangência das linhas de pesquisa desenvolvidas no LACICOR, abrindo um grande leque em termos de possibilidade de aplicações, projetos e parcerias futuras.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1- Etapas de desenvolvimento do trabalho

O trabalho foi desenvolvido nas seguintes macro etapas: (i) revisão bibliográfica; (ii) definição de estudos de caso; (iii) aferição de equipamentos; (iv) medições contínuas em campo; (v) levantamentos fotográfico e arquitetônico, incluindo escaneamento tridimensional da Capela da Ceia e elaboração de maquetes eletrônicas e físicas; (vi) simulações computacionais; (vii) ensaios em túnel de vento; (viii) correção das condições de contorno das simulações fluidodinâmicas; (ix) tratamento, análise e discussão dos dados obtidos nas medições em campo e simulações; (x) redação do texto final.

Para a revisão bibliográfica foram pesquisados e classificados cerca de 700 itens, entre livros, artigos de periódicos científicos, apostilas, cadernos técnicos, congressos, material didático e outros. Foi gerado um banco de dados no programa *Endnote* ©, com mais de 580 referências, que serão disponibilizadas para facilitar o trabalho de pesquisadores da área.

Este trabalho se propôs a realizar uma transposição de procedimentos e enfoques comumente adotados nas Ciências Exatas para a área da Ciência do Patrimônio, conforme discute o Capítulo 1. Procurou-se compatibilizar os cuidados necessários em termos de aferição e utilização correta dos equipamentos utilizados, processamento e análise estatística dos resultados com o prazo estabelecido para a realização do trabalho e dificuldades encontradas em campo e em laboratório. Buscou-se ainda sintetizar a grande gama de dados estudados e resultados obtidos em parâmetros e indicadores (métricas de preservação) de fácil compreensão para os profissionais diretamente envolvidos com a preservação cotidiana do Patrimônio Cultural.

4.2– Definição e descrição do estudo de caso

A investigação foi feita por meio de um estudo de caso: a Capela da Ceia, no Santuário de Bom Jesus de Matosinhos, em Congonhas, Minas Gerais.

Inicialmente estavam previstos quatro estudos de caso, escolhidos por sua localização geográfica, de forma a abranger as quatro zonas definidas no zoneamento bioclimático de

Minas Gerais[95], pois anteriormente ao exame de qualificação, os objetivos deste trabalho incluíam a obtenção de recomendações de Conservação Preventiva específicas para cada zona bioclimática do Estado. O trabalho foi iniciado com medições em campo em três outros locais: o Museu do Diamante, em Diamantina, o Museu da Cidade, em Governador Valadares e a Casa da Memória do Vale do São Francisco, em Januária.

Na escolha desses casos foram consideradas também a importância e relevância do acervo, avaliadas com o mesmo peso que a dificuldade ou facilidade de acesso institucional. Consideraram-se ainda as possibilidades de acesso rodoviário e aéreo, em termos das distâncias a serem percorridas partindo de Belo Horizonte, tendo em vista as dificuldades de instalação e supervisão dos equipamentos e coletas de dados periódicas.

A Figura 9 mostra a localização das cidades escolhidas incialmente, no mapa de zoneamento bioclimático de Minas Gerais (vide seção B.5.3 do Apêndice B):

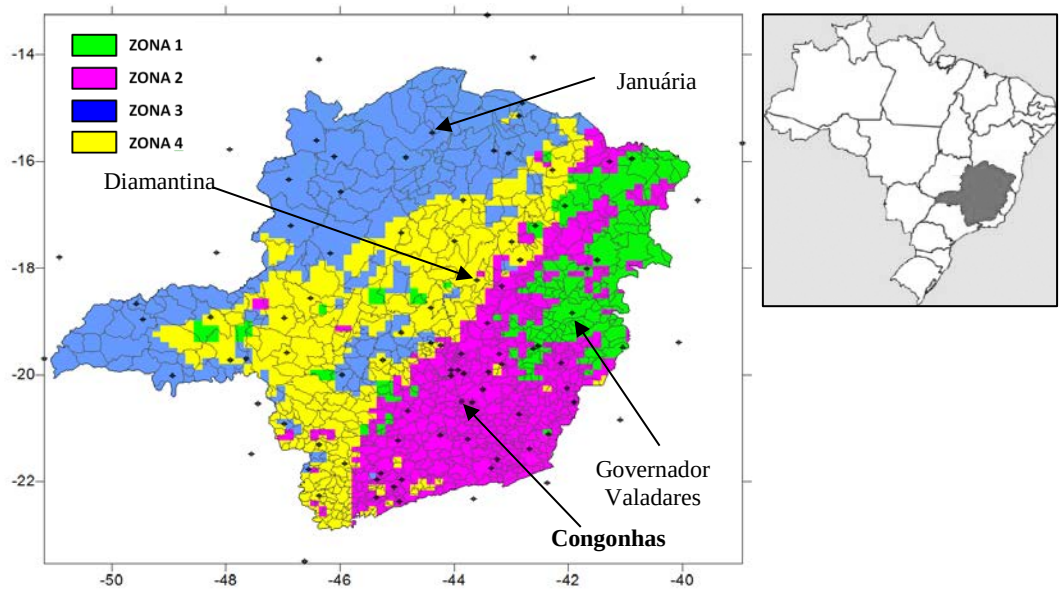


Figura 9 – Localização das cidades dos estudos de caso iniciais.

A redução do número de estudos de caso se deu em função de alterações e adequações nos objetivos do trabalho, que, por recomendação da banca de qualificação, deixaram de incluir a obtenção de recomendações de conservação preventiva para cada zona bioclimática. Cabe ressaltar, contudo, que as medições em campo nos demais casos produziram séries de

[95] Vide seção B.5.3 no Apêndice B.

dados de no mínimo um ano, no caso de Diamantina e Governador Valadares e seis meses, no caso de Januária, que serão objeto de publicações futuras.

4.2.1- Capela da Ceia - Santuário de Bom Jesus de Matosinhos - Congonhas

Para OLIVEIRA (2011, p. 9) os passos de Congonhas são "reconhecidamente a obra de maior relevância para a história da arte no Brasil no campo da escultura religiosa". A imagem dos profetas esculpidos por Antônio Francisco Lisboa - o Aleijadinho - é ícone presente em qualquer referência visual do Patrimônio Cultural mineiro. Um minucioso estudo histórico, iconográfico e estilístico do conjunto arquitetônico e dos bens culturais móveis e integrados que ali se encontram é apresentado por OLIVEIRA (2006b, 2011).

Segundo o dossiê de sítios históricos e conjuntos urbanos de monumentos nacionais do Programa Monumenta (BRASIL, 2005a), o povoado de Congonhas já era considerado, no início do séc. XVIII, um dos principais centros de mineração de Minas Gerais. O conjunto arquitetônico, escultórico e paisagístico formado pela basílica e seu adro com esculturas de doze profetas e seis capelas com cenas da paixão de Cristo, está implantado em lugar de destaque na paisagem urbana. Ele pode ser considerado como sendo talvez o principal conjunto arquitetônico e artístico do país, declarado Patrimônio Cultural da Humanidade pela UNESCO em 1985. O processo de sua construção se iniciou em 1757 e durou até o final do séc. XIX. Reza a tradição que o Santuário foi mandado construir pelo minerador Feliciano Mendes, como pagamento de uma promessa ao Bom Jesus de Braga, sua cidade natal. O Santuário de Bom Jesus de Braga (também conhecido como Bom Jesus do Monte) guarda uma significativa semelhança arquitetônica com o de Congonhas, pela posição da igreja no alto de uma colina, cujo acesso se dá por uma escadaria em ziguezague.

O conjunto das capelas foi construído posteriormente à Igreja e seu adro. Aleijadinho iniciou o seu trabalho em Congonhas não pelas esculturas do adro, mas pelas esculturas dos passos da paixão (capelas). O projeto, datado de 1796, consta em uma petição dirigida ao bispo de Mariana em 1794 e previa duas séries de capelas: os Passos da Paixão, na frente do templo, e os Passos da Ressurreição, na parte posterior, remetendo ao Santuário de Braga. As 64 esculturas foram executadas de 1796 a 1799, com a colaboração dos oficiais que trabalhavam no ateliê do mestre. Segundo ELIAS (2002, p. 97) a madeira utilizada nas esculturas foi o cedro.

As capelas foram construídas anos mais tarde, ficando as esculturas guardadas em um depósito provisório. Em 1800, o Aleijadinho deu início à talha dos profetas, concluindo-a em três etapas, ao longo de seis anos. Invertendo a lógica natural, a construção das capelas estava apenas começando em 1805. A policromia das esculturas foi realizada por Manuel da Costa Athaíde e provavelmente também por Francisco Xavier Carneiro, em ritmo muito mais lento. Segundo OLIVEIRA (2006b, 2011) esse serviço foi contratado em 1798, iniciado em 1808 e concluído na segunda metade do séc. XIX. A pintura das imagens era realizada após a construção da capela correspondente. Athaíde também foi o responsável pelas pinturas parietais originais nos passos do Horto e Prisão. Em 1818 apenas as três primeiras capelas estavam prontas. Entre 1819 e 1864 o trabalho de construção das capelas foi paralisado, só tendo sido concluído totalmente em 1872, com a redução de sete para seis no número de capelas originalmente previsto.

Após o esgotamento das minas, Congonhas passou a enfrentar um marasmo econômico relativamente aliviado uma vez por ano, na semana do Jubileu do Senhor Bom Jesus, que ocorre em setembro e cuja tradição é mantida até os dias atuais, com o comparecimento de milhares de romeiros. Um novo ciclo de transformações se inicia no começo do séc. XX, com a implantação da mineração de ferro, processo que se acelerou com a chegada da Companhia Siderúrgica Nacional, em 1946. Com o tempo, várias mineradoras vieram operar no município, e lá ainda permanecem. Dentre elas duas grandes empresas: Açominas e Vale do Rio Doce. A cidade e o conjunto tombado ainda sofrem os impactos do processo de desenvolvimento e do crescimento descontrolado, nos últimos cem anos. A alteração na qualidade do ar decorrente da atividade mineradora foi atestada em laudo técnico expedido pelo Ministério Público de Minas Gerais (TORRES e NOVAIS, 2011).

A compatibilização da atividade mineradora com a preservação do Patrimônio Cultural vem sendo objeto de discussão e atuação dos órgãos e autoridades responsáveis, e envolve uma problemática complexa, que abrange as reformas legislativas necessárias quanto à distribuição dos *royalties* da mineração (CARVALHO, 2013). A deposição de contaminantes particulados, (por exemplo, finos de mineração e provenientes do fluxo contínuo de caminhões na região) é um dos problemas que podem ser investigados por meio de ferramentas de simulação computacional CFD (SAMUEL, 2006; SAMUEL e STRACHAN, 2005).

Em resposta a essa problemática, o conjunto vem recebendo ações de investigação e intervenções de preservação. No âmbito do Programa Monumenta, estão previstas intervenções no conjunto do Santuário e em outros bens localizados no seu entorno.

Em 2005 o arquiteto mineiro Gustavo Penna venceu um concurso de projetos promovido pelo Ministério da Cultura em parceria com a UNESCO, para construção de um museu junto ao conjunto do Santuário. Inicialmente chegou-se inclusive a cogitar a remoção das esculturas dos profetas para o interior do museu. Em agosto de 2011 as obras do museu entraram em sua fase final de acabamento, mas a obra ainda não foi finalizada. O edifício abrigará espaços para exposições de arte sacra, um centro de estudos da Pedra e um centro de referência do barroco.

A construção da Capela da Ceia foi iniciada em 1799 e concluída somente em 1808, apesar do seu tamanho modesto. Ela foi a única construída durante a permanência do Aleijadinho em Congonhas. A policromia das esculturas também foi concluída em 1808. Do ponto de vista iconográfico, ele é o primeiro passo da série a ser visitado. Segundo OLIVEIRA (2006b, p. 89), do ponto de vista arquitetônico, sua qualidade de execução e acabamento supera os demais. A cena representada através das 15 esculturas barrocas corresponde ao momento da ceia em que Jesus anuncia aos apóstolos que seria traído por um deles.

OLIVEIRA (2011) apresenta registros históricos sobre o estado de conservação do Santuário. ELIAS (2002) apresenta uma descrição arquitetônica da Capela, acompanhada de levantamento fotográfico. ELIAS (2002) apresenta ainda um diagnóstico das condições de conservação do edifício, citando detalhes da técnica construtiva, inclusive resultados de análises laboratoriais dos materiais construtivos. A autora realizou também um diagnóstico de conservação do conjunto de esculturas da Capela da Ceia concluindo (p. 143) que as condições de conservação inadequadas, encontradas na Capela, não condiziam com as expectativas da UNESCO e dos órgãos de preservação responsáveis. Elias coordenou os trabalhos de restauração das esculturas a partir de 2005, tendo sido essa intervenção precedida por outras duas grandes intervenções, nas décadas de 1950 e 1970. Em sua dissertação, Elias ressaltou ainda a necessidade de intervenções na edificação e no acervo, lembrando que, estas últimas, sem uma atuação efetiva sobre os agentes de deterioração em curso na época, teriam que ser feitas com uma frequência cada vez maior.

As figuras 10 e 11 mostram aspectos do Santuário e seu entorno imediato, indicando em vista aérea a Capela da Ceia e também o escritório técnico do IPHAN, onde foi instalada uma estação meteorológica para medição dos dados externos.



Figura 10 – Vista das capelas dos passos da Paixão. Capela da Ceia ao centro, na parte baixa da colina. Fonte: *Google maps.*

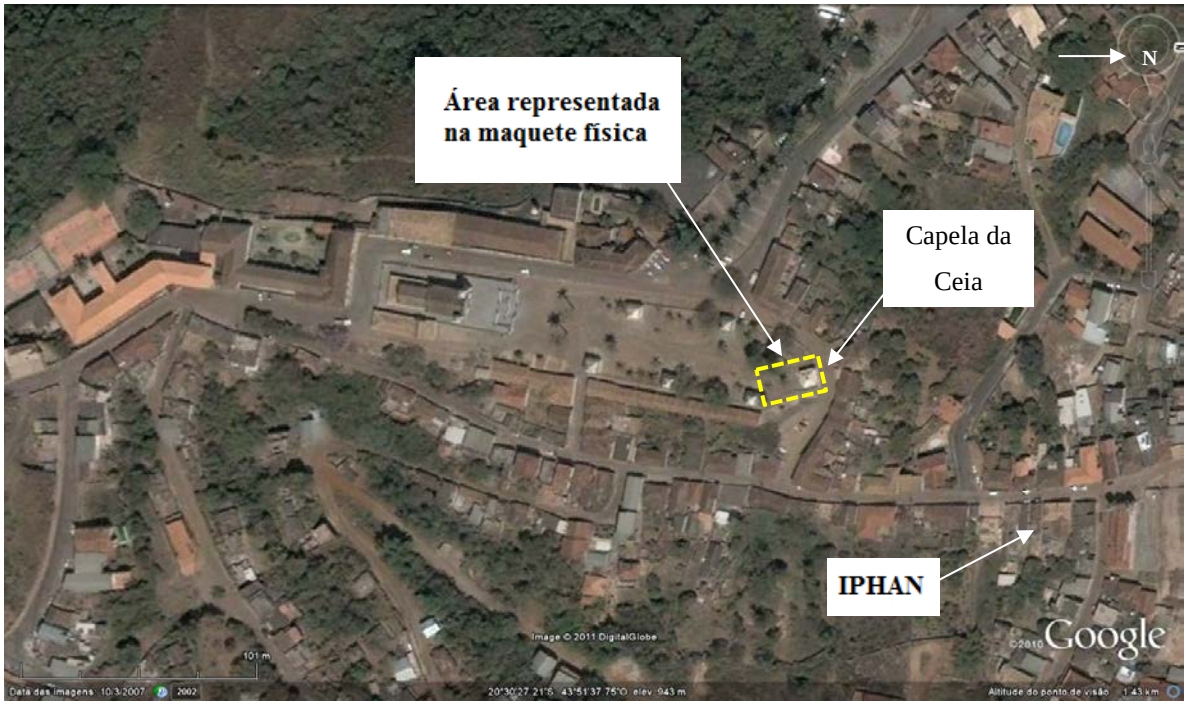


Figura 11 – Vista aérea do Santuário, mostrando posição relativa da Capela da Ceia, escritório técnico do IPHAN e área representada na maquete física. Fonte: *Google Earth.*

A Figura 12 mostra um diagrama do movimento aparente do sol superposto ao modelo simplificado da Capela, em projeção ortográfica e isométrica. Verifica-se que as paredes NE e SE recebem insolação no período da manhã durante todo o ano, enquanto que as paredes NO e SO recebem no período da tarde. A radiação solar global incidente será maior nas paredes NE e NO no período do inverno quando o sol se inclina mais a norte, aumentando e sendo máxima nas paredes SE e SO no verão.

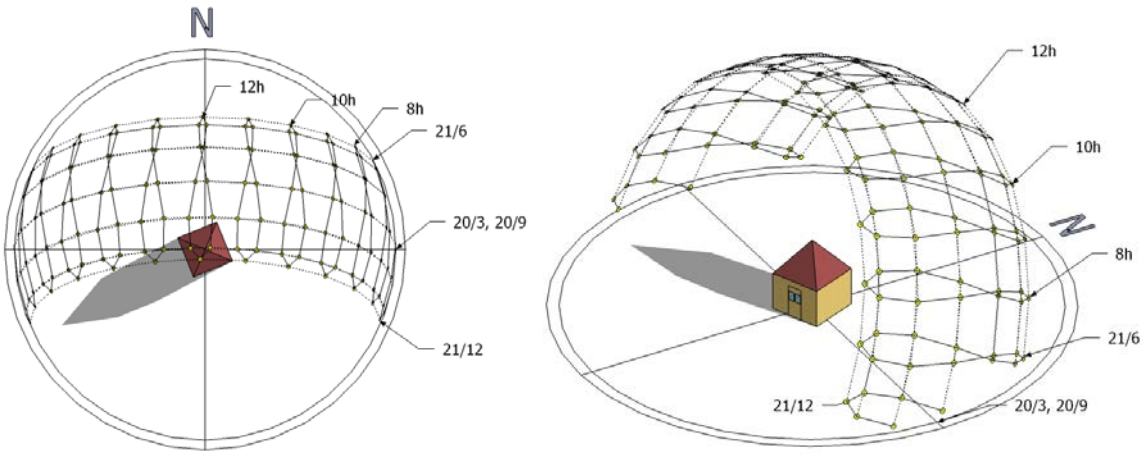


Figura 12 – Capela da Ceia – diagrama de insolação em projeção ortográfica (esquerda) e isométrica (direita).

4.3- Procedimentos adotados no levantamento arquitetônico e na elaboração de maquetes eletrônicas

Visando completar os levantamentos fotográfico e arquitetônico feitos inicialmente, e a documentação arquitetônica fornecida pelo Escritório Técnico do IPHAN em Congonhas assim como gerar dados úteis em futuras pesquisas foi realizado o escaneamento tridimensional da Capela da Ceia, mediante parceria firmada com as empresas CPE Tecnologia e PEEX Engenharia, de Belo Horizonte. O escaneamento foi feito utilizando um escâner Z+F modelo 5006i cujas características estão descritas em detalhes no **Apêndice D**. Visando possibilitar uma posterior correção das cores, foi utilizada a cartela de cor *Color Checker*.



Figura 13 – Capela da Ceia – posicionamento dos alvos de referência para o escaneamento tridimensional, escâner Z+F. (Fonte: foto do autor)

O procedimento de escaneamento consistiu no posicionamento de alvos fixos (Figura 13) no interior e exterior da Capela, utilizados como referência para junção, manipulação e utilização de diversas ***nuvens de pontos*** resultantes de um total de dezesseis leituras realizadas *in loco*. Os dados foram tratados no programa *Geomagic* © e compactados em um arquivo formato DXF. A Figura 14 mostra a nuvem de pontos resultante, e as superfícies geradas pelo *Geomagic* ©.

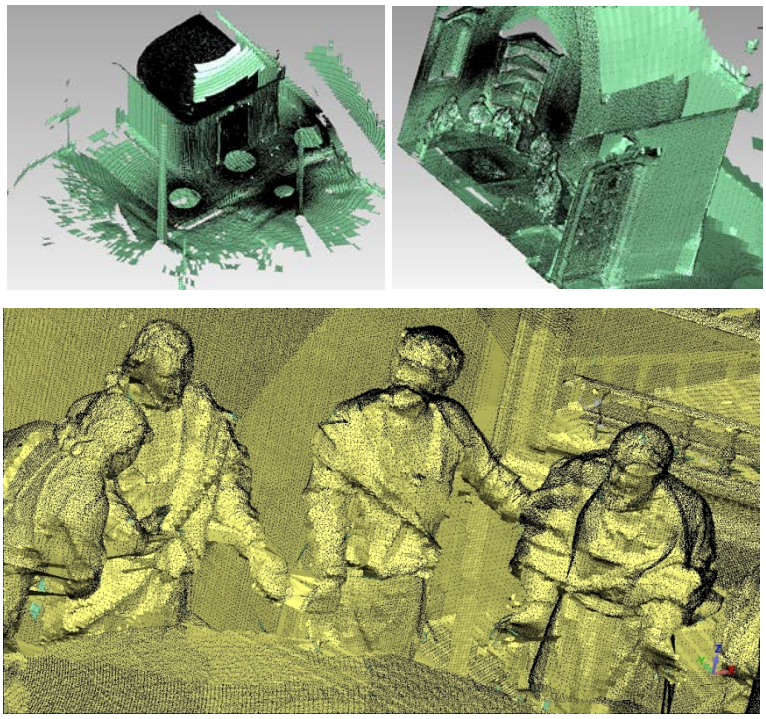


Figura 14 – Capela da Ceia - nuvem de pontos resultante do escaneamento tridimensional.

Com base nesse levantamento foram elaboradas duas maquetes eletrônicas no programa *SketchUp* ©: uma simplificada, para uso no programa *Energy Plus* © e outra mais detalhada, utilizada como referência para a confecção da maquete física que foi utilizada nos ensaios no túnel de vento. A Figura 15 ilustra a compatibilidade entre o escaneamento tridimensional e as maquetes executadas.

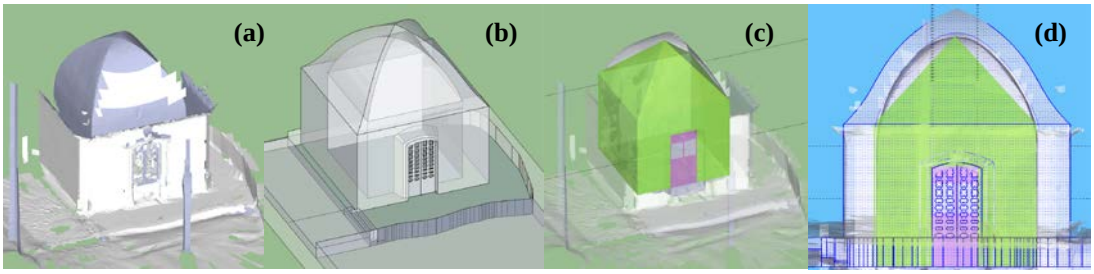


Figura 15 – Capela da Ceia – maquetes eletrônicas (a) nuvem de pontos; (b) referência para maquete física; (c) maquete utilizada no *Energy Plus*; (d) maquetes aninhadas.

O escaneamento demonstrou que as espessuras das paredes consideradas por ELIAS (2002, p. 64) estavam subdimensionadas, tendo sido encontradas espessuras de 1,10m em media.

4.4- Preparação e procedimentos adotados no monitoramento ambiental contínuo em campo

A etapa de medições em campo foi precedida da aferição dos equipamentos utilizados, realizada no LACICOR e nas instalações do 5º Distrito / INMET, de novembro de 2010 a fevereiro de 2011, adotando-se como referência os trabalhos de ASSIS (2010) e HIRASHIMA (2010). Detalhes e resultados dos procedimentos de aferição, incluindo as características técnicas dos equipamentos utilizados são apresentados no **Apêndice D**.

Período de medições na Capela da Ceia: 18/07/2011 a 21/10/2012.

As medições foram precedidas de visitas preparatórias para levantamentos iniciais e contatos formais com o Pe. Benedito Pinto da Rocha, Reitor do Santuário, à época. Ao se distribuir os equipamentos nos locais de medição, foram avaliados: as características dos sensores/registradores de *T/UR* em termos do espaço ocupado, acesso, autonomia energética e de operação e o cronograma das visitas de campo. Na instalação dos equipamentos procurou-se seguir os princípios recomendados na literatura (BARBOSA et al., 2008; BERNARDI, 2008, cap. 5; CAMUFFO, 1998, seção 1.8; CASSAR e HUTCHINGS, 2000; REEDY et al.,

1992). Buscou-se colocar os sensores/registradores de *T/UR* o mais próximo possível do centro da sala, a fim de obter uma medição mais representativa do ambiente. Além desse critério, buscou-se também evitar interferência dos sensores/registradores de *T/UR* na montagem expográfica. Não foram utilizadas nos sensores/registradores de *T/UR* proteções contra a radiação refletida pelas superfícies[96]. Os sensores/registradores de *T/UR* foram programados para registrar as variáveis em intervalos de 15 em 15min.

Para a medição de temperatura e umidade relativa no interior da Capela da Ceia, foram usados dois sensores/registradores de *T/UR* da marca Onset modelo HOBO U10-003. Congonhas não possui estação meteorológica da rede do INMET. A mais próxima fica na cidade de Ouro Branco, a cerca de 10km da Capela (lat. 20º31'/ long. 43º41' / alt. 1061m). A instalação de uma estação meteorológica no Santuário ou de um computador ligado à estação receptora de dados no interior da Capela mostraram-se inviáveis, pois interfeririam excessiva e inaceitavelmente na leitura estética do conjunto dos monumentos e esculturas.

Foi então instalada no escritório técnico do IPHAN em Congonhas, a cerca de 100m da Capela, uma estação receptora marca Oregon modelo WMR 968, com um pluviômetro a 1,5m de altura e o anemômetro/biruta a 6m de altura. Foi também instalado externamente um sensor termo higrômetro modelo THGR122NX, em uma parede externa, protegido pelo beiral do telhado. Tanto na Capela como no escritório técnico, os dados foram coletados a cada quinze minutos.

[96] BARBOSA et al. (2008a) analisaram a influência de diversos fatores sobre sensores para medição da temperatura do ar em protótipos de edificações de madeira e alvenaria "tradicional". Entre outros fatores, os autores investigaram a influência do uso de proteções nos sensores, contra a radiação refletida pelas superfícies circundantes. A diferença média entre as temperaturas medidas pelos sensores protegidos e desprotegidos foi de 0,2ºC no protótipo de madeira e de 0,3ºC no protótipo de alvenaria. Em outro experimento, BARBOSA et al. (2008b) expuseram sensores a uma fonte de radiação de 800W distante 2,5m, dentro de uma sala fechada e encontraram diferenças médias entre sensores protegidos e desprotegidos de 0,3ºC, ao expor os sensores a 25% da potência da fonte e de 1,4ºC, ao expor os sensores a 100% da potência da fonte. Diferenças dessa ordem de grandeza não seriam relevantes para a presente pesquisa e, portanto, optou-se pela não utilização de proteções contra radiação refletida nos sensores. Adicionalmente, não se encontrou menção ao uso de tais proteções em outros trabalhos de monitoramento ambiental em edifícios que abrigam coleções, com metodologia similar (ASSIS e BASTOS, 2007; BERNARDI, 2008; CAMUFFO et al., 2001, 2002; CORGNATI et al., 2009; CORGNATI e FILLIPI, 2010; COSTANZO et al., 2006; D'AGOSTINO, 2006; GYSELS et al., 2004; LA GENNUSA et al., 2005; MARTENS, 2012; MILLS e FORE, 2000; MOREIRA et al., 2004). CAMUFFO et al. (2004b) mencionam o uso de um pirômetro protegido para medições de temperatura na superfície de um forro. Em estudo recente, de monitoramento ambiental em uma biblioteca, FERREIRA et al. (2012) adotaram a proteção contra radiação com a adaptação de uma garrafa PET revestida com papel alumínio, proposta por BARBOSA et al (2008b).

As Figuras 16 e 17 mostram uma planta esquemática da Capela e vistas internas, indicando o posicionamento dos sensores/registradores de *T/UR* no interior da mesma e a Figura 18 mostra os sensores instalados no escritório do IPHAN.

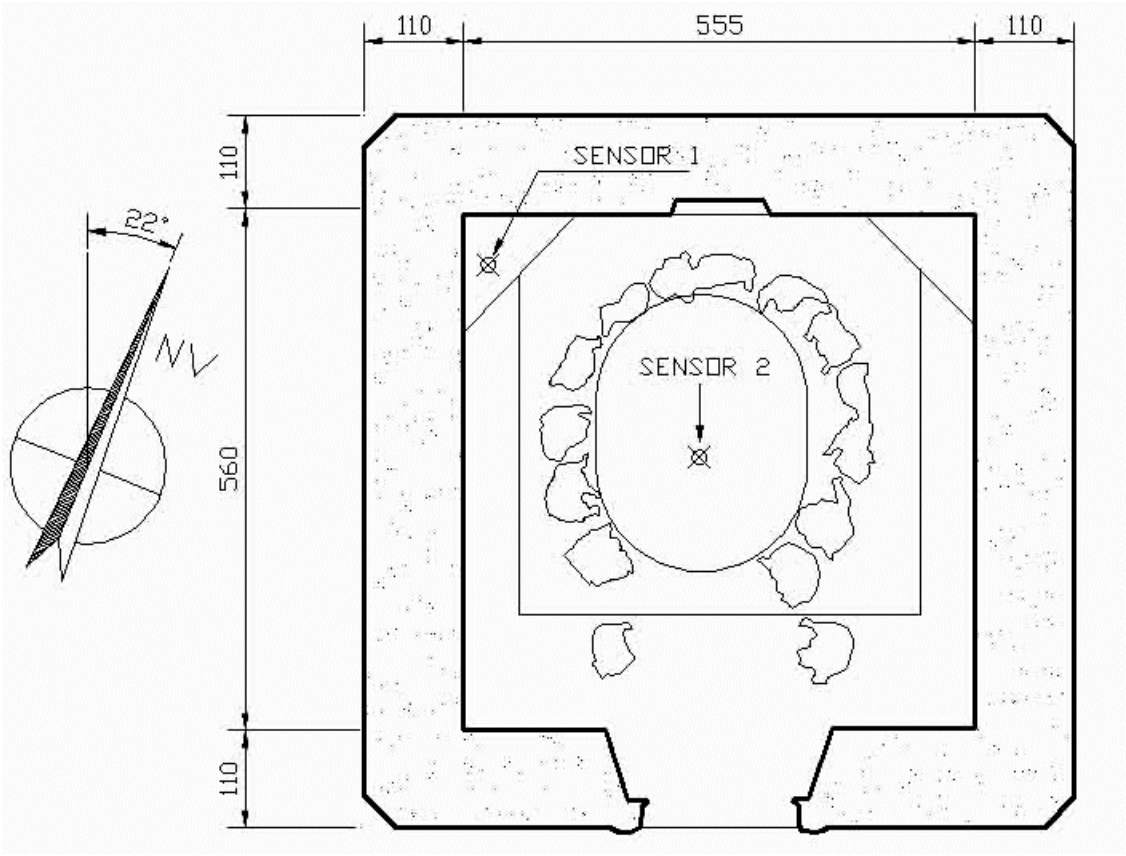


Figura 16 – Capela da Ceia – croqui da planta baixa, indicando posição dos sensores/registradores de *T/UR*.

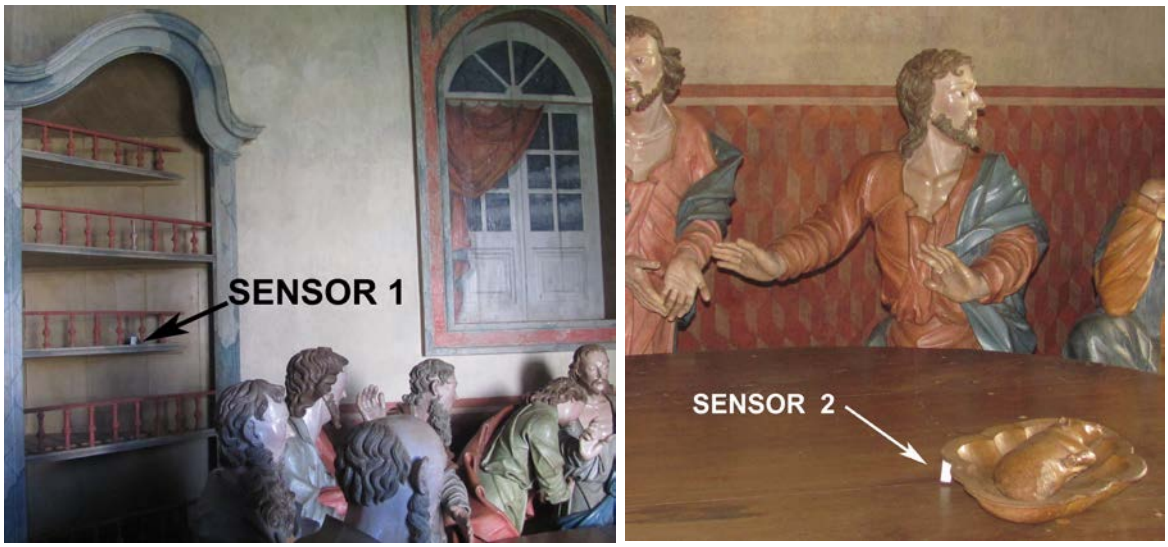


Figura 17 – Capela da Ceia – vistas internas, indicando posição dos sensores/registradores de *T/UR*.



Figura 18 – Sensores externos instalados no escritório técnico do IPHAN em Congonhas.

4.5- Procedimentos adotados no processamento dos dados climáticos

Devido a dificuldades operacionais que inviabilizaram um monitoramento remoto, a amostra de dados coletados na estação meteorológica instalada no escritório técnico do IPHAN em Congonhas não foi suficiente para uma caracterização do clima local.

Para caracterizar o clima externo foram solicitados ao INMET os dados climáticos da estação meteorológica de Ouro Branco (localizada a cerca de 10km da Capela da Ceia). Como essa estação iniciou o seu funcionamento em 2006, ela não foi incluída na última publicação das normais climatológicas brasileiras (BRASIL, 1992). O INMET forneceu dados climáticos para o período 01/08/2006 a 31/07/2012. Os dados foram fornecidos em três planilhas contendo os dados horários obtidos na estação automática, sem qualquer tratamento estatístico.

Em primeiro lugar foi necessário escrever uma rotina no programa *Microsoft Excel* © para reorganizar os dados, pois no formato original os dados horários estavam separados por colunas, sendo mais conveniente organizá-los por data e hora, em linhas.

Em seguida foram calculados os valores médios horários, diários e mensais compilados em tabelas e climogramas, incluindo médias (normais, máximas e mínimas), valores máximos e mínimos absolutos, amplitudes médias e absolutas e somatórios (precipitação). Foram também obtidos e analisados histogramas de frequências relativas e cumulativas, em base horária, diária, semanal e mensal.

As análises foram feitas para o período de cinco anos, de 2006 a 2012 e também para o extrato do período julho/2011 a junho/2012, visando verificar se o período correspondente ao monitoramento em campo poderia ser considerado típico em relação à série histórica de cinco anos. Por meio de testes estatísticos verificou-se que as duas séries não apresentam diferenças significativas em termos de suas médias e variâncias.

RORIZ (2012a, 2012b) analisou os dados climáticos de 411 estações climatológicas do INMET entre os anos de 2006 e 2010. Ele corrigiu e disponibilizou os dados[97] no formato EPW, formato de entrada do programa *Energy Plus©*, utilizado neste trabalho. Esse formato consiste em um arquivo de dados climáticos[98] com uma série anual completa, em base horária (8760 pontos). A metodologia adotada por Roriz passa pela determinação, dentre os dados coletados, de uma série denominada Ano Meteorológico Típico (*TMY – Typical Meteorological Year).* ZANNIS et al. (2006) utilizaram esse tipo de arquivo climático para analisar a eficiência energética de museus europeus, usando dados de localidades próximas quando o arquivo não estava disponível. O ano considerado típico por Roriz foi o ano de 2009, cujos dados foram comparados aos da série histórica (2006-2012).

Foram ainda comparados com a série histórica de Ouro Branco, fornecida pelo INMET, os dados obtidos na estação meteorológica instalada no Escritório Técnico do IPHAN, em Congonhas.

Em seguida os dados foram formatados em um arquivo climático formato SAMSON, para uso no programa *WRplot view* © a fim de obter as "rosas" e demais estatísticas descritivas do vento, para ambos os períodos 2006-2012 e 2011-2012.

A partir dos dados procedeu-se à análise e classificação climática de Ouro Branco, estudando-se as estratégias arquitetônicas aplicáveis segundo os métodos de Mahoney, Givoni e zoneamento bioclimático da norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005)[99].

Para a análise bioclimática pelo método de Givoni (vide Apêndice B) as médias horárias dos dados fornecidos pelo INMET foram processadas por meio dos algoritmos de cálculo psicrométrico fornecidos pela ASHRAE (2009), para obtenção das temperaturas de

[97] http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw (Acesso em 05/02/2013).

[98] Para uma descrição detalhada dos dados contidos nos arquivos climáticos formato EPW vide http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/weatherdatainformation.pdf (Acesso em 18/03/2013).

[99] Vide Apêndice B.

bulbo úmido e razão de umidade. Os dados foram organizados em um arquivo formato TRY, conforme instruções do LABEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC e processados através do programa *Analysis Bio* disponibilizado pelo mesmo laboratório[100].

Procedimentos similares aos adotados no processamento dos dados externos foram adotados para o processamento dos dados internos, iniciando com a obtenção de médias horárias, a partir dos valores que foram monitorados na frequência de 15/15min, e que foram então comparadas graficamente com as médias externas compiladas a partir dos dados fornecidos pelo INMET.

4.5.1- Cálculo do potencial de desumidificação através da ventilação natural ou forçada

Para determinar critérios-limite seguros de flutuação de temperatura e umidade relativa, foram seguidas as indicações da ASHRAE (2007, p. 21.13) e da norma técnica UNI EN15157 (UNI, 2010). O potencial de aplicabilidade de diferentes estratégias de ventilação natural, com destaque para as estratégias de desumidificação, foi determinado verificando o percentual de horas do ano em que os critérios-limite acima são atendidos e superpondo-os a diagramas de dispersão da umidade relativa externa e interna, comparando-se também as respectivas razões de umidade. O potencial de aplicação foi verificado ao longo das horas e meses do ano, bem como ao longo das horas do dia.

4.6- Procedimentos adotados nas simulações computacionais

Dentre os níveis de controle mostrados na Figura 2, optou-se por focar as investigações por meio das simulações computacionais ao nível da SALA. Essa opção se deu por ser esse o nível que, na ausência das vitrines ou outro mobiliário, representa o primeiro enclausuramento que envolve os objetos, o que ocorre no caso da Capela em estudo. Cabe destacar que a escala do domínio nas simulações fluidodinâmicas podem ser ajustadas para o nível do mobiliário.

[100] Disponível em http://www.labeee.ufsc.br/downloads/softwares/analysis (Acesso em 16/08/2011)

4.6.1- Modelos preditivos por regressão linear múltipla

Das simulações computacionais investigadas neste trabalho, as mais simples consistem no uso de equações preditivas para a temperatura e razão de umidade. Conforme discutido na seção 2.4.2, tais modelos fornecem uma estimativa razoável, de variáveis ambientais, a partir das quais podem ser estimadas algumas métricas de preservação. AULT (2000) desenvolveu um modelo preditivo para resolver balanços de massa e energia no interior de vitrines, e estimar a taxa de infiltração no interior das mesmas. Em seu modelo Ault utiliza uma curva senóide para estimar a *UR* externa à vitrine.

CARVALHO (2005b) apresenta e avalia aplicação de equações preditivas de KRUGER e GIVONI (2004) ao gerenciamento ambiental de edifícios que abrigam coleções. Kruger e Givoni propõem a eq. (9) para a predição da temperatura interna:

$$T_{imax} = GT_e + \Delta T + k_f\,(T_{emed} - GT_e) \tag{9}$$

Onde

T_{imax}= Temperatura do ar interno, máxima diária [ºC];

GT_e = Temperatura media externa para o período analisado, p. ex., média mensal [ºC];

ΔT = Diferença entre as temperaturas médias externa e interna [ºC];

T_{emed} = Temperatura média diária externa [ºC];

k_f = razão (taxa de flutuação de T_i / taxa de flutuação de T_{emed});

CARVALHO (2005b) utilizou a fórmula básica de Kruger-Givoni para a predição da razão de umidade interna. As equações apresentadas por essa autora podem ser genericamente descritas por

$$T_{imed} = \beta_0 + \beta_1\,GT_e + \beta_2\,(T_{emed} - GT_e) \tag{10}$$

$$W_{imed} = \beta_0 + \beta_1\,GW_e + \beta_2\,(W_{emed} - GW_e) \tag{11}$$

Onde W é a razão de umidade, notada da mesma forma que a temperatura na eq. (9) e as constantes β_0, β_1 e β_2 são obtidas através de regressão linear múltipla.

CARVALHO (2005b) demonstra ainda que as variáveis-resposta dependentes T_i e W_i são avaliadas em seus valores mínimo, médio e máximo, e as variáveis preditoras a serem utilizadas na análise de regressão múltipla, são escolhidas, determinando-se o uso das médias mínimas, normais ou máximas, escolhendo-se aquela que mais se aproxime da variável dependente.

4.6.2- Simulações de desempenho higrotérmico – programa Energy Plus ©

Para as simulações no programa *Energy Plus v. 7.2.6* © foi utilizado o modelo mostrado na Figura 15c. O modelo tridimensional, contendo apenas uma zona, foi desenhado no programa *SketchUp v.8* © e as informações básicas para a simulação foram introduzidas com o *plugin Open Studio v. 1.0.9* ©.

A Figura 19 ilustra as simplificações adotadas no modelo. Para uma comparação com o levantamento arquitetônico realizado por meio de escaneamento tridimensional, vide a Figura 15. Para a determinação da área das aberturas de ventilação permanente, foi utilizada uma foto tirada frontalmente à porta de entrada da Capela (Figura 20), e uma técnica de contagem de pixels, no programa *Adobe Photoshop CS4* ©. Na superfície das janelas foi aplicado um material com transmitância solar igual a 100% e condutividade térmica igual à do ar.

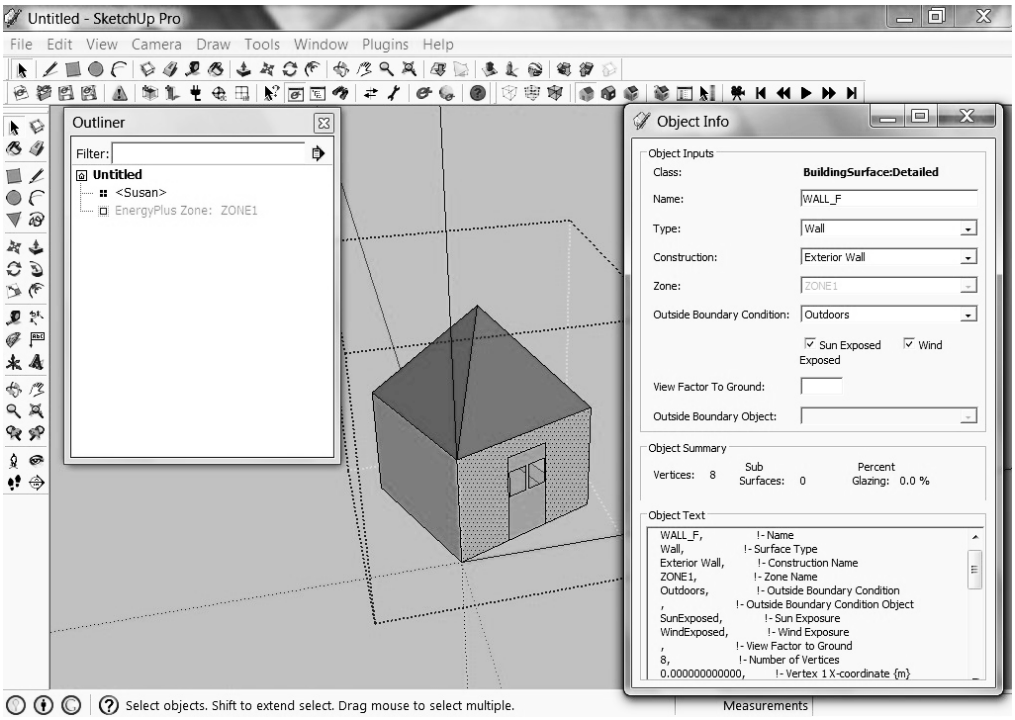


Figura 19 – Capela da Ceia – modelo simplificado utilizado no programa *Energy Plus* ©. Tela do programa *SketchUp v.8* ©, com o *plug in Open Studio v.1.0.9* ©. Vide também a Figura 15.

Para as simulações no programa *Energy Plus* © os dados de temperatura de bulbo seco, temperatura de orvalho, umidade relativa, pressão atmosférica, direção e velocidade do vento, precipitações e radiação solar foram substituídos no arquivo formato EPW de RORIZ (2012a, 2012b), pelas médias horárias históricas do período 2006-2012, calculadas a partir dos dados fornecidos pelo INMET. As temperaturas do solo foram calculadas a partir do arquivo de entrada EPW, com o programa auxiliar de conversão de dados climáticos, fornecido com o *Energy Plus*©, de acordo com as instruções no manual do programa.

O programa *Energy Plus*© foi então utilizado para simular, a partir do arquivo climático de entrada formato EPW corrigido e do modelo simplificado mostrado na Figura 19, os valores horários de temperatura, umidade relativa e razão de umidade, no interior da Capela. Posteriormente foram simuladas alterações no regime de ventilação, considerando a possibilidade de vedação das aberturas de ventilação permanente com um vidro incolor de 3mm, bem como da instalação de um sistema de controle de insuflação com base na diferença de entalpias interna e externa.

Das configurações adotadas nas simulações, cabe destacar: (i) algoritmo adaptativo para cálculo das trocas térmicas por convecção nas superfícies; (ii) modelo de profundidade efetiva de penetração da umidade nas superfícies (*EMPD model*)[101] para o algoritmo de balanço higrotérmico; (iii) temperaturas a 0,5m no solo calculadas pelo aplicativo estatístico do programa; (iv) massa interna de madeira com área superficial equivalente à das esculturas, estantes e mesa; (v) modelo de mistura completa *(mixing model*) para os cálculos de ventilação;

Como os visitantes não podem entrar na Capela, não foi considerada nenhuma carga térmica devido à ocupação humana. Da mesma forma, o sistema de iluminação só é ligado em circunstâncias especiais, sendo também desconsiderado na simulação. Como o modelo simulado continha apenas uma zona, com pé direito relativamente baixo, foi desconsiderado o gradiente térmico do ar interno. A composição das envoltórias, propriedades físicas adotadas para os materiais e demais configurações adotadas na simulação com o *Energy Plus* © são informadas no **Apêndice E**.

[101] (AFONSO, 2011). Vide também seção A.4 do Apêndice A.

4.6.2.1. Critérios de convergência

Dentre os parâmetros de controle da simulação que necessitam ser inicialmente configurados no *Energy Plus* ©, encontra-se o **controle inicial de convergência**, denominado no programa de "convergência de aquecimento" *(warmup convergence).* Tal controle é definido pelos parâmetros (i) *loads convergence tolerance value;* (ii) *temperature convergence tolerance value;* (iii) *minimum number of warmup days;* (iv) *maximum number of warmup days.*

Segundo o manual de parâmetros de entrada/saída (EUA, 2012) o programa processa o primeiro dia definido no arquivo climático de entrada (EPW) com um conjunto de condições de contorno iniciais definidas internamente pelo código até que os valores de tolerância (erros máximos) para temperatura (em ºC ou K) e cargas térmicas (em Watts) enumerados acima sejam satisfeitos. Esse controle de convergência é feito consecutivamente pelo número de dias definidos pelos parâmetros *minimum* e *maximum number of warm up days* descritos acima, até que a convergência seja atingida. O programa é encerrado com uma mensagem de erro caso isso não aconteça. A partir daí, o programa continua a simulação a partir do segundo dia definido no arquivo climático.

Os outros controles de convergência utilizados pelo *Energy Plus* © são configurados como parâmetros de controle específicos do algoritmo de simulação de ventilação (*Airflow network)*[102]: (i) *maximum number of iterations* – valor padrão adotado: 500*;* (ii) *relative airflow convergence tolerance,* erro relativo máximo no balanço de massa de uma iteração para outra – valor padrão adotado: 0,0001; (iii) *absolute airflow convergence tolerance,* erro absoluto do balanço de massa [kg/s] – valor padrão adotado: $1x10^{-6}$.

Segundo o manual de parâmetros de entrada/saída (EUA, 2012), se em algum dos intervalos de tempo da simulação o número máximo de iterações for superado sem atingir os limites de convergência descritos acima, a simulação é interrompida com uma mensagem de erro severo.

[102] O algoritmo de cálculo de ventilação do *Energy Plus* inclui combinações dos modelos *AIRNET* (VERSAGE, 2009, p. 35) e *COMIS* (FEUSTEL, 1999).

Como o tempo de simulação do modelo com os parâmetros descritos acima, em uma CPU equipada com processador *Intel Core I7* © e 8GB de memória RAM, ficou em torno de 30 segundos, não foram feitos testes para otimizar o número de iterações necessárias para a convergência, uma vez que os erros máximos tanto no controle de convergência inicial como no da ventilação foram configurados para ficar abaixo de $1x10^{-3}$.

4.6.2.2. Análise de sensibilidade

PEREIRA e GHISI (2009a, 2009b) comentam sobre os parâmetros mais importantes a serem calibrados no *Energy Plus* © para simulações de ventilação. Eles analisam a influência da variação de diversos parâmetros de simulação, tais como temperatura do solo, resistência térmica dos materiais, absortância[103], geometria e equipamentos, sobre os resultados.

WESTPHAL e LAMBERTS (2005) apresentam uma metodologia e um estudo de caso de calibração de modelos destinados à avaliação de eficiência energética em edifícios. Após a definição das cargas térmicas constantes, os autores propõem calibrar as variáveis referentes às envoltórias: propriedades térmicas, geometrias e parâmetros do sistema de ar condicionado.

Para testar a sensibilidade do modelo da Capela simulado no *Energy Plus* ©, adotou-se um procedimento semelhante ao de MARTENS (2012, p. 129), variando os parâmetros de entrada e testando a correlação de aumento ou diminuição com os parâmetros de saída.

Foram testados os seguintes parâmetros: (i) espessura das camadas construtivas; (ii) absortância; (iii) densidade; (iv) calor específico; (v) área das aberturas; (vi) área de massa interna (esculturas, mesa e prateleiras). Foram majoradas e minoradas as propriedades das variáveis listadas em ±20% (vide Apêndice E). Foram avaliados os impactos nos valores

[103] Propriedade ótica das superfícies, medida que expressa a razão entre a radiação absorvida por uma superfície e a radiação incidente sobre essa superfície, variável em função do comprimento de onda da radiação incidente, O léxico técnico do Instituto Camões da Cooperação e da Língua, vinculado ao Ministério dos Negócios Estrangeiros de Portugal <http://www.instituto-camoes.pt/lextec/por/domain_5/text/20294.html> (acesso em 06/11/2013) registra as seguintes variações para o termo: *absortância, absorbância, absorvância, absorvência, coeficiente de absorção*. Em textos científicos das áreas de Engenharia e Arquitetura, são encontradas mais frequentemente as formas *absortância* e *coeficiente de absorção* (ex. DEWITT et al, 2008). Já na área da Química, especialmente em textos que tratam de aplicações de fotometria e espectrometria, é comum encontrar-se o termo *absorbância*. Em normas técnicas da ABNT são empregadas as variações *absortância* (NBR 15575:2013, NBR 15220:2005), *coeficiente de absorção* (NBR 14706:2001) e *absorbância* (NBR 8962:2013, NBR 8750:2009 e NBR NM 25:2003). LACOTIZ (2007) estuda a função e uso dos sufixos que dão origem a tais variações na língua portuguesa.

mensais médios, máximos e mínimos absolutos das variáveis *T, W, UR* e a taxa de renovação do ar, para cada mês do ano e considerados os resultados obtidos para a maioria dos meses do ano em cada variável avaliada, totalizando quarenta e oito configurações diferentes de simulação para testar as correlações, na presença e na ausência de ventilação.

4.6.2.3. Simulação de modificações no regime de ventilação visando à melhoria das condições de conservação

O programa *Energy Plus* © foi utilizado para simular dois regimes distintos de ventilação, visando à melhoria das condições de conservação das esculturas na Capela:

Regime 1: Vidro comum de 3mm vedando as aberturas de ventilação permanente;

Regime 2: Sistema de controle da ventilação com área de insuflação correspondente à área das aberturas de ventilação permanente existentes, e com fator de abertura proporcional à diferença de entalpia $\Delta H = H_i - H_e$, computada para cada valor horário.

Cabe enfatizar que tais regimes são discutidos aqui somente quanto ao seu impacto nas variáveis ambientais da Capela, sem entrar no mérito dos aspectos de execução, instalação e manutenção, relativos ao tombamento do edifício. Trata-se da investigação de hipóteses ***teóricas*** de melhoria da ventilação, sem descer aos detalhes executivos de implantação, como por exemplo, tipo e localização de um possível sistema de insuflação, ou a proteção das aberturas e tomadas de ar com telas para prevenir a entrada de insetos.

Com relação ao Regime 1, cabe destacar que o *Energy Plus* © considera uma infiltração mínima por frestas em janelas fechadas, dada pela eq. (12) (EUA, 2012, p. 771):

$$\dot{m} = k_a \, (\Delta P)^{nf} \qquad (12)$$

Onde $\dot{m}$ = vazão mássica de ar através das frestas [kg/s];

k_a = coeficiente de vazão mássica de ar [kg/s.Pa];

ΔP = diferença de pressão na fresta [Pa];

nf = expoente de vazão mássica de ar [adimensional];

Para as simulações, foram adotados os valores padrão recomendados pelo programa, respectivamente k_a = 0,001kg/s.Pa e nf = 0,65.

4.6.2.4. Comparação com modelos analíticos para cálculo de ventilação

Uma vez que na Capela as únicas aberturas de ventilação existentes são as da porta, o regime de ventilação constitui um caso de **ventilação unilateral**[104]**.** Para estimativa da vazão de ar por modelos analíticos, a área total (1,4m^2) das 32 aberturas de ventilação (Figura 20) foi estimada por meio do método de contagem de pixels no programa *Adobe Photoshop* © mencionado acima.



Figura 20 – Capela da Ceia – elevação frontal.

Para a comparação com modelos analíticos de cálculo de ventilação natural, foi considerada a seguinte simplificação, adotada no modelo simulado no *Energy plus* © (vide Figura 19): a área total de 1,4m^2 foi dividida em duas aberturas de 0,7m x 1,0m, com centróide na mesma posição do centroide da área total das aberturas originais. Para o cálculo da vazão volumétrica por ventilação unilateral, foi considerada como área de entrada a metade inferior dessas aberturas e como área de saída a metade superior das mesmas.

[104] (ALOCCA et al., 2003; AWBI, 2005, p. 325; DASCALAKI et al., 1995; PAPAKONSTANTINOU et al., 2000b; WANG e CHEN, 2012).

Segundo ALOCCA et al. (2003), a vazão volumétrica [m^3/s] em um ambiente com ventilação unilateral e duas aberturas de áreas iguais, por empuxo, é dada por

$$Q = C_d A \sqrt{g h_1 \frac{\Delta T}{T_s}} \quad (13)$$

Onde C_d é o coeficiente de descarga (usualmente 0,6);

ΔT é a diferença de temperatura entre as aberturas ($\Delta T = T_s - GT_e$ = 292,95-292,65= 0,3°K);

T_s é a temperatura na abertura de saída (tomada como a média interna anual = 292,95K);

h_1 é a diferença de altura entre os centros das aberturas de entrada e saída (0,5m);

Para o cálculo das vazões a partir dos valores de renovação horária simulados no *Energy Plus* © foi considerado o volume do modelo simplificado, de 168,15m^3.

Mais referências sobre o uso de modelos analíticos para cálculo de ventilação podem ser encontradas no **Apêndice C.**

4.6.3- Simulações fluidodinâmicas – Programa Ansys CFX ©

4.6.3.1. Domínio de simulação

Não obstante o foco das simulações feitas nesta pesquisa ocorra no nível da SALA, conforme esquema da Figura 2, o detalhamento e refinamento das malhas utilizadas nas simulações fluidodinâmicas devem ser proporcionais à escala e à complexidade do problema investigado.

COST apud CÓSTOLA (2006, p. 126) recomenda os seguintes parâmetros para que a dimensão do domínio computacional não interfira nos fenômenos investigados nas proximidades do edifício, tendo como base a altura H_{edif} do edifício: (i) distância da entrada, laterais e topo: 5.H_{edif} de qualquer obstáculo; (ii) distância da saída – 15.H_{edif} de qualquer obstáculo. No caso em estudo, para definição das dimensões iniciais do domínio, H_{edif} foi considerada da ordem de 8m, em função das proporções aproximadamente cúbicas da Capela. A altura real do edifício é da ordem de 9m.

Para as simulações no *Ansys CFX* ©, foi elaborada no programa *SketchUp v.8* © uma maquete eletrônica com base no levantamento arquitetônico realizado mediante escaneamento tridimensional. Tendo em vista que os resultados das simulações computacionais seriam comparados com os resultados obtidos no túnel de vento, procurou-se fazer a maquete eletrônica e a maquete física idênticas.

No *Ansys CFX* © a maquete eletrônica utilizada é o "negativo" do modelo anterior, pois são representados os volumes preenchidos com ar, ao invés da massa sólida das envoltórias. Para essa operação de transformação foi utilizado o programa *Solid Works* ©, cujo arquivo foi então importado para o módulo de geometria do *Ansys CFX* ©.

O programa foi então utilizado para resolver os balanços de massa e momento, obtendo-se campos de velocidade, pressão e linhas de corrente do escoamento de ar, desprezando-se fenômenos térmicos relacionados a trocas térmicas com as superfícies. O modelo de turbulência adotado foi o *SST – Shear Stress Transport k-ω.* Segundo VERSTEEG e MALALASEKERA (2007, p. 91) que descrevem detalhadamente a formulação matemática do modelo, esse modelo é **híbrido** e combina o modelo k-ε na região próxima às superfícies com o modelo k-ω na região plenamente turbulenta longe das superfícies[105].

Em virtude de a Capela situar-se em uma colina, na altitude de 930m, em cota superior à da maioria das edificações próximas e com poucas edificações vizinhas em cota superior à sua (vide Figura 11), o efeito de obstrução das edificações no entorno foi desprezado em ambas as maquetes. O muro de arrimo e o gramado existentes imediatamente à frente da entrada da Capela foram simplificados, sendo representados através de uma superfície plana com o comprimento de 20m.

A Figura 21 ilustra o domínio inicial de simulação adotado no *Ansys CFX* ©. Posteriormente esse domínio foi reduzido, para diminuir o número de nós da malha, conforme se explica na seção 4.6.3.3.

[105] Para mais detalhes sobre modelos de turbulência utilizados nos programas CFD, vide nota 84 acima.

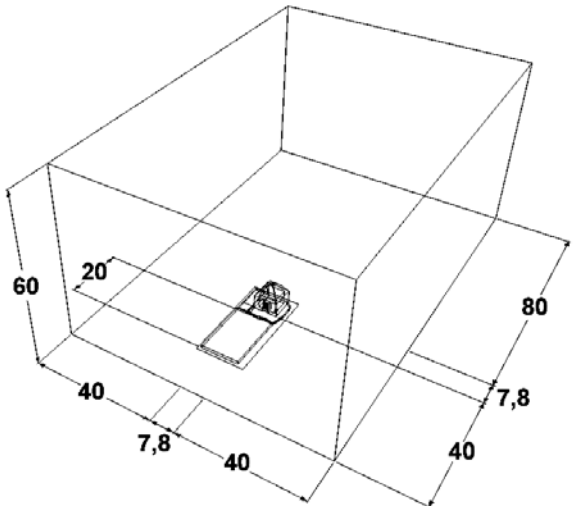


Figura 21 – Capela da Ceia – domínio de simulação utilizado no programa *Ansys CFX* ©. (Medidas em m).

4.6.3.2. Condições de contorno

Inicialmente foram adotadas nas condições de contorno as propriedades do ar a 25ºC, constantes na biblioteca de materiais do *Ansys CFX* © e o perfil exponencial de velocidade do vento recomendado pela ASHRAE, escolhido a partir do estudo relatado a seguir. Após os ensaios em túnel de vento, foram adotadas as propriedades médias do ar observadas durante os ensaios, a saber: T = 21ºC, pressão de 93247Pa e ρ= 1,044kg/m^3 e o perfil de velocidade do vento no plano de entrada do domínio de simulação foi substituído pelo perfil medido no túnel de vento. O relatório de configurações das simulações gerado pelo *Ansys CFX* © é apresentado no **Apêndice E** .

a. Perfil de velocidade do vento

Os dados de vento são medidos nas estações meteorológicas em condições padronizadas de altura (10m) e baixa rugosidade (z_0 = 0,05m). Para definir condições de contorno de simulações computacionais em edifícios localizados em meio urbano, é necessário corrigir os dados de vento considerando as alterações no perfil de velocidade do vento no interior da camada-limite atmosférica, em função da rugosidade[106] ou obter o perfil de velocidade por meio de ensaios em túnel de vento.

[106] (ABNT, 1988, p. 11; ALLARD et al., 1998, p. 14; BASTOS et al., 2007; GHIAUS e ALLARD, 2005, p. 59; CÓSTOLA, 2006, p. 35; FEUSTEL, 1999; OKE apud BARBIRATO et al., 2007, p. 37; RAGHEB, 2012; SILVA, 2003, p. 142)

Os modelos para correção dos perfis de vento em função da rugosidade do terreno encontrados na bibliografia, agrupam-se de modo geral em duas categorias: (i) logarítmicos; (ii) exponenciais (curvas de potência). O Engenheiro Marques da Silva, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (apud PRATA SHIMOMURA, 2012) considera que os perfis exponenciais são mais exatos que os logarítmicos e que esses últimos também fornecem uma boa aproximação. A escolha entre eles dependeria de uma boa caracterização do terreno e seu entorno.

A formulação genérica dos modelos na primeira categoria é

$$u(z) = \lambda \,.\, u_{met} . \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \tag{14}$$

Onde *u* é a velocidade do vento;

z é a altura medida a partir do solo [m];

u_{met} é a velocidade de referência medida na estação meteorológica [m/s];

z_0 é o comprimento de rugosidade típico do terreno [m];

λ = coeficiente obtido como *f* (u^*, u_{ref}, z_{0ref}), (GHIAUS e ALLARD, 2005, p. 63), [m^{-1}];

z_{0ref} = comprimento de rugosidade na estação meteorológica [m];

Já os modelos na segunda categoria podem ser genericamente representados por:

$$u(z) = u_{met}\left(\frac{z}{z_{met}}\right)^{\propto} \tag{15}$$

Segundo LUBITZ (2006, p. 2), se não houver informações disponíveis, α pode ser considerado igual a 1/7 = 0,14, valor também apontado por ASHRAE (2009, p. 24.3), FEUSTEL (1999, p. 9) e SPERA e RICHARDS (1979, p. 1). Porém Lubitz adverte que essa suposição deve ser adotada com cuidado, uma vez que o expoente pode variar muito, citando estudos em que a faixa de variação foi de 0,15 a 0,25 e enfatiza que a rigor, ele varia ao longo do dia. Essa variação também é demonstrada por BOTHA (2005) para os modelos logarítmicos. SILVA (2003, p. 157) estudou a relação de α com a velocidade média do vento e a escala de comprimento de Monin-Obukhov que mede a importância relativa entre a origem térmica ou mecânica da turbulência.

Para determinar o perfil mais adequado a ser fornecido como condição de contorno nas simulações computacionais realizadas neste trabalho, foram estudados e comparados diversos modelos (Figura 22).

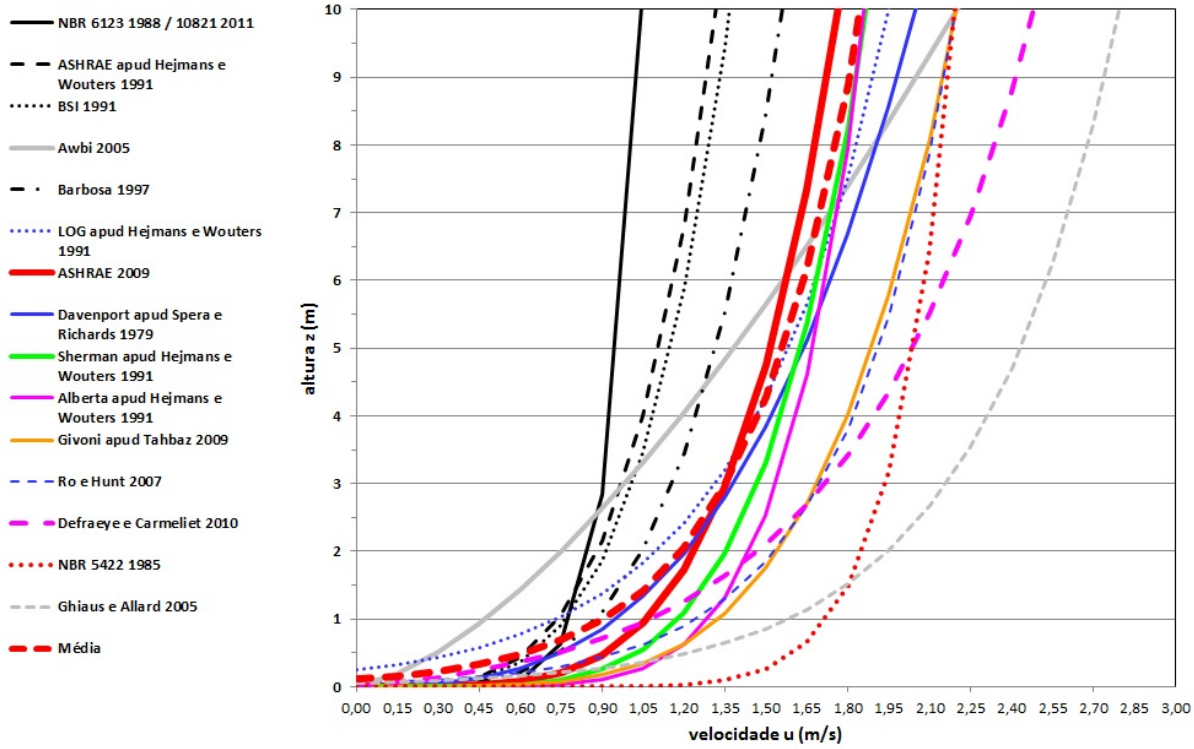


Figura 22 – Comparação entre modelos de perfil de velocidade do vento.

Da categoria (i) foram estudados os modelos de GHIAUS e ALLARD (2005, p. 63) e RO e HUNT (2007, p. 314, também citado por HOWARD e CLARK, 2007, p. 108 e RAGHEB, 2012, p. 2), e o modelo LOG (HEJMANS e WOUTERS, 1991, p. 6).

Da categoria (ii) foram estudados: modelo Alberta (HEJMANS e WOUTERS, 1991, p. 6), ABNT (1985, 1988, 2011b), ASHRAE (2009, p. 24.3), AWBI (2005, p. 101), BARBOSA (1997, p. 240), BSI (1991, também citado por BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2006, p. 37 e AWBI, 2010, p. 5), DEFRAEYE e CARMELIET (2010, p. 1815), GIVONI apud TAHBAZ (2009, p.2, também citado por YANG, 2004, p. 37), SPERA e RICHARDS (1979, também citado por FEUSTEL, 1999 e DUTHINH e SIMIU, 2011, p. 282).

A velocidade de referência adotada para a comparação dos modelos de perfis de velocidade foi de 2,2m/s, velocidade média do vento em Ouro Branco, medida na altura z_{ref} de 10m (vide seção 5.1.1). O Quadro 3 informa os valores dos parâmetros adotados para a comparação dos modelos.

Quadro 3 – Parâmetros adotados para comparação dos modelos de perfil de velocidade do vento (mantida a nomenclatura utilizada por cada autor)

Modelo	**Parâmetros adotados**
Alberta apud Hejmans e Wouters (1991)	p_e = 0,16; p_m = 0,12
ASHRAE (2009)	δ_{met} = 370m; a_{met} = 0,14; δ= 270m; a = 0,22
ASHRAE apud HEJMANS e WOUTERS (1991)	a = 0,28; A_0 = 0,6
Awbi (2005)	α = 0,25; γ = 0,67
Barbosa (1997)	a = 0,25; K = 0,40
BSI (1991), Awbi (2010)	a = 0,25; c = 0,35
Davenport apud Spera e Richards (1979), Duthinh e Simiu (2011)	α = 0,37 – 0,203 log 2,2= 0,3004882
Defraeye e Carmeliet (2010)	z_0 = 0,05m; z_{0site}= 0,25m; γ = 1,1203
Ghiaus e Allard (2005)	z_0 = 0,05m; λ = 0,24;
Givoni apud Tahbaz (2009), Yang (2004)	a = 0,22
LOG apud Hejmans e Wouters (1991)	Z_e = 0,03m; Z_m = 0,25m
NBR 5422 (ABNT, 1985)	n = 9,5
NBR 6123 (ABNT,1988) / 10821 (ABNT, 2011b)	S_1 = 0,9; b = 0,86; F_r = 1; p = 0,12
Ro e Hunt (2007)	z_0 = 0,05m
Sherman apud Hejmans e Wouters (1991)	α = 0,67; γ = 0,25

Para a definição inicial das condições de contorno das simulações fluidodinâmicas foi escolhido como média representativa dos modelos estudados o perfil da ASHRAE (2009) devido à sua resposta intermediária, muito próxima da média dos valores calculados pelos demais modelos estudados (Figura 22). O *Energy Plus* utiliza o modelo da ASHRAE (VERSAGE, 2009, p. 31). Ele é descrito pela expressão

$$\boldsymbol{u}_{(z)} = \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{met}} \left(\frac{\delta_{met}}{z_{met}}\right)^{\alpha_{met}} \left(\frac{z}{\delta}\right)^{\alpha} \quad (16)$$

Onde z é a altura medida a partir do solo, [m];

z_{met} é a altura na qual é medida a velocidade de referência, em geral, 10m;

δ é a altura da camada limite no local considerado e δ_{met} na estação meteorológica[107] [m];

α é um coeficiente representativo do terreno no local considerado e α_{met} na estação meteorológica [adimensional].

[107] A altura da camada limite atmosférica é influenciada por diversos aspectos morfoclimáticos urbanos, que afetam as trocas de calor entre a massa urbana edificada e a atmosfera, determinando sua variação ao longo do dia. A ASHRAE (2009, p. 24-3) apresenta valores tabelados para os parâmetros utilizados na eq. 16 e indica o modelo de DEAVES e HARRIS (1978) como uma aproximação matemática mais precisa. Para maiores informações consulte-se STULL (2009).

HEJMANS e WOUTERS (1991) comparam alguns dos modelos estudados acima com resultados experimentais de medições em campo. TRINDADE (2006) e TRINDADE et al. (2007) utilizam os modelos estudados por Hejmans e Wouters para definir as condições de contorno em simulações fluidodinâmicas do regime de ventilação em um galpão situado em clima quente-úmido, obtendo resultados semelhantes aos da Figura 22 e também escolheram o modelo da ASHRAE pelos mesmos motivos.

A direção do vento adotada para as simulações foi a direção dominante, sudeste (vide seção 5.1.1.2), considerando a incidência perpendicular à fachada principal da Capela.

A Figura 23 ilustra a configuração dos planos de entrada e saída no módulo *CFX Pre* do *Ansys CFX*, utilizando-se o perfil de vento da ASHRAE com uma velocidade de referência de 2,2m/s no plano de entrada*:*

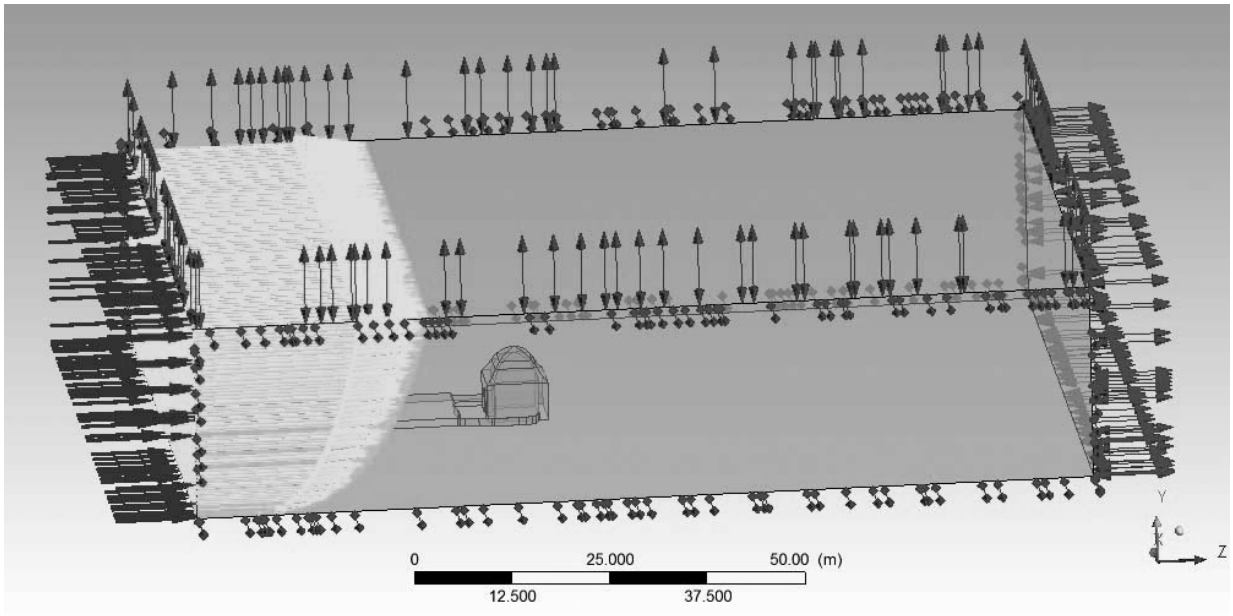


Figura 23 – Configuração de planos de entrada saída no domínio de simulação no programa *CFX Pre*, com perfil de velocidade de vento da ASHRAE.

Após os ensaios em túnel de vento, as simulações fluidodinâmicas em regime permanente e transiente foram repetidas, com o perfil de velocidades no plano de entrada alterado para uma função polinomial de 6ª ordem, multiplicado por uma velocidade de referência de 6m/s (vide seção 5.3), conforme ilustra a Figura 24. As propriedades do ar também foram alteradas para corresponder às condições observadas durante os ensaios no túnel de vento. Cabe destacar que essa repetição consistiu em um procedimento de validação,

visando comparar os resultados provenientes do modelo computacional com as medições realizadas no túnel de vento.

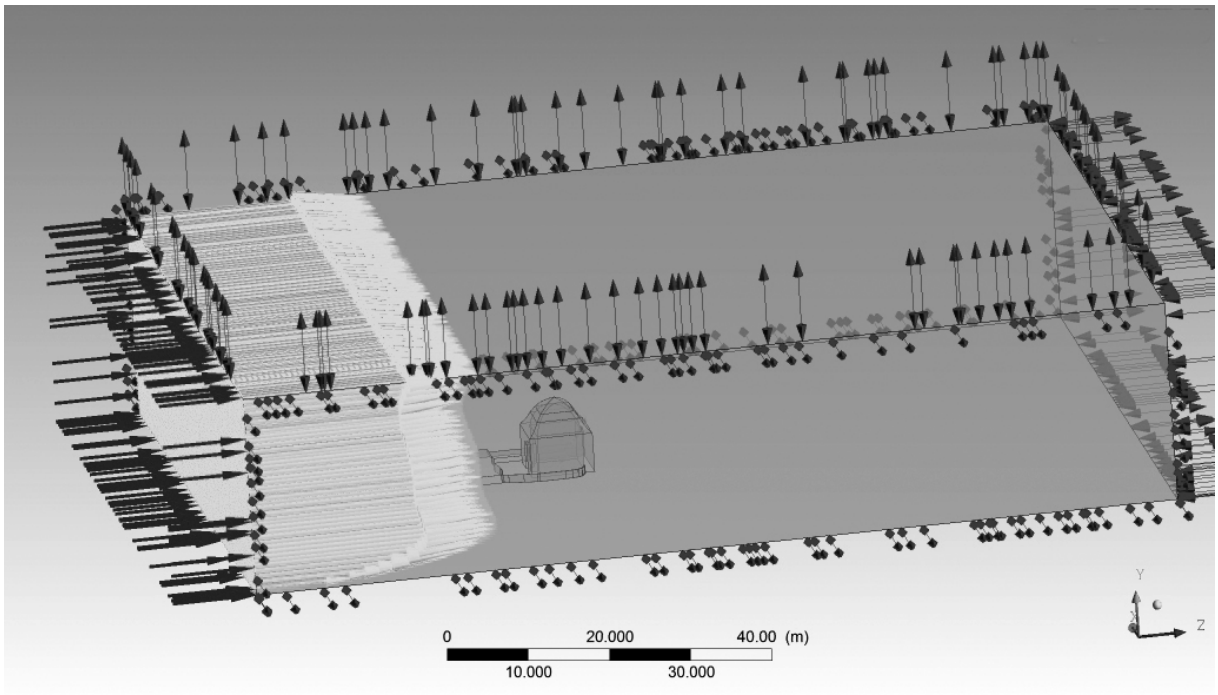


Figura 24 – Configuração de planos de entrada saída no domínio de simulação no programa CFX Pre, com perfil polinomial obtido no túnel de vento.

4.6.3.3. Refinamento da malha e critérios de convergência

Segundo SORENSEN e NIELSEN (2003), a forma mais comum de demonstrar a convergência do modelo é repetir a simulação com uma malha com o dobro de nós e comparar as duas soluções.

Após a configuração da geometria e condições de contorno foi adotado o seguinte procedimento para o refinamento da malha, com a simulação em regime permanente, perfil de vento ASHRAE: (i) verificar o número de nós da malha; (ii) anotar a velocidade média ao longo das retas ilustradas na Figura 25, localizadas no plano longitudinal central do domínio, no centro da cúpula e a 1m de distância das paredes frontal e posterior; (iii) aumentar o número de nós na malha pelo fator de 1,5, modificando os parâmetros *max size* e *max face size*; (iv) repetir os passos anteriores até que o desvio relativo entre uma simulação e outra nas três retas fosse menor que 10%. Esse procedimento é comparável ao que foi utilizado por JIANG et al. (2003, 2004) e EVOLA e POPOV (2006).

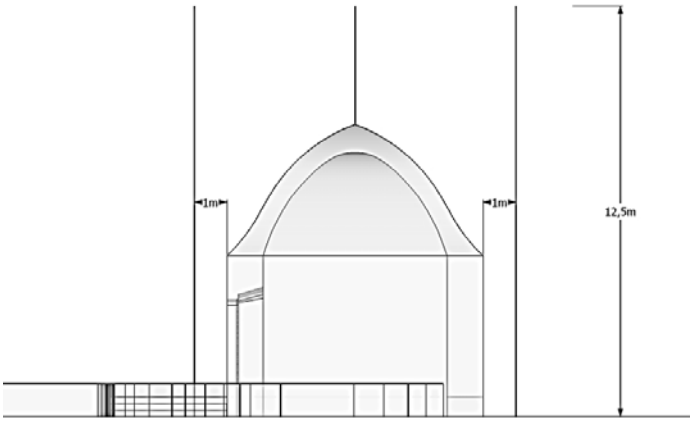


Figura 25 – Capela da Ceia – elevação lateral esquerda (vista em "raio – x"). Posição das retas usadas como referência para o refinamento da malha de simulação no programa *Ansys CFX* ©.

A Tabela 1 mostra a evolução do procedimento descrito acima. Em trabalhos similares na literatura, o critério de convergência adotado para o campo de velocidades foi da ordem de $1x10^{-3}$m/s (HUSSEIN e SHYSHINY, 2008; KHALIL, 2009, 2010, 2012; PAPAKONSTANTINOU et al., 2000a). O procedimento descrito acima não se mostrou suficiente para diminuir o DQM global da simulação, abaixo dessa ordem de grandeza.

Tabela 1 – Parâmetros de refinamento da malha inicial no programa *Ansys CFX* ©

No. do teste	**1**	**2**		**3**		**4**	
No. de nós da malha	422703	543465		641541		804898	
Superfície do modelo	**Valores máximos de y+ / (variação %)**						
cúpula NO	30,36	13,39	(-55,9)	12,60	(-5,9)	13,00	(+0,8)
cúpula SE	27,76	11,32	(-59,2)	8,01	(-29,3)	9,00	(+14,6)
cúpula NE	30,27	13,39	(-55,8)	12,60	(-5,9)	13,00	(+0,8)
cúpula SO	30,36	13,37	(-56,0)	11,64	(-12,9)	11,00	(-2,6)
face NO	10,96	6,73	(-38,6)	8,01	(+18,9)	9,00	(+14,6)
face SE	23,43	13,79	(-41,1)	10,96	(-20,5)	12,00	(+11,9)
face NE	22,20	8,73	(-60,7)	8,91	(+2,1)	8,00	(-6,8)
face SO	18,85	8,34	(-55,8)	8,69	(+4,3)	9,00	(-0,3)
Linha de teste	**Velocidade media [m/s] / (variação %)**						
centro	2,52	2,47	(-1,9)	2,47	(-0,2)	2,47	(0)
norte	1,45	1,43	(-1,2)	1,44	(+0,3)	1,43	(-0,6)
sul	1,00	0,96	(-4,3)	0,96	(-0,5)	1,00	(+4,2)

Foi então aplicado o controle de malha *inflation* ao solo e superfícies externas e internas do modelo, e foram progressivamente reduzidos os parâmetros *max size* e *max face size*, visando à redução do DQM global. Neste processo, chegou-se a uma malha com 14.000.000 de nós, extrapolando a capacidade computacional da licença educacional do programa *Ansys CFX* © adquirida para a pesquisa.

Optou-se então por uma redução do domínio de simulação, adotando-se como critério um procedimento similar descrito acima, com retas colocadas na porção do domínio atrás da Capela, determinando-se a região de corte onde as velocidades começavam a se mostrar constantes. A Figura 26 mostra aspectos da malha não estruturada refinada utilizando o módulo *mesh* do programa *Ansys CFX* ©, e do domínio, que após o processo de redução, passou a ter 115 x 90 x 25m*:*

No processo de refinamento da malha foi também controlado o parâmetro *y*+, que descreve a transição entre fluxo laminar e turbulento nas proximidades das superfícies. Um valor de *y*+=11.63 marca a transição de fluxo laminar para turbulento (interseção entre perfil de vento linear e logarítmico), considerando as mesmas condições de rugosidade e velocidade de referência (LOOMANS, 2004, p. 65; VERTEEG e MALALASEKERA, 2007, p. 275).

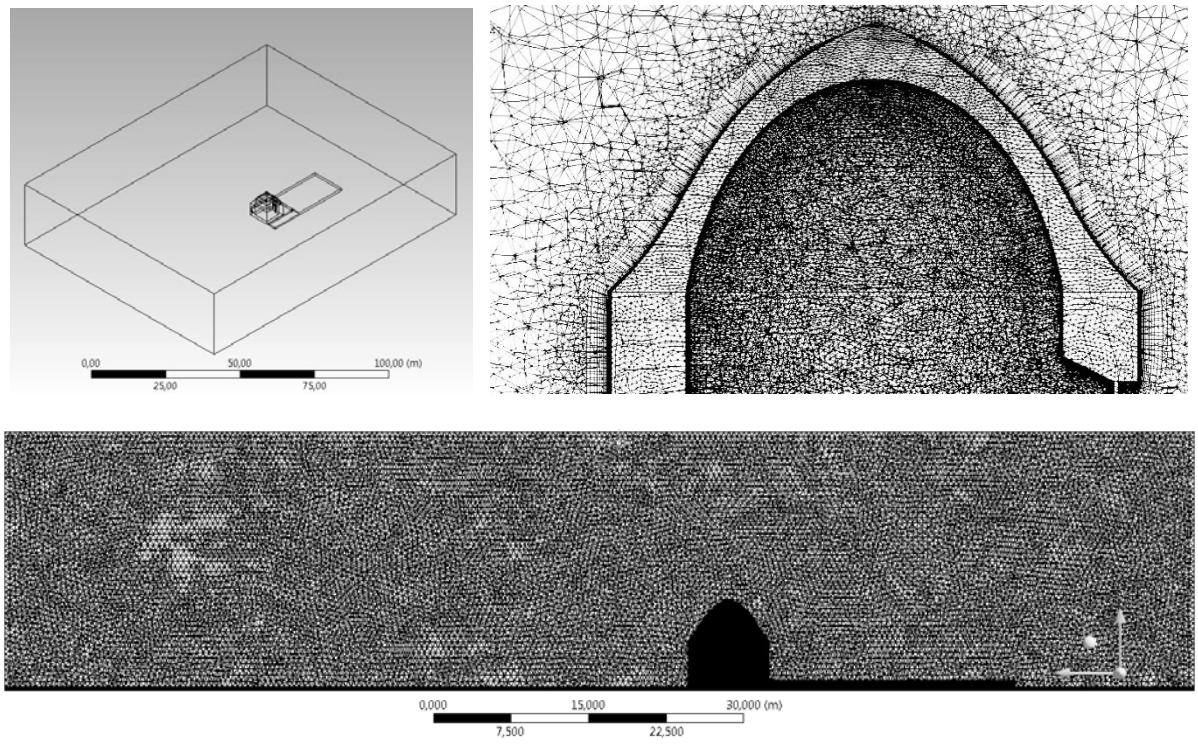


Figura 26 – Capela da Ceia – aspectos do domínio e vista lateral da malha tridimensional gerada no *Ansys CFX*.

Posteriormente à redução do domínio, a malha foi progressivamente refinada, diminuindo-se os parâmetros *max size* e *max face size*, obtendo-se, para a simulação em regime permanente, com perfil de vento ASHRAE, uma malha com aproximadamente 7.600.000 nós, que resultou nos seguintes DQM: **u** – $9{,}2\text{x}10^{-4}$; **v** – $1{,}9\text{x}10^{-3}$; **w** – $9{,}9\text{x}10^{-4}$. O Apêndice E apresenta as configurações adotadas e resíduos numéricos resultantes nas demais simulações fluidodinâmicas.

Em função das limitações expostas acima, optou-se por omitir, na simulação com o domínio completo, a presença dos volumes das esculturas, estantes de canto e mesa presentes no interior da Capela, nas simulações com o *Ansys CFX* ©. Tais elementos foram representados na maquete física utilizada no túnel de vento, com a opção de serem removidos, para a comparação com as simulações computacionais.

Para o cálculo dos coeficientes de pressão foi adotada a expressão:

$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{0{,}5 \cdot \rho \cdot \overline{u}^2} \quad (17)$$

Onde C_p é o coeficiente de pressão, p é a pressão estática em cada ponto do modelo [Pa]; p_{ref} é a pressão de referência [101.325 Pa] e u é a velocidade média calculada no plano de entrada do domínio de simulação [m/s] (COSTOLA et al., 2009b; DE WIT, 1999).

A Universidade Politécnica de Tóquio[108], disponibiliza um banco de dados onde se pode verificar resultados de medições de pressão realizadas em túnel de vento para combinações diversas de edifícios isolados ou em conjunto, com variação das proporções dimensionais e da incidência do vento. A empresa TNO[109] disponibiliza uma versão beta do programa *Cp generator* que roda através da internet, para o cálculo automatizado de coeficientes de pressão com essas mesmas variáveis.

4.6.3.4. Simulação em regime transiente e métricas derivadas

ETHERIDGE (2012, p. 147) estuda as frequências de ressonância resultantes nos casos de salas com ventilação unilateral e variações sinusoidais da pressão. Para a realização de uma simulação transiente, visando verificar a variação do campo de velocidades interno à Capela com o tempo, foi primeiramente simulado um modelo mais simples, mostrado na Figura 27, com vistas a verificar a ordem de grandeza do passo de tempo adequado à simulação transiente. Verificou-se que o passo de tempo mínimo para observação de mudanças significativas no campo de velocidades internas era da ordem de 1s e que o ciclo de movimentação dos vórtices no modelo simplificado era da ordem de 100s.

[108] http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/lowrise/mainpage.html (Acesso em 12/08/2013).

[109] http://cpgen.bouw.tno.nl/cp/ (Acesso em 17/08/2013).

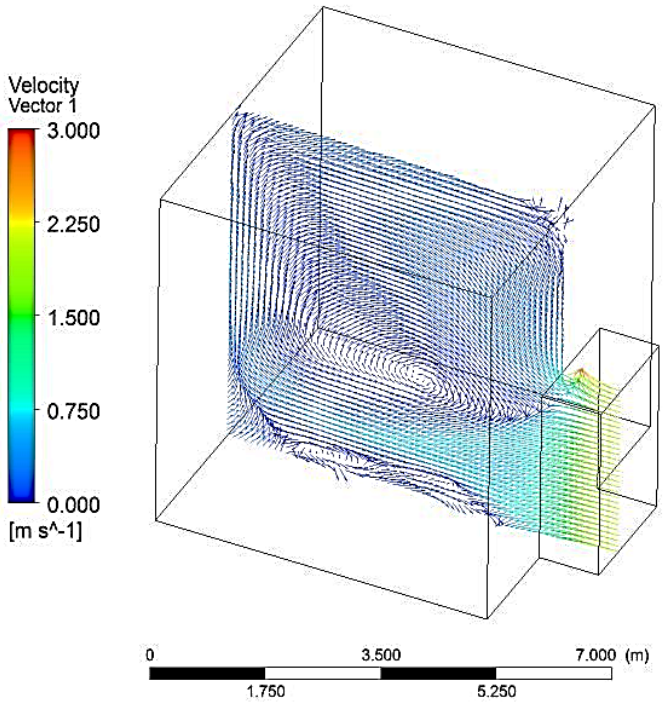


Figura 27 – Modelo simplificado simulado no programa A*nsys CFX* © para estudo do passo de tempo adequado à variação do campo de velocidade interno, nas simulações transientes.

A partir do teste descrito acima e dos resultados da simulação inicial em regime permanente, a simulação transiente foi configurada para obtenção de 175 passos de tempo de 2s (tempo total de simulação de 350s). Verificou-se que com pelo menos sete *loops* internos foi possível atender o critério de convergência de $1x10^{-3}$. Os resultados foram salvos de 4 em 4s. As configurações adotadas e resíduos numéricos resultantes das simulações fluidodinâmicas são apresentados no **Apêndice E**.

4.7- Procedimentos adotados nos ensaios em túnel de vento

Visando refinar os dados de entrada (condições de contorno) utilizados nas simulações computacionais, bem como verificar e validar os resultados obtidos nessas simulações, foram realizados ensaios com uma maquete física no túnel de vento do DEMEC-UFMG. Foram realizadas medições de pressão e velocidade. As características dos equipamentos utilizados nos ensaios, inclusive as do túnel de vento, ilustrado na Figura 28, estão descritas no **Apêndice D**.



Figura 28 – Túnel de vento do DEMEC—UFMG.

4.7.1- Maquetes físicas

Para a Capela da Ceia foi inicialmente executada a maquete mostrada na Figura 29, na escala 1:50. Após a realização do levantamento arquitetônico através de escaneamento tridimensional, verificou-se a necessidade de executar uma segunda maquete da Capela, mais fiel ao edifício construído. Essa segunda maquete, mostrada na Figura 30, foi feita na escala 1:33. Ela foi executada já com os tubos capilares metálicos e tubos plásticos fexíveis (mangueiras) de conexão a serem utilizadas para medição da pressão estática em diversos pontos internos, conforme metodologia de MATSUMOTO et al. (2009).

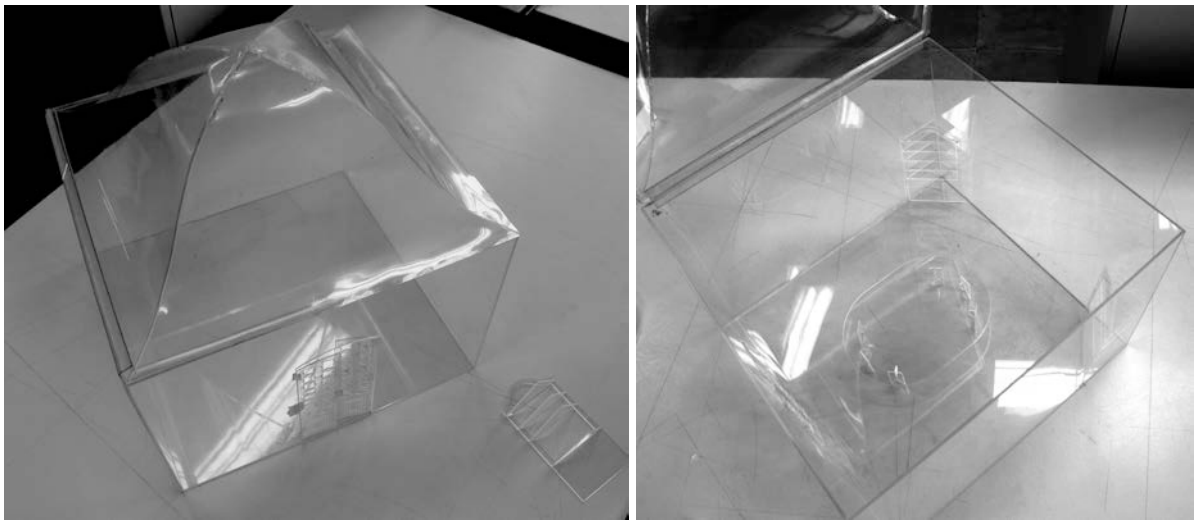


Figura 29 – Capela da Ceia – maquete física inicial para ensaio em túnel de vento.

Foram incluídos na maquete, de forma simplificada, uma parcela do terreno em torno da Capela (vide Figura 11) e obstáculos existentes, como a contenção em frente à entrada e a mureta de contorno, visando considerar minimamente sua influência no escoamento a ser observado no túnel de vento. A representação das esculturas, da mesa e das prateleiras existentes no interior da Capela também foi feita de forma simplificada, utilizando prismas retangulares presos ao piso, possibilitando sua retirada ou inserção durante os ensaios. Uma simplificação semelhante foi adotada por PAPAKONSTANTINOU (2000).

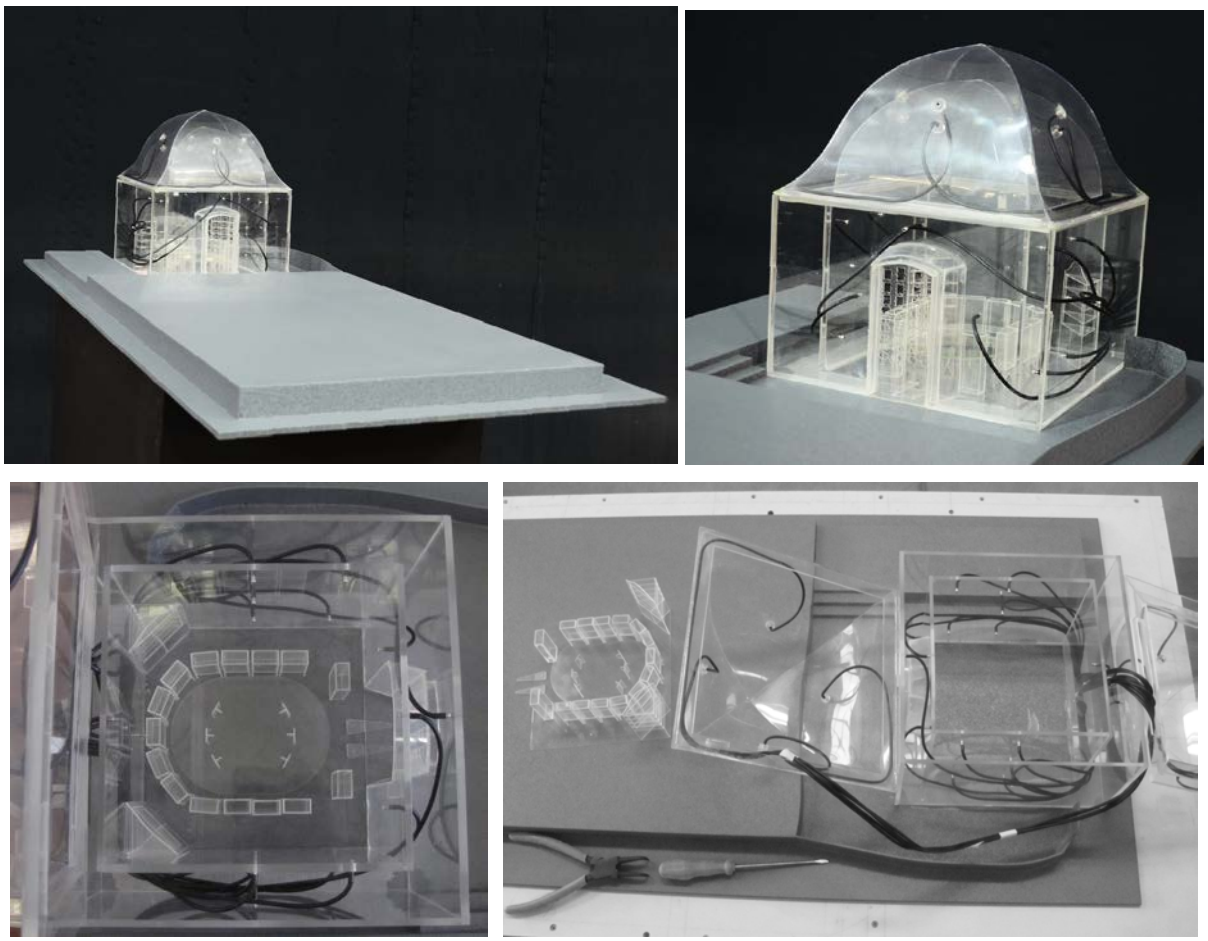


Figura 30 – Capela da Ceia –maquete física utilizada nos ensaios em túnel de vento. Fotos: Autor / Tiago Lourenço

Um aspecto importante a ser observado neste tipo de ensaio é a obstrução da seção de ensaio do túnel provocada pela maquete, o que na prática, influencia na escala a ser adotada para a mesma. COOK e COST citados por CÓSTOLA (2006, p. 90) recomendam uma obstrução máxima de 5% da seção do túnel e uma altura máxima do modelo de 50% da seção de testes.

A seção de ensaio do túnel de vento utilizado mede 1,0m x 1,2m, e a escala da maquete física utilizada é 1:33, o que acarretaria uma obstrução da ordem de 7,5% da área de ensaio. Posteriormente à confecção da maquete, a seção de ensaio do túnel foi modificada, por iniciativa dos professores do DEMEC-UFMG, de uma seção quadrada, para uma seção octogonal. Essa alteração demandou a confecção de bases de madeira vazadas com altura de 25cm para apoiar a maquete e a fonte de emissão do *laser* utilizado para as medições de *PIV*, resultando no aumento da taxa de obstrução para cerca de 10% da área da seção de teste e cerca de 50% de sua altura.

Previamente aos ensaios foram estudados os requisitos de similaridade, conforme indicações e recomendações levantadas em literatura específica[110]. Em ensaios com maquetes em escala realizados em túnel de vento, além da similaridade dimensional, o ajuste da velocidade no túnel é importante para obtenção da similaridade física. Normalmente, as seções de ensaio dos túneis de vento implicam em fatores de escala tipicamente maiores que 100, o que determinaria velocidades muito altas no túnel. De acordo com ETHERIDGE (2012, p.299), quando são testados edifícios com quinas vivas, como no caso em estudo, é possível obter-se bons resultados com velocidades mais baixas, em função das posições de separação do escoamento serem fixas nas quinas, a partir de um determinado ***número de Reynolds (Re)***[111] ***crítico*** (CÓSTOLA et al., 2007, p.455). ETHERIDGE (2012, p.306) aponta que esse valor, para determinação de coeficientes de pressão, é da ordem de 10000. CÓSTOLA et al. (2007) ao determinar coeficientes de pressão nas aberturas de um modelo, verificaram um *Re* crítico da ordem de 500. ETHERIDGE (2012, p. 299) ressalta ainda que, em função dos fatores de escala envolvidos, as mudanças nas variáveis medidas são muito rápidas. Esse último valor foi considerado para a estimativa da velocidade a ser utilizada nos ensaios, obtendo-se analiticamente uma estimativa de cerca de 6m/s para o descolamento do escoamento, que posteriormente foi confirmada no ensaio no túnel de vento.

---

[110] AWBI (2005, p. 222 e segs.), CAREY e ETHERIDGE (1999), ETHERIDGE (2012, p. 294), CÓSTOLA (2006, seção 8.2.2, p. 86 e segs.), CÓSTOLA et al. (2007), LI (2008, p. 54 e segs.).

[111] Número adimensional utilizado na mecânica e dinâmica de fluidos, para discriminar regimes de escoamento. Ele expressa a relação entre as forças de inércia e viscosas no escoamento (CÓSTOLA et al., 2007, p. 453) é um indicador da probabilidade de ocorrência de regimes laminares (baixas velocidades, linhas de corrente simples) ou turbulento (altas velocidades, linhas de corrente complexas). É calculado como $\mathbf{Re = (\rho.u.L) / \mu}$ onde ρ é a massa específica do fluido, μ é a viscosidade dinâmica e L é o comprimento característico no caso em estudo. ETHERIDGE (2012, p. 302) indica outros parâmetros relevantes para análises de similaridade.

4.7.2- Medições de pressão

O ensaio em túnel de vento iniciou-se pela observação da velocidade mínima para ocorrência do descolamento do escoamento em diversos pontos da maquete, utilizando-se pequenos pedaços de linha de costura fixados nas mesmas. Para minimizar o descolamento do escoamento na porção frontal da maquete foi esculpida uma borda de ataque curva em isopor (Figura 31).

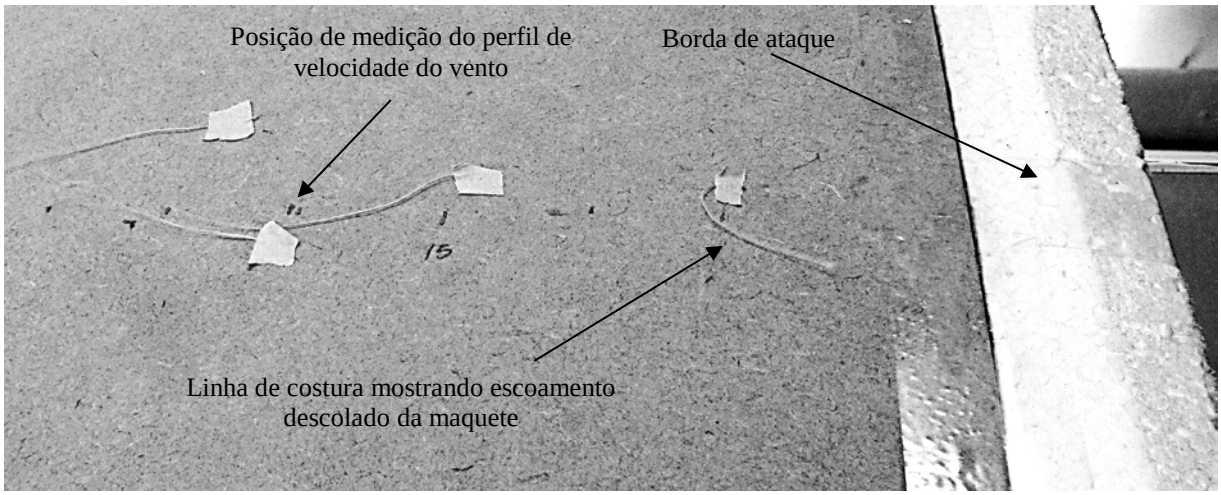


Figura 31 – Ensaio em túnel de vento – detalhe mostrando o descolamento do escoamento anterior à posição de medição perfil de velocidade de vento próxima à borda de ataque.

A seguir, foram feitas medidas de pressão estática em superfícies do interior e exterior da maquete. A pressão foi medida em vinte pontos no interior da maquete, e oito pontos externos, conforme ilustrado na Figura 32. MATSUMOTO et al. (2009) apresentam uma metodologia simplificada para cálculo de ventilação natural através de ensaios com maquetes em túnel de vento, verificando as pressões nas superfícies internas e externas bem como as velocidades em pontos internos e externos.

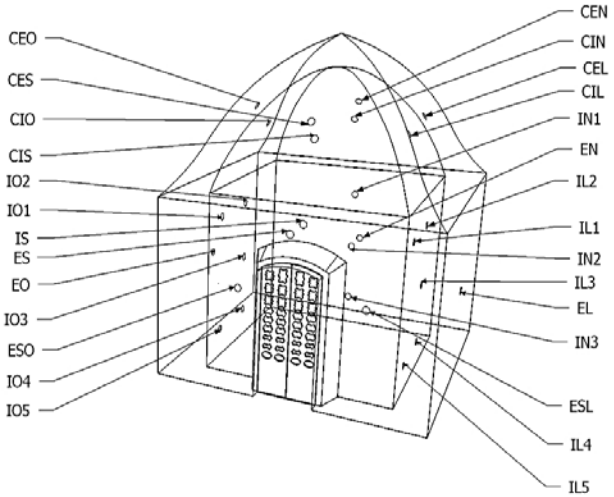


Figura 32 – Capela da Ceia – posição dos furos para medições de pressão na maquete física

Para a medição da pressão estática, em cada ponto de medição foi inserido um tubo capilar de diâmetro 2mm, com uma das aberturas faceando a superfície no ponto de medição e a outra conectada através de um tubo plástico flexível com o mesmo diâmetro do tubo capilar metálico a dois transdutores de pressão marca Scanivalve Corp, modelo BSA-3217/16PX, acoplados a um computador, conforme detalhe mostrado na Figura 33. Simultaneamente a cada medição de pressão, foram medidas de 3 em 3s, durante 30s, a velocidade de referência, temperatura e umidade relativa no centro da seção de ensaio, 15cm a frente da borda de ataque, utilizando um termoanemômetro marca TSI/Alnor modelo TA440 (vide Figura 34). Externamente, a pressão, temperatura e umidade relativa do ar foram medidas simultaneamente por meio de uma estação meteorológica marca Oregon modelo WMR 968, instalada no galpão do túnel de vento.



Figura 33 – Ensaio em túnel de vento – posicionamento e detalhe da conexão com os transdutores de pressão.

A partir da estimativa de velocidade crítica para o descolamento do escoamento, descrita na seção anterior, e também da observação da velocidade mínima para o descolamento do escoamento em alguns pontos da maquete, foram feitas medições de pressão nos pontos indicados acima, com velocidades de referência no centro da seção de ensaio, de 1 a 8m/s, variando progressivamente de 1 em 1m/s. Os transdutores de pressão foram controlados por rotinas computacionais dedicadas, escritas no programa *Matlab* ©. Antes de cada medição, o túnel de vento era desligado e a matriz de pressões estáticas em cada ponto, com velocidade nula, obtida através de uma rotina chamada "zerar".

Para cada velocidade de referência, a matriz de pressões estáticas foi medida cinco vezes, desligando-se o túnel e executando-se a rotina "zerar" antes de cada medição. Uma rotina chamada "leitorpitot" foi utilizada para ler a matriz de pressões estáticas com o túnel ligado e subtrair a matriz de pressões estáticas com a velocidade nula, fornecendo portanto uma matriz de pressões diferenciais em cada ponto de medição. Dividindo-se essa pressão diferencial pela pressão atmosférica de referência, obteve-se a matriz de coeficientes de pressão em cada ponto de medição, cuja média aritmética foi posteriormente comparada aos valores simulados no programa *Ansys CFX* ©. Para cada ponto de medição o erro absoluto foi calculado subtraindo, do Cp simulado, a média do Cp obtido para $\mathbf{u_{ref}} > 4$m/s.

CÓSTOLA (2006, p. 101) comenta em detalhes a utilização de transdutores de pressão e anemômetros de fio quente neste tipo de ensaio. Ensaios utilizando essa metodologia devem ser planejados cuidadosamente, pois demandam grande tempo em sua preparação e a presença dos tubos e mangueiras interferem na execução da maquete.

4.7.3- Medição de perfis de velocidade do vento

Em seguida foram levantados os perfis de velocidade do vento a partir do solo, utilizando o termoanemômetro TA440 (Figura 34).

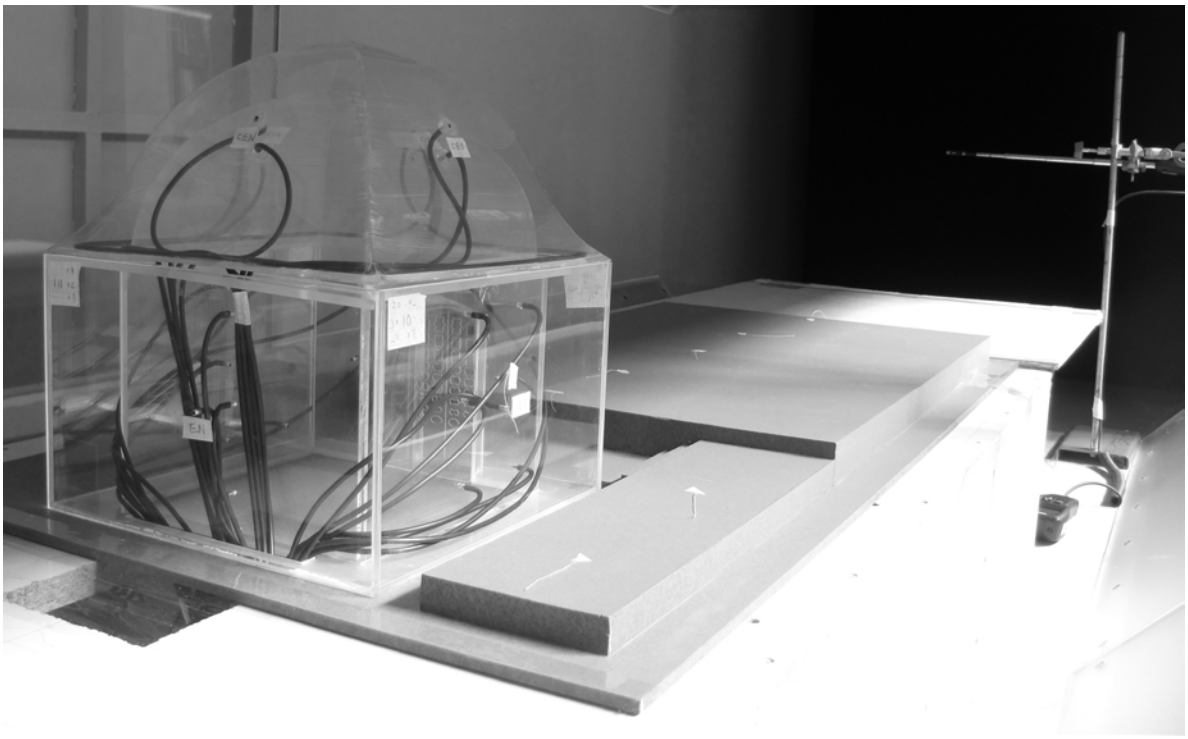


Figura 34 – Ensaio em túnel de vento - posicionamento do termoanemômetro para medição da velocidade de referência no centro da seção de ensaio.

Os perfis foram levantados no eixo longitudinal da maquete, a 13,3cm (4m na escala 1:33) e a 126,5cm (38m na escala 1:33) à frente da fachada frontal (Figura 35). A segunda posição corresponde à distância em que o escoamento se cola à maquete, por influência da borda de ataque (vide Figura 31). As medições foram feitas a partir do solo da maquete, a cada 3,33cm (1m na escala 1:33). Em cada altura, foram feitas 60 medições, de 1 em 1s, 1min após o túnel ser ligado. O perfil obtido na posição 1 foi utilizado para corrigir o perfil da ASHRAE utilizado nas simulações fluidodinâmicas (vide seção 4.6.3.2).

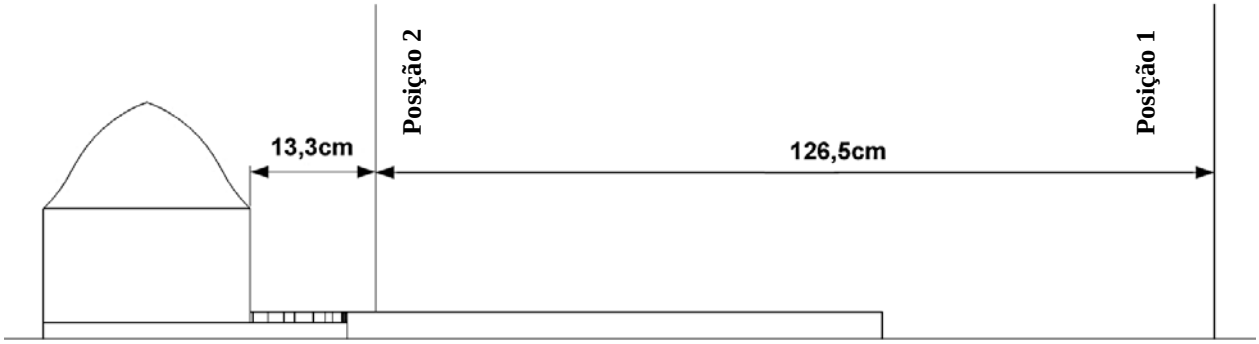


Figura 35 – Ensaio em túnel de vento – posições de medição dos perfis de velocidade do vento.

4.7.4- Velocimetria por imageamento de partículas (PIV)

As maquetes foram executadas em acrílico visando permitir o uso de técnicas de *PIV* (*Particle Image Velocimetry*), para obtenção do campo de velocidades e visualização do escoamento. A técnica baseia-se no processamento de pares de imagens obtidos na seção de testes do túnel de vento[112].

Para a visualização do escoamento, foram utilizadas partículas de névoa à base de glicerina, geradas a montante da maquete, por meio de um gerador por pressão marca Dantec modelo Flow Tracker 700 CE e um gerador elétrico marca Tecport modelo F800, posicionados no início do bocal de constrição do túnel, conforme ilustrado na Figura 36. SAUNDERS e ALBRIGHT apud AWBI (2005, P. 502) utilizaram uma metodologia similar. AWBI (2005, p. 502) lembra que é importante que a densidade da fumaça seja próxima da densidade do ar, para evitar erros devido à movimentação gravitacional (empuxo) das partículas, efeito que em alguns casos pode ser desprezado. LOOMANS (2004) utilizou uma técnica de inseminação do escoamento com bolhas de sabão preenchidas com gás hélio.

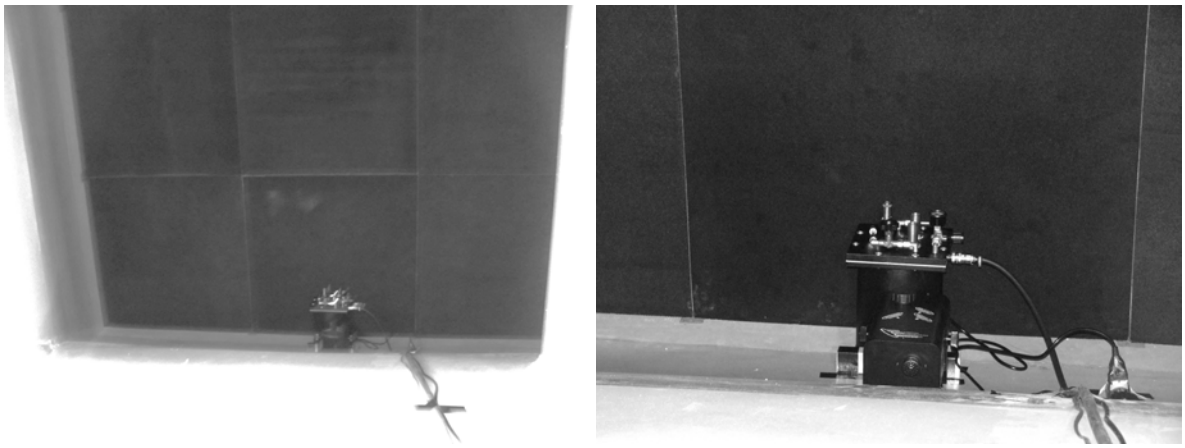


Figura 36 – Ensaio em túnel de vento - posicionamento dos geradores de névoa.

A seguir, utilizando o *laser* marca Dantec modelo Dual Power, projetou-se no plano longitudinal da maquete transparente, um plano de luz pulsada obtido a partir da passagem de raio laser por uma lente cilíndrica, que iluminou as partículas de fumaça semeadas no escoamento. Uma câmera CCD marca Dantec modelo DK2740, posicionada ortogonalmente

[112] Informações detalhadas sobre a técnica *PIV* podem ser encontradas em LOOMANS (2004, seção 3.7) e também no site do fabricante de *lasers* DANTEC: http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=651 (Acesso em 22/01/2013).

em relação ao plano de luz, foi utilizada para registrar as imagens obtidas no plano iluminado pelo *laser*. O programa *Dynamic Studio* © foi utilizado para calibrar a medição, processar as imagens e calcular a velocidade de deslocamento das partículas. A calibração dimensional é feita no programa mediante a marcação, na imagem, de uma distância em escala real. A técnica *PIV* clássica fornece componentes bidimensionais da velocidade, mas a técnica pode ser utilizada para obter três componentes, utilizando uma câmera adicional, através de estereoscopia (ETHERIDGE, 2012, p. 325; CÓSTOLA, 2006, p. 112; LOOMANS, 2004, p. 51).

A Figura 37 ilustra a montagem utilizada e instantâneos registrados durante os ensaios. Durante os ensaios a velocidade de referência no centro da seção foi medida usando o termoanemômetro TA-440 e as imagens foram adquiridas com velocidades de 6, 4 e 1m/s, com intervalos temporais entre *frames* variando entre 5 e 33000μs.

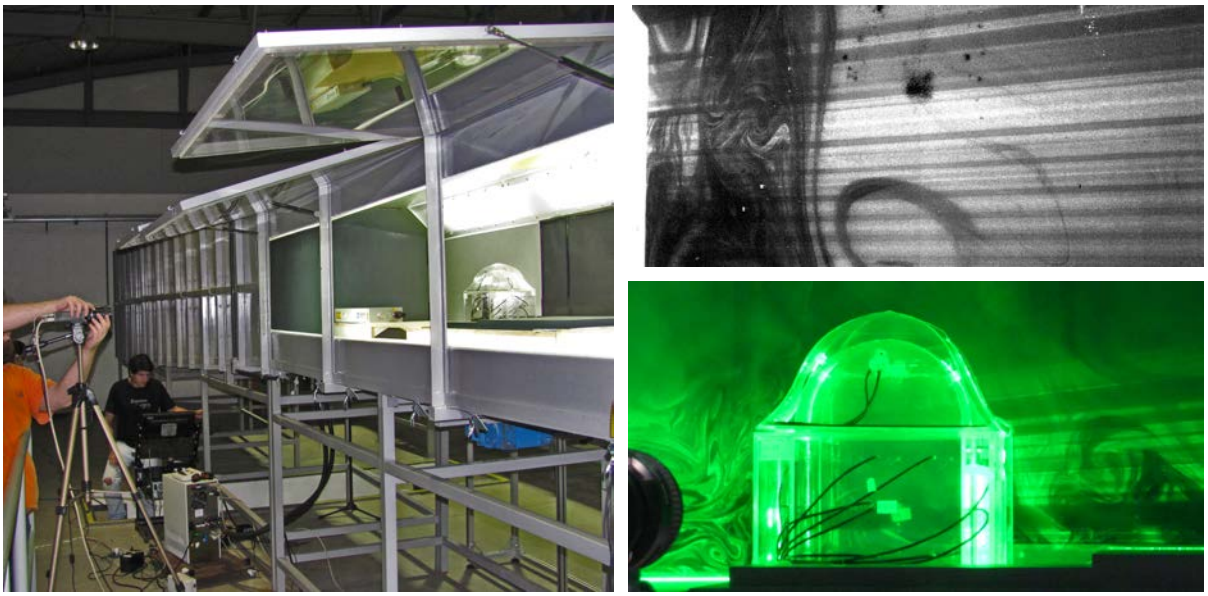


Figura 37 – Ensaio túnel de vento – montagem dos equipamentos para medição com técnica *PIV* e instantâneos durante o ensaio em execução.

No programa *Dynamic Studio* © a correlação adaptativa para obtenção do campo de velocidades foi feita utilizando uma área de varredura de 32x32 pixels, superposição entre áreas de 25x25%, 3 passos de refinamento, com 2 loops em cada passo.

4.8- Procedimentos adotados para obtenção das métricas de preservação

A seguir são descritos os procedimentos adotados para obtenção das métricas de preservação, calculadas com base nos dados monitorados e nos resultados das simulações computacionais. Das métricas estudadas no Apêndice A, somente não foi calculado o índice de corrosão, em função de não existirem objetos metálicos expostos na Capela da Ceia.

4.8.1- Índices de desempenho

As métricas de preservação mais simples são os índices de desempenho (vide seção A.1 do Apêndice A). Para sua quantificação e análise é necessário examinar estatisticamente os dados provenientes do monitoramento ambiental, com vistas ao estabelecimento de critérios-limite para as variáveis em estudo. Esse exame foi feito com os dados monitorados internamente à Capela, tendo como referências adicionais as zonas de segurança discutidas na seção B.2 do Apêndice B e os padrões de classificação da ASHRAE (vide Quadro 2 na seção 2.4.3).

Dentre os procedimentos realizados, destaca-se a análise dos histogramas de frequência cumulativa, para determinação de critérios-limite (zonas de segurança) para as variáveis ambientais monitoradas. De acordo com a norma europeia EN 15757 (UNI, 2010) o 7º e o 93º percentis podem ser usados para determinar os limites de segurança para a umidade relativa, e também para a temperatura, quando tratada com igual prioridade.

4.8.1.1. Flutuações de UR - metodologia Bratasz-Kozłowski

BRATASZ (s.d.) e BRATASZ et al. (2007a) propõem a seguinte metodologia para determinação da faixa segura de flutuações de umidade relativa, corrigida por KOZŁOWSKI (2010)[113]: (i) determina-se o 7º. e o 93º. percentis no histograma de frequência cumulativa de flutuações horárias, considerados o limite inferior e superior de flutuação; (ii) arbitra-se um desvio máximo (ΔUR) entre o **ciclo sazonal**[114] e a média normal anual para fins de ponderação das flutuações máximas (os autores recomendam 20%); (iii) calcula-se um fator

[113] Para mais detalhes, vide discussão na seção A.4 do Apêndice A.

[114] A norma EN 15757 (UNI 2010) conceitua como ***ciclo sazonal*** a média móvel de *T* ou *UR* calculada para o período compreendido entre 15 dias anteriores e 15 dias posteriores a cada valor monitorado. Vide também (BICHLMAIR et al, 2013).

de ponderação (F) tal que F=0 quando ΔUR=0, variando linearmente até 1, quando ΔUR for maior ou igual ao desvio máximo arbitrado; (iv) para cada registro horário, calcula-se os limites inferior e superior da zona de segurança para a umidade relativa, com as flutuações ponderadas.

4.8.1.2. Ciclos de flutuação de T e UR - Metodologia Camuffo-Pagan

Conforme discussão apresentada no Apêndice A, histogramas dos ciclos de flutuação de temperatura e umidade relativa podem ser úteis para determinar a umidade "provada" e limites seguros de flutuação para guarda dos bens culturais.

Dentre os procedimentos adotados para obtenção de índices de desempenho, procedeu-se à análise, por três métodos diferentes, dos ciclos de flutuação de T e UR monitorados na Capela da Ceia, com base na metodologia apresentada por CAMUFFO e PAGAN (2004), CAMUFFO et al. (2002, 2004b), CORREA (2004) e MARTENS (2012): (i) diferença entre médias diárias consecutivas; (ii) diferenças entre média diária e ciclo sazonal; (iii) amplitude diária.

Os valores mostrados nos histogramas de frequência dos ciclos de flutuação, apresentados no Capítulo 5, indicam valores típicos de flutuações das variáveis monitoradas, aos quais as esculturas foram expostas durante o período de monitoramento. Eles podem servir como referência de padrões para o gerenciamento ambiental, na eventualidade de uma remoção das esculturas para o museu ora em construção ao lado do Santuário.

Segundo a metodologia apresentada por CAMUFFO e PAGAN (2004) e CAMUFFO et al. (2002, 2004b) discutida na seção A.4 do Apêndice A, limites "seguros" das flutuações de temperatura e umidade relativa para minimizar danos físico-mecânicos, em artefatos de madeira, podem ser avaliados através do seguinte procedimento: (i) identifica-se a **moda** no histograma de flutuações diárias, considerada como o valor "provado" pelos materiais, ao qual eles estão adaptados, ao longo do período considerado; (ii) identificam-se os valores que correspondem ao dobro da moda, que segundo os autores citados seriam ainda admissíveis, ainda que inspirem mais atenção, pois sua repetição pode causar novas fissuras ou o crescimento das fissuras existentes.

Como procedimento complementar àqueles definidos por Camuffo e Pagan, caberia considerar o número de ciclos de flutuações necessários para a fissuração (vide seção A.4 do

Apêndice A), o que não foi feito nesta pesquisa por exigir um exame minucioso das esculturas.

4.8.2- Isopermas e permanência ponderada pelo efeito cumulativo do tempo (Isoperma-T)

Por meio da metodologia de Sebera estudada na seção A.2 do Apêndice A, pode-se obter taxas comparativas de permanência, em relação ao par de temperatura e umidade relativa (20ºC/50%) arbitrado como isoperma 1. Para aplicação das equações 27 e 28 (seção A.2 do Apêndice A) adotou-se uma energia de ativação E = 25Kcal/mol, correspondente ao valor inferior utilizado por Sebera como referência para descrever a hidrólise da celulose. Esse valor é consistente com valores empíricos encontrados na literatura, relatados na seção A.2 do Apêndice A, para os estágios iniciais de processos químicos de deterioração da madeira.

Aplicando-se os conceitos desenvolvidos para o *IETP*, na seção A.3 do Apêndice A, aos conceitos de Sebera, pode-se calcular uma **taxa de permanência média**, **ponderada pelo efeito cumulativo do tempo** – aqui denominada ***Isoperma-T*.**

Foram seguidos os seguintes passos, para cada valor obtido no monitoramento ambiental: (i) cálculo da taxa de permanência **instantânea** *P2/P1* (eq. 28 do Apêndice A) sendo *P1*=1,0 arbitrada para *T*=20ºC e *UR*=50%; (ii) cálculo da taxa de deterioração (eq. 25 do Apêndice A); (iii) cálculo da taxa de deterioração ponderada pelo efeito cumulativo do tempo – $\boldsymbol{r_T}$ - considerada como média aritmética de todas as taxas de deterioração anteriores; (iv) cálculo da taxa de permanência **ponderada** pelo efeito cumulativo do tempo $\boldsymbol{Isoperma\text{-}T = 1 / r_T;}$ (v) cálculo de médias móveis utilizando os valores anteriores de temperatura (24h anteriores) e de umidade relativa (30 dias anteriores); (vi) cálculo da taxa de permanência *P2/P1* considerando os valores das médias móveis;

Cabe destacar que os períodos utilizados para o cálculo das médias móveis no procedimento descrito acima diferem do ciclo sazonal de 15 dias anteriores e 15 posteriores, proposto na norma EN 15757 (BICHLMAIR et al., 2013; UNI 2010). O efeito cumulativo do tempo sobre as taxas de permanência é função somente das condições anteriores a cada intervalo de tempo no monitoramento.

4.8.3- Índice de preservação (IP) e índice de preservação ponderado pelo efeito cumulativo do tempo (IETP)

O cálculo do *IP* e do *IETP* para cada par de valores obtido no monitoramento ambiental da Capela da Ceia foi feito em conformidade com a metodologia discutida na seção A.3 do Apêndice A, seguindo os seguintes passos:

(i) Cálculo da taxa de deterioração ***r*** usando as equações (18) e (19), notando $\boldsymbol{r_{Padfield}}$ para o valor calculado pela eq. (18) e $\boldsymbol{r_{IPI}}$ para o valor calculado pela eq. (19), ambos com base em médias móveis de 24h anteriores para a temperatura e 30 dias anteriores para umidade relativa; (ii) Cálculo dos índices de preservação, respectivamente $\boldsymbol{IP_{Padfield} = 1 / r_{Padfield}}$ e $\boldsymbol{IP_{IPI} = 1 / r_{IPI}}$**;** (iii) cálculo da taxa de deterioração ponderada pelo efeito cumulativo do tempo – $\boldsymbol{r_T}$ - considerada como média aritmética de todas as taxas de deterioração anteriores; (iv) cálculo do índice de preservação ponderado pelo efeito cumulativo do tempo $\boldsymbol{IETP = 1 / r_T}$, notando respectivamente $\boldsymbol{IETP_{Padfield}}$ e $\boldsymbol{IETP_{IPI}}$.

$$\frac{1}{IP_{Padfield}} = r_{Padfield} = UR \cdot 5{,}9 \cdot 10^{12} \cdot e^{\frac{-90300}{R \cdot T}} \tag{18}$$

$$\frac{1}{IP_{IPI}} = r_{IPI} = \frac{365}{e^{\left(\frac{95220 - 134{,}9 \cdot \mathrm{UR}}{R \cdot T} + 0{,}0284 \cdot UR - 28{,}023\right)}} \tag{19}$$

Cabe lembrar, conforme discutido na seção A.3 do Apêndice A, que esses índices devem ser utilizados apenas para fins de comparação entre períodos em um mesmo ambiente ou entre dois ambientes em períodos distintos. A escolha entre as duas formulações proposta por PADFIELD (2004) é arbitrária. Optou-se então pelo IP_{IPI} (eq. 19) para comparar-se os índices obtidos com base nos dados monitorados com os índices derivados dos resultados das simulações computacionais. Como os valores de IP_{IPI} (eq. 19) são menores que os de $IP_{Padfield}$ (eq. 18) para os dados monitorados na Capela, essa escolha representa uma expectativa mais pessimista em termos da permanência das esculturas, o que poderia ser uma postura favorável em termos de sua conservação, uma vez que indicaria inspeções mais frequentes.

4.8.4- Conteúdo de umidade nas condições de equilíbrio (EMC) e mudança dimensional (DC)

Foram calculados utilizando os algoritmos discutidos na seção A.4 do Apêndice A. Para cada par de temperatura e umidade relativa obtido no monitoramento, foram seguidos os seguintes passos: (i) cálculo de média móvel das 24h anteriores para a temperatura e dos 30 dias anteriores, para a umidade relativa; (ii) cálculo do *EMC* (eq. 35); (iii) cálculo de ΔDC (eq. 50); (iv) verificação de *EMC* e ΔDC máximo e mínimo absolutos; (v) cálculo de *DC* cumulativa (eq. 51).

4.8.5- Fator de risco de mofo (MRF)

Foi calculado seguindo os passos do algoritmo do modelo do IPI, descrito por NISHIMURA (s.d.), indicados na seção A.5 do Apêndice A.

Com base nas indicações de SEDLBAUER (2001), o índice *TOW* foi calculado para cada intervalo de tempo, como **a fração total das últimas 24h** na qual a *UR* permaneceu acima de 80%.

4.9- Limites da pesquisa e incertezas experimentais

Para CÓSTOLA (2005), incerteza é um

> parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que poderiam ser razoavelmente associados ao mensurado. Esta definição parte da constatação de que é virtualmente impossível conhecer o valor verdadeiro de uma grandeza. Pode-se, sim, estabelecer um intervalo dentro do qual existe uma grande probabilidade de que o valor verdadeiro se situe. (CÓSTOLA, 2005, p. 52).

O grande número de procedimentos, dados, equipamentos e suposições adotados e resultados obtidos nesta pesquisa dificulta um tratamento matemático das incertezas envolvidas, por meio do cálculo numérico de uma incerteza global, expressa em termos de magnitudes, probabilidades, e indicação de intervalos de confiança estatísticos.

Procurou-se então descrever a seguir as fontes de erro presentes em cada etapa da metodologia, enfatizando-se os procedimentos adotados para minimizar a sua influência. A descrição detalhada e características operacionais dos equipamentos utilizados são apresentadas no **Apêndice D**.

4.9.1- Levantamento arquitetônico e elaboração de maquetes físicas e eletrônicas

Na etapa de levantamento arquitetônico, realizado por meio dos procedimentos descritos na seção 4.3, os possíveis erros dizem respeito ao posicionamento do escâner, cuja resolução de leitura é da ordem de 0,1mm. Para evitar erros, foram posicionados na Capela diversos alvos, que são usados simultaneamente para a superposição das diversas tomadas de dados, na montagem da nuvem de pontos. Durante o processo de escaneamento, o mínimo deslocamento de qualquer deles é suficiente para que seja retirado da amostra. Isso ocorreu com dois deles, sem prejuízo do resultado, pois são necessários, em cada tomada, no mínimo dois alvos como referência.

No processo de importação da nuvem de pontos do *Geomagic* © para o *SketchUp v.8*© ocorre uma simplificação. O *Geomagic* © utiliza um algoritmo para posicionar pequenos planos a cada conjunto de três pontos, mas o *SketchUp v.8* © não suporta simultaneamente os milhões de planos provenientes da "nuvem" resultante do escaneamento. A exportação dos dados do *Geomagic* © para o *SketchUp v.8* © foi feita através de um formato DXF, o que implica em uma simplificação dos dados. Nas superfícies de maior área coplanar, como por exemplo nas paredes, essa simplificação praticamente não implica em erros, os quais são maiores nas superfícies curvas como as das esculturas. Porém, devido a grande precisão de leitura do escâner, o erro máximo na interpolação dos planos em relação à superfície real, mesmo nas superfícies curvas, não ultrapassa 1cm.

Uma dificuldade adicional surge exatamente da grande precisão no levantamento, quando se verifica a grande irregularidade na espessura e revestimento das paredes, variando em até 10cm. Adotou-se para as paredes uma espessura de 1,10m, conforme indicado na Figura 13, o que representaria um erro de até cerca de 5% da espessura em alguns pontos. Contudo, em função do grande isolamento e inércia térmica das envoltórias, o erro causado nas simulações por essa suposição é pequeno.

Na elaboração da maquete física foi considerada uma porção do terreno com extensão de 20m à frente da Capela, desprezando-se a pequena declividade existente no terreno real e também não foram incluídos os edifícios do entorno (vide Figura 11). Presumiu-se que essa distância seria suficiente para obter um perfil de vento desenvolvido à frente da Capela, o que foi confirmado posteriormente nos ensaios em túnel de vento. Elementos arquitetônicos decorativos como os pináculos também foram omitidos, por interferirem pouco com o escoamento no entorno do edifício e principalmente em seu interior.

4.9.2- Monitoramento ambiental contínuo em campo e processamento de dados

Nesta etapa poderiam ocorrer erros relacionados com os valores obtidos nos sensores utilizados, devidos não somente às suas características técnicas, mas também ao seu posicionamento. Para evita-los foram tomados os cuidados descritos na seção 4.4, iniciando pelos procedimentos de aferição dos sensores em laboratório e na estação meteorológica do 5º. DISME/INMET (Apêndice D).

Está também presente nesta etapa a possibilidade de desvios nos resultados relacionada ao uso dos dados meteorológicos da estação de Ouro Branco. Para verificar a confiabilidade destes dados, foram utilizados alguns dados obtidos na estação meteorológica instalada no escritório técnico do IPHAN em Congonhas.

Outra fonte de erro possível seria a realização das medições em um período atípico climaticamente. Essa hipótese foi descartada por meio da comparação estatística dos dados climáticos do período de medições com a série histórica disponível para Ouro Branco.

No processamento dos dados climáticos e obtenção dos resultados do monitoramento ambiental os dados monitorados de 15 em 15 min foram acumulados em médias horárias. Para obtenção do ano climático externo foram obtidas médias horárias da série histórica constituída de cinco anos de dados horários fornecidos pelo INMET.

Para obtenção de alguns parâmetros psicrométricos como, por exemplo, razões de umidade, foram utilizados algoritmos indicados pela ASHRAE (2009), que fornecem aproximações numéricas dos parâmetros calculados, e contêm, consequentemente, erros embutidos. AFONSO (2011), BERNARDI (2008), BOU SAID (2003), CAMUFFO (1998, p. 60) e COSTA (1999, cap. 5) também apresentam fórmulas simplificadas para essa finalidade.

4.9.3- Simulações computacionais

Baseadas em modelamentos físico-matemáticos de processos reais, as simulações computacionais também têm suas limitações. A qualidade da simulação depende, dentre outros fatores, da precisão do modelo e das suposições adotadas nas **condições iniciais e de contorno**. A norma ASME V&V 20-2009 (ASME, 2009) regulamenta os procedimentos de avaliação das incertezas envolvidas em simulações fluidodinâmicas computacionais.

CLARKE (2001) e DE WIT (2003) indicam os trabalhos mais relevantes da literatura sobre cálculo de incerteza em simulações computacionais de edifícios, listam e comentam os principais parâmetros envolvidos e indica princípios a serem seguidos neste tipo de análise[115]. De Wit classifica as principais fontes de incerteza como sendo oriundas de: (i) discrepâncias entre o edifício construído e as especificações de projeto; (ii) desvios no modelamento físico-matemático oriundos de simplificações de processos complexos; (iii) desvios numéricos relacionados com os processos de discretização (elaboração da malha de volumes de controle) e simulação; (iv) cenários impostos ao edifício (p. ex., regime climático, ocupação, uso de equipamentos). McDONALD (2002) e McDONALD et al. (1999) discutem procedimentos numéricos e estatísticos a serem incorporados às simulações após a definição das incertezas, que implicam na criação de múltiplos controles de simulação.

Para a simulação no *Energy Plus* ©, adotaram-se algumas suposições que poderiam acarretar erros: (i) montagem do arquivo formato EPW de entrada a partir das médias horárias calculadas para a série histórica de cinco anos fornecida pelo INMET; (ii) simplificação geométrica do modelo, por meio do uso da maquete eletrônica mostrada na Figura 15 – os maiores desvios ocorrem na geometria da cúpula adotada, que é piramidal, enquanto o dorso interno real é parabólico. Pelos mesmos motivos explicados acima para a simplificação geométrica das paredes, o erro esperado devido a essa suposição é pequeno; (iii) propriedades térmicas (vide Tabela 59 do Apêndice E) – sua adoção foi baseada na comparação de uma dúzia de referências, não se elencando, entre os procedimentos adotados nesta pesquisa, a medição *in loco* de tais propriedades. Cabe destacar as aproximações adotadas quanto aos coeficientes de absortância, coeficientes do modelo *EMPD* (Tabela 60 e definições do arquivo IDF apresentados no Apêndice E) e a análise de sensibilidade do modelo descrita na seção 4.6.2.2; (iv) não foi incluída na simulação a carga térmica devida à iluminação artificial existente da Capela, devido à mesma só ser utilizada eventualmente; (v) a temperatura do ar da Capela foi considerada uniforme, desconsiderando-se a existência de um gradiente térmico. DE WIT (2003, p. 38) discute os erros relacionados a essa suposição.

[115] Vide as referências listadas na nota 93 acima.

Cabe ainda enfatizar a presença de incertezas dos diversos modelos e algoritmos utilizados pelo *Energy Plus*, como por exemplo os modelos de ganhos térmicos por radiação, o *airflow network* que incorpora partes do *COMIS* e do *AIRNET* e os modelos disponíveis para aproximação da adsorção, evaporação e difusão de umidade na superfície dos materiais.

VERSTEEG e MALALASEKERA (2007, cap. 10) discutem os erros e incertezas envolvidos em simulações fluidodinâmicas computacionais, classificando-os em (i) erros numéricos; (ii) incertezas nas condições de contorno; (iii) incertezas ligadas ao modelo físico adotado.

Quanto às simulações realizadas na pesquisa aqui relatada, utilizando o programa *Ansys CFX* ©, entre possíveis erros devidos à metodologia adotada, cabe citar como principais: (i) erros no modelamento do fenômeno físico – p. ex.: adoção do perfil de vento descrito pela ASHRAE, conforme discussão apresentada na seção 4.6.3.2, simplificação do escoamento para solução apenas do balanço de massa e momento, desconsiderando-se trocas térmicas com as superfícies (SORENSEN e NIELSEN, 2003, p. 5) e erros ligados ao modelo de turbulência adotado; (ii) simplificações na geometria: o modelo geométrico simulado foi baseado na maquete física visando à comparação e validação por meio dos ensaios em túnel de vento; (iii) erros de discretização, minimizados através dos procedimentos de refinamento da malha, descritos na seção 4.6.3.3; (iv) erros de truncamento durante o processo de cálculo, minimizados adotando erros máximos da ordem de $1x10^{-3}$.

Quanto aos modelos preditivos por regressão linear múltipla investigados nesta pesquisa, cabe destacar como fontes de erro o uso das médias mensais e diárias de temperatura e umidade relativa, o que torna os modelos pouco representativos das amplitudes de variação diárias. Para verificar a confiabilidade dos modelos obtidos, foram calculados e avaliados os coeficientes de determinação e os desvios médios quadráticos (DQM) em relação aos dados monitorados no interior da Capela, sem refinamentos estatísticos mais rigorosos, como por exemplo, cálculo de intervalos de confiança.

4.9.4- Ensaios em túnel de vento

CHUN (2011) descreve detalhadamente e ETHERIDGE (2012, p. 43) exemplifica procedimentos de calibração e cálculo de incerteza em medições realizadas em túneis de vento. DE WIT (1999, 2003, p. 43) estuda as incertezas envolvidas na medição de coeficientes de pressão em túnel de vento, a partir de um estudo estatístico de estimativas

realizadas por especialistas. CÓSTOLA (2006) comenta procedimentos de validação diversos e sua aplicação a simulações de ventilação. CÓSTOLA et al. (2009a) e FLOURENTZOU et al. (1998) discorrem sobre incerteza e validação de simulações computacionais de coeficientes de descarga em aberturas. CÓSTOLA et al. (2009b) comparam estimativas de coeficientes de pressão provenientes de fontes diversas, incluindo medições em campo, em túnel de vento, simulações fluidodinâmicas, bancos de dados e modelos analíticos. JIANG et al. (2003, 2004) e EVOLA e POPOV (2006) descrevem procedimentos de validação de simulações de perfis de velocidade de vento visando melhoria das condições de ventilação natural em edifícios e comentam como as incertezas estão associadas com a malha utilizada na simulação.

Dentre as fontes de incerteza presentes nos ensaios realizados em túnel de vento nesta pesquisa, cabe destacar: (i) diferenças dimensionais entre a Capela e a maquete física; (ii) erros na medição de velocidade com o termoanemômetro, relacionados ao posicionamento do sensor; (iii) erros na medição de pressão relacionados ao posicionamento dos tubos capilares na maquete física; (iv) erros durante o procedimento de calibração dimensional e posicionamento do *laser* e/ou da câmera na técnica de *PIV*;

4.9.5- Obtenção e uso das métricas de preservação

O uso das métricas de preservação, não obstante forneça aos profissionais envolvidos índices derivados das variáveis ambientais que são facilmente interpretáveis e úteis, exige um conhecimento mais aprofundado sobre os materiais que constituem as coleções, sobre os mecanismos e agentes de deterioração que estão atuando sobre eles, ou que possam vir a atuar, assim como sobre a sua interação com o microclima circundante.

Além desse conhecimento aprofundado, esse uso exige uma boa dose de bom senso, pois a grande gama de variáveis e dados empíricos envolvidos na obtenção das métricas acaba por desaconselhar o seu uso irrestrito ou generalizado, exigindo, pelo contrário, um uso direcionado e específico, tendo em vista, principalmente, a tipologia de constituição material das coleções sob estudo. MARTENS (2012) ao sistematizar o uso de métricas no gerenciamento de riscos para as coleções de museus holandeses, classificou os objetos em quatro categorias distintas: papel, pintura sobre painéis, móveis e esculturas.

Portanto, uma incerteza envolvida com o uso das métricas de preservação diz respeito ao uso de dados empíricos específicos, como por exemplo, a energia de ativação ou o teor de umidade nas condições de equilíbrio. Cabe questionar em que medida tais dados podem ser generalizados para categorias de objetos e/ou materiais com comportamento físico-químico e resposta aos agentes e mecanismos de deterioração semelhantes (STRLIC et al., 2013, p. 84). Sebera considera o cálculo de isopermas uma **aproximação** na faixa de *UR* entre 30 e 65%. Já as isopermas de Michalski (*LM*) são mais acuradas para UR em torno de 50% (vide discussão na seção A.1 do Apêndice A).

Quanto à determinação de critérios-limite para *T* e *UR*, MECKLENBURG (2007a, 2007b, 2010) aponta que os limites de segurança quanto a flutuações de umidade relativa para prevenir danos físico-mecânicos podem ser calculados com base em tensões-deformações medidas nos objetos, demandando equipamentos sofisticados para sua medição[116]. A medição ou simulação computacional de fissurações sofridas pelas esculturas em função das flutuações ambientais não foi elencada entre os procedimentos desta pesquisa.

Para avaliação dos riscos de danos físico-mecânicos associados à flutuações de temperatura e umidade relativa, foram adotadas as metodologias de Bratasz-Kozlowski e Camuffo-Pagan, discutidas respectivamente nas seções 4.8.1.1 e 4.8.1.2. Foram ainda considerados os limites de flutuação indicados pela ASHRAE (vide Quadro 2), pelas normas técnicas UNI 10829 (UNI, 1999; LA GENNUSA et al., 2008) e UNI 10969 (UNI, 2002; CAMUFFO et. al., 2004b), bem como as indicações de MARTENS (2012) e JAKIELA et al. (2008). Cabe destacar como possível fonte de erro, que tais referências incluem parâmetros baseados no comportamento físico-mecânico de madeiras "tipicamente" utilizadas em esculturas policromadas, que pode apresentar diferenças em relação ao comportamento físico-mecânico cedro utilizado nas esculturas abrigadas na Capela da Ceia.

[116] BRATASZ et al. (2005, 2007b), GARRECHT et al. (2010), OLSTAD (2010), RACHWAL et al. (2012a, 2012b), UZIELLI (2010), DIONISI-VICI et al. (2006).

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e sua discussão, à luz do recorte conceitual adotado e da metodologia descrita no capítulo anterior. Recomenda-se ao leitor a leitura do Apêndice A previamente à leitura deste capítulo. Inicialmente, são apresentados os resultados do monitoramento ambiental contínuo em campo, abrangendo dados externos coletados em Congonhas e Ouro Branco e dados coletados no interior da Capela da Ceia. Com base nestes dados determinam-se estratégias bioclimáticas para conforto humano e critérios-limite de *T* e *UR* para análise de índices de desempenho, bem como o potencial de desumidifcação por meio da estratégia de ventilação natural ou forçada. Em seguida, são expostos e discutidos os resultados das simulações computacionais higrotérmicas, fluidodinâmicas e por modelos preditivos por regressão linear múltipla, os quais são comparados aos resultados do monitoramento ambiental. Logo após, são mostrados e debatidos os resultados obtidos em túnel de vento, que são comparados aos resultados das simulações computacionais. Por último, são apresentadas e comparadas entre si as métricas de preservação calculadas com base nos dados obtidos no monitoramento ambiental e nos resultados das simulações computacionais.

5.1- Resultados do monitoramento ambiental

São apresentadas a seguir as estatísticas descritivas e o sumário gráfico dos dados fornecidos pelo INMET e resultantes do monitoramento em campo. As estatísticas descritivas mensais discriminadas por ano são apresentadas no Apêndice E.

5.1.1- Dados externos - Ouro Branco (INMET) / Congonhas (IPHAN)

5.1.1.1. Temperatura, umidade relativa e precipitações

A Tabela 2 e a Figura 38 apresentam as estatísticas descritivas e o climograma dos dados climáticos de Ouro Branco, recebidos do INMET:

Tabela 2 – Ouro Branco – Dados climáticos – Período: 01/08/2006 a 31/07/2012.

	variável / mês	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANO
Temperatura	Média normal GTe (°C)	21,2	21,8	21,1	19,9	17,5	16,7	17,1	18,2	19,1	20,0	20,1	20,8	19,5
	Desvio padrão médio (°C)	3,2	3,2	3,2	3,2	3,6	3,8	4,1	4,3	4,7	4,0	3,6	3,0	3,6
	Média das máximas GTe max (°C)	24,4	26,9	26,2	24,9	22,8	22,3	23,1	24,6	25,3	25,3	24,5	25,6	24,7
	Máxima absoluta (°C)	30,8	30,6	31,1	29,4	27,9	27,3	28,8	31,4	34,1	33,9	31,8	31,1	34,1
	Média das mínimas GTe min (°C)	16,8	17,9	17,6	16,4	13,6	12,5	12,5	13,4	14,2	16,1	16,3	17,7	15,4
	Mínima absoluta GTe min abs (°C)	14,7	14,8	14,1	11,3	8,0	6,2	5,9	6,1	6,5	10,8	9,8	14,4	5,9
	Amplitude média (°C)	7,6	9,0	8,6	8,6	9,2	9,8	10,6	11,2	11,1	9,2	8,2	7,9	9,3
Umidade Relativa	Média normal (%)	79,6	75,0	79,7	80,1	77,8	76,5	70,8	65,2	67,2	76,4	80,5	81,8	75,9
	Desvio padrão médio (%)	14,8	15,3	15,1	14,7	15,8	17,1	18,9	20,0	20,7	17,2	14,8	14,1	16,5
	Média das máximas (%)	87,1	91,8	94,0	94,8	93,7	93,2	90,6	86,7	88,1	92,7	92,8	94,5	91,7
	Máxima absoluta (%)	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	100,0	100,0	99,0	99,0	99,0	100,0
	Média das mínimas (%)	54,6	52,5	58,0	57,2	53,9	51,1	43,3	38,4	42,4	53,9	58,5	61,1	52,1
	Mínima absoluta (%)	31,0	30,0	20,0	30,0	26,0	25,0	15,0	15,0	12,0	17,0	29,0	28,0	12,0
	Amplitude média (%)	32,5	39,3	36,0	37,6	39,8	42,1	47,2	48,3	45,6	38,8	34,3	33,4	39,6
	Precipitação total média mensal (mm)	287	133	221	76	27	18	3	10	42	172	231	320	1540,5

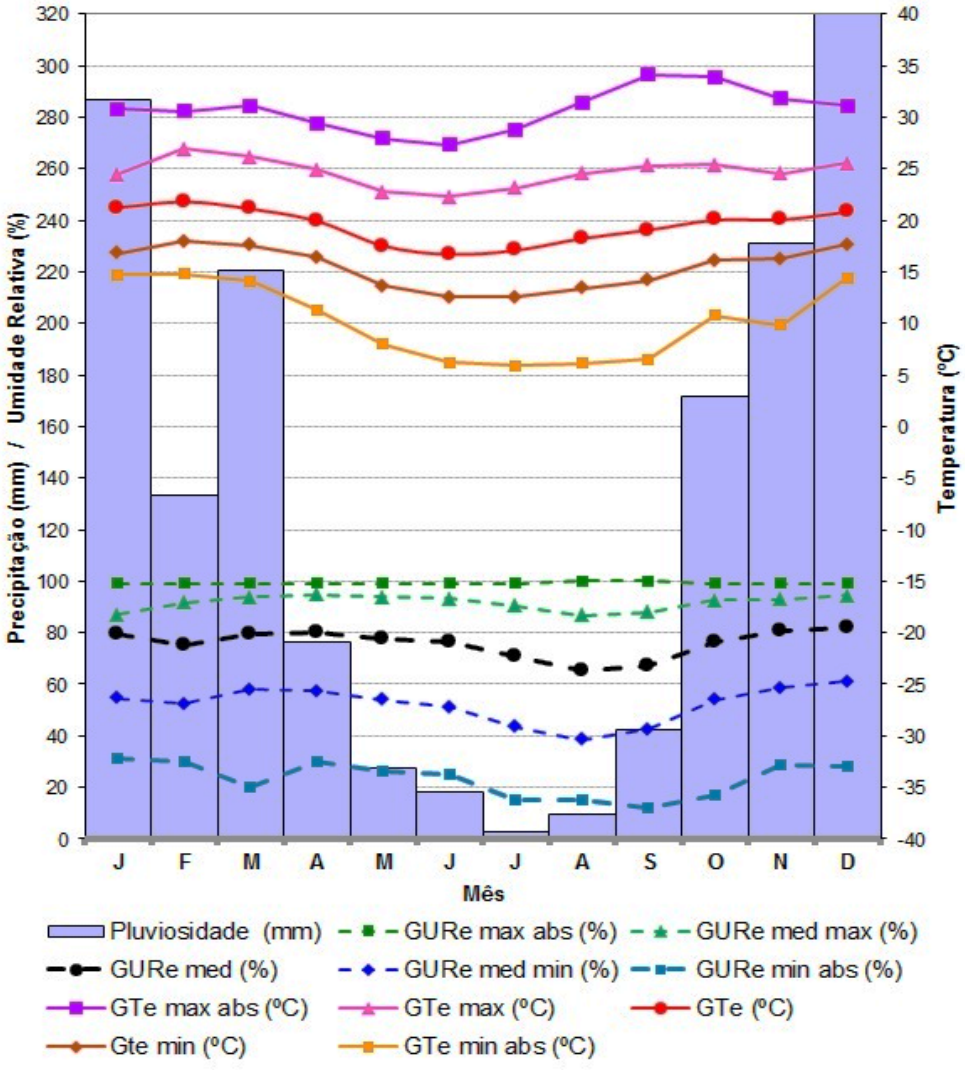


Figura 38 – Ouro Branco – climograma. Período: 2006-2012.

A Figura 39 mostra as médias horárias de temperatura e umidade relativa no período 2006-2012:

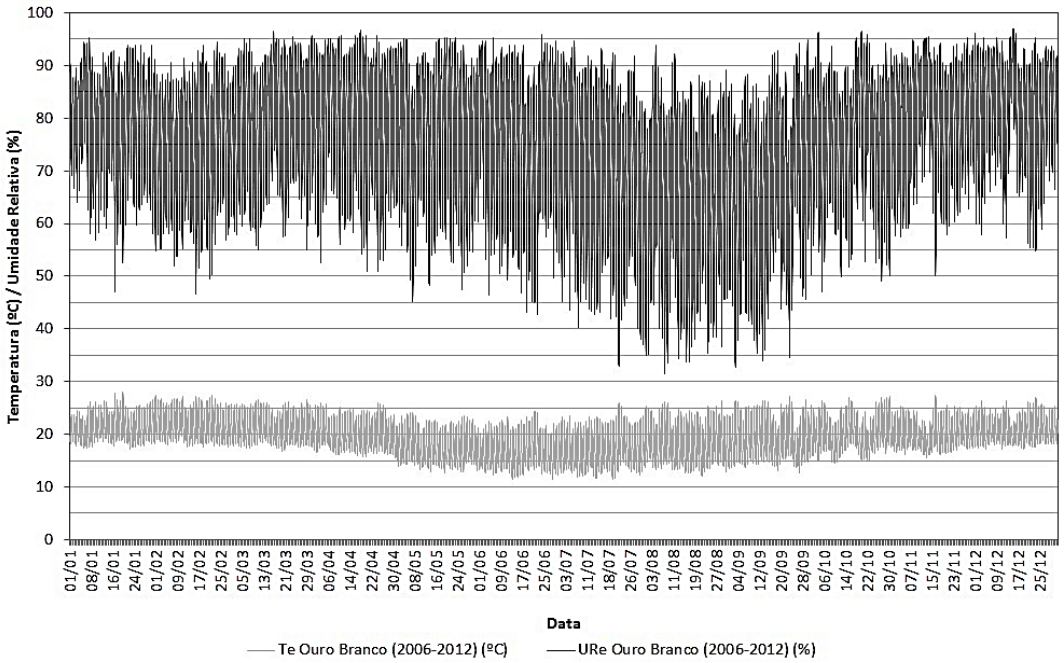


Figura 39 – Ouro Branco – médias horárias de temperatura e umidade relativa. Período: 2006 a 2012.

As figuras 40 e 41 mostram os histogramas de frequência de temperatura e umidade relativa, com base nas médias horárias do período 01/08/2006 a 31/07/2012:

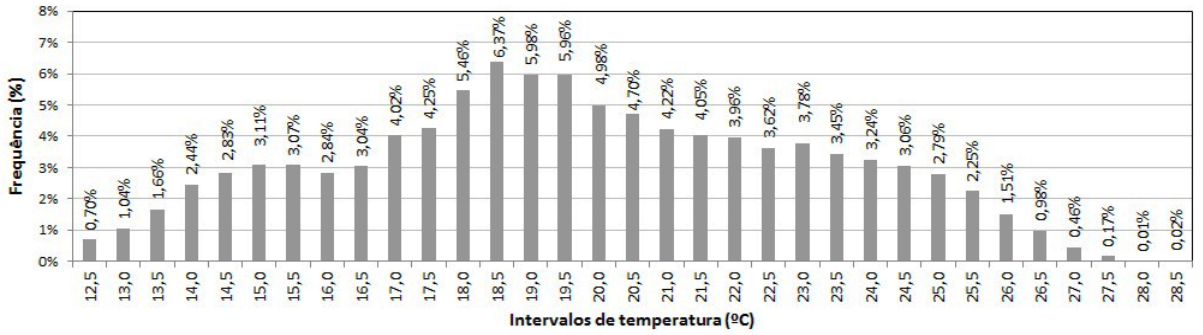


Figura 40 – Ouro Branco – histograma de temperatura (médias horárias). Período: 2006 a 2012.

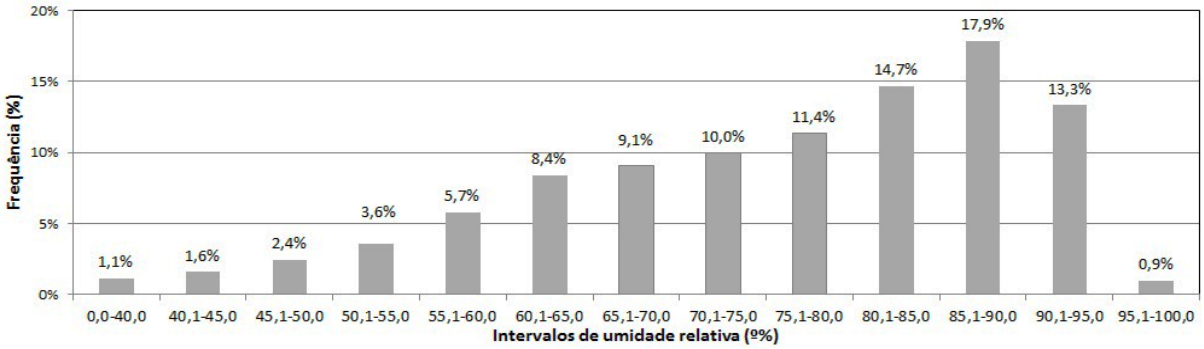


Figura 41 – Ouro Branco – histograma de umidade relativa (médias horárias). Período: 2006 a 2012.

A Figura 42 apresenta as médias horárias do ano de 2009, considerado como típico na série de 2006 a 2010, por RORIZ (2012a, 2012b):

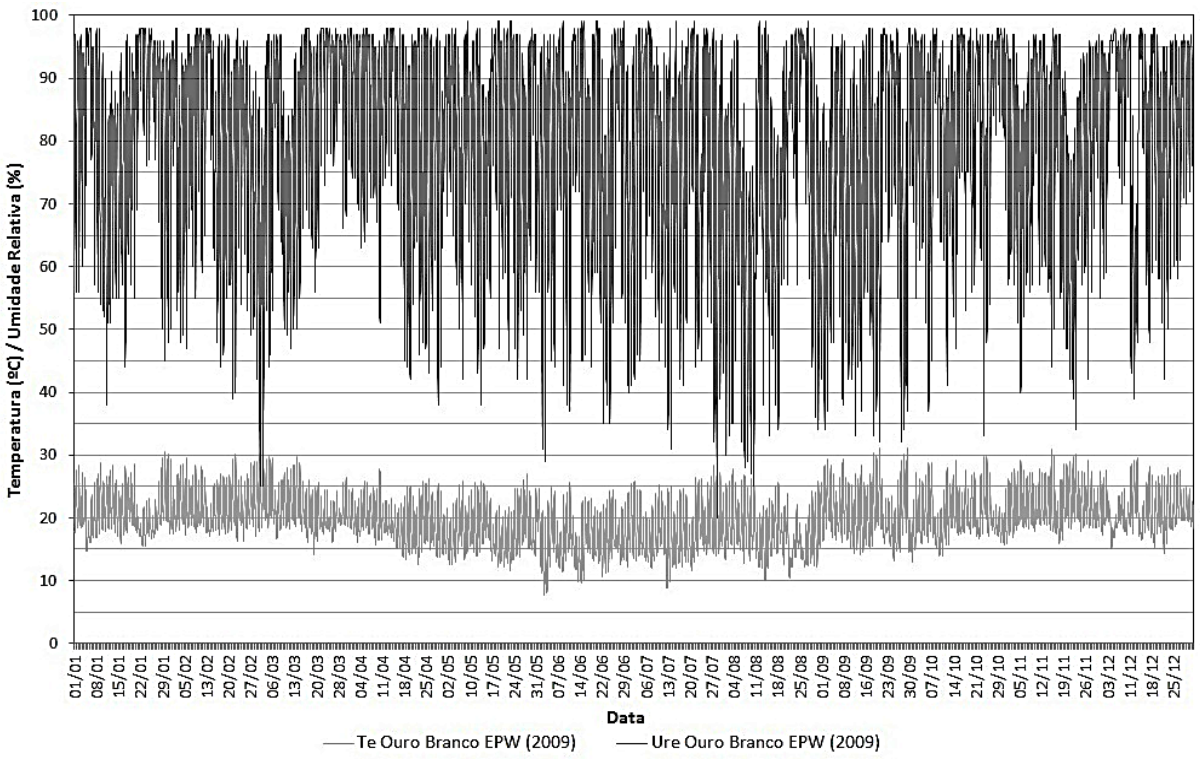


Figura 42 – Ouro Branco – ano meteorológico típico segundo RORIZ (2012a, 2012b). Período: 01/01/2009 a 31/12/2009..

Considerando os resultados apresentados acima, pode-se classificar o clima de Ouro Branco como tropical de altitude, com temperaturas moderadas e pequenas amplitudes térmicas mensais (vide Tabela 4). O regime pluviométrico determina uma estação seca (inverno) e outra chuvosa (verão) bem definidas. A umidade relativa se mantem relativamente alta, entre 60 e 80% ao longo de todo o ano, sendo que sua variação é influenciada pela pluviosidade.

Dos dados fornecidos pelo INMET foi extraído e avaliado o período correspondente ao monitoramento contínuo em campo para verificar-se sua tipicidade. A Tabela 3 apresenta as estatísticas descritivas para o extrato correspondente ao período 01/07/2011 a 30/06/2012.

Tabela 3 – Ouro Branco – Dados climáticos (extrato) - Período: 01/07/2011 a 30/06/2012.

	variável / mês	J-12	F-12	M-12	A-12	M-12	J-12	J-11	A-11	S-11	O-11	N-11	D-11	ANO
Temperatura	Média normal GTe (ºC)	20,5	21,7	20,7	20,3	16,8	17,6	16,8	19,3	18,5	19,2	18,5	20,1	19,2
	Desvio padrão médio (ºC)	3,1	3,3	3,2	3,2	3,4	3,3	4,1	4,8	5,4	4,1	3,8	2,7	3,7
	Média das máximas GTe max (ºC)	25,3	26,9	25,6	25,4	21,5	22,7	23,2	26,4	25,5	24,4	23,7	24,6	24,6
	Máxima absoluta (ºC)	29,3	30,6	31,1	29,1	26,5	27,3	27,5	30,2	32,3	31,7	28,7	29,0	32,3
	Média das mínimas GTe min (ºC)	17,1	17,6	17,1	16,7	13,4	14,1	12,1	14,1	12,9	15,6	14,9	17,2	15,2
	Mínima absoluta GTe min abs (ºC)	14,7	15,5	15,5	13,2	11,5	10,1	7,5	9,3	6,5	11,1	10,1	15,0	6,5
	Amplitude média (ºC)	8,2	9,4	8,6	8,7	8,1	8,6	11,1	12,3	12,6	8,8	8,8	7,4	9,4
Umidade Relativa	Média normal (%)	78,0	69,7	77,1	77,4	80,4	80,3	70,0	61,0	60,9	76,5	78,4	83,3	74,4
	Desvio padrão médio (%)	15,0	16,1	16,7	14,5	14,9	14,2	19,2	21,7	21,8	18,1	16,7	12,1	16,7
	Média das máximas (%)	91,5	89,9	92,0	92,9	94,2	93,4	89,6	83,4	85,3	92,2	93,4	94,8	91,0
	Máxima absoluta (%)	96,0	96,0	96,0	96,0	97,0	97,0	97,0	97,0	96,0	96,0	96,0	96,0	97,0
	Média das mínimas (%)	57,8	46,1	56,1	55,4	59,7	57,6	40,6	32,4	35,3	54,0	56,5	63,4	51,2
	Mínima absoluta (%)	41,0	31,0	20,0	30,0	32,0	38,0	19,0	16,0	14,0	17,0	29,0	37,0	14,0
	Amplitude média (%)	33,7	43,8	36,0	37,5	34,5	35,7	49,0	51,0	50,0	38,2	36,9	31,4	39,8
	Precipitação total média mensal (mm)	488	84	185	35	83	39	1	3	1	256	261	417	1854,0

Embora os dados fornecidos pelo INMET incluam o mês de julho de 2012, esse mês foi inicialmente excluído da amostra de comparação com o extrato para o período 2011-2012, para manter ambas as amostras finalizando em junho de 2012. Posteriormente, os dados de julho de 2012 coletados em Ouro Branco foram incluídos e comparados com os dados monitorados na Capela da Ceia, em Congonhas, verificando-se que o impacto dessa inclusão nas estatísticas descritivas é mínimo, conforme se demonstra na Tabela 4.

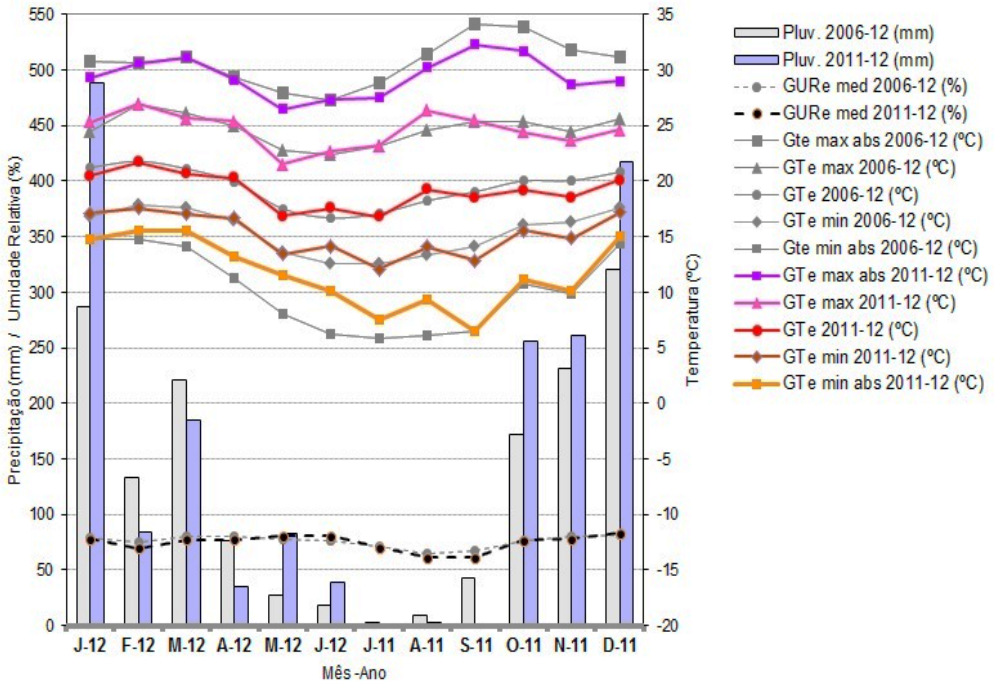


Figura 43 – Ouro Branco – climograma comparativo períodos 2006-2012 e 2011-2012.

As figuras 44 e 45 apresentam os histogramas de frequências da temperatura e umidade relativa para o período 2011-2012:

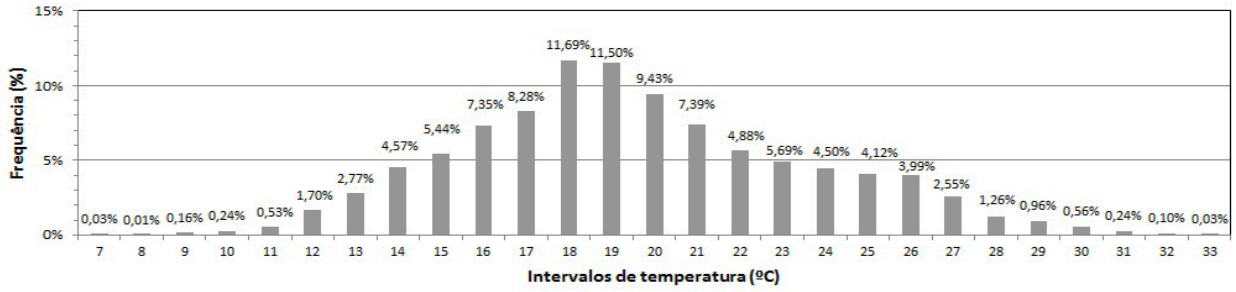


Figura 44 – Ouro Branco – histograma de frequências da temperatura. Período: 2011 a 2012.

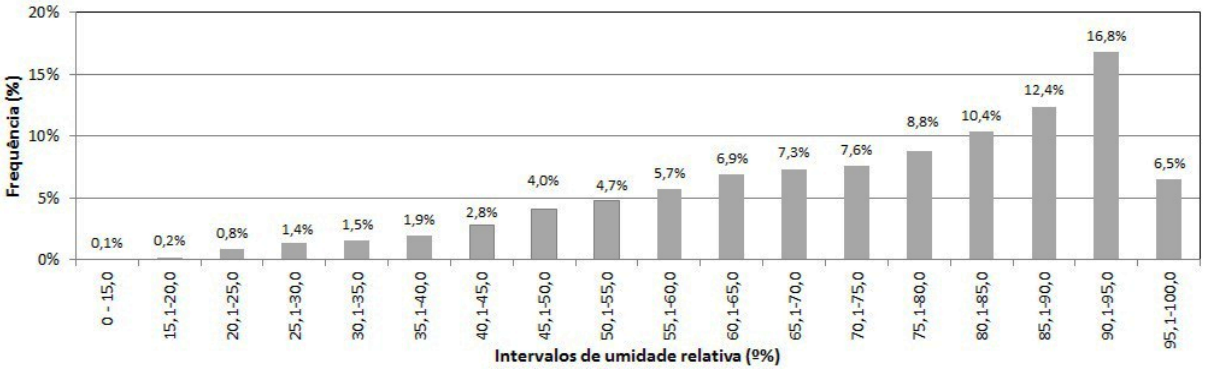


Figura 45 – Ouro Branco – histograma de frequências da umidade relativa. Período: 2011 a 2012.

Para comparar estatisticamente o extrato de dados do período 2011-2012 com a série de dados histórica do período 2006-2012, visando verificar a equivalência de distribuição das variáveis e descartar a hipótese de um período climático atípico durante a fase de medições, foram aplicados os seguintes testes estatísticos: teste de aderência à normalidade, teste “F” de comparação entre variâncias e teste “T” da diferença entre as médias presumindo variâncias equivalentes. As tabelas com os resultados dos testes estatísticos são apresentadas no **Apêndice E.**

As séries de médias horárias de T_e e UR_e para os períodos comparados rejeitam a hipótese de aderência à normalidade, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ao nível de confiança 95%, mesmo adotando procedimentos de normalização por extração de raízes quadradas e cúbicas.

O “teste F” de comparação estatística da variância dos dados indica que não há diferença estatisticamente significativa entre as duas séries de médias horárias. O “teste T” da diferença entre as médias aplicado às duas séries de médias mensais mostradas nas tabelas 2 e 3 também indica que elas não há diferença estatisticamente significativa entre elas.

Com base nesses testes, bem como na comparação das tabelas 2 e 3 e das figuras de 40 a 45, pode-se inferir que os dados do período 2011-2012 não diferem significativamente dos dados do período 2006-2012 em termos de distribuição e médias mensais. Verifica-se ainda que os dados do período 2011-2012 apresentam uma menor amplitude de temperatura em termos de valores absolutos (extremos) e que, na maioria dos meses, o período 2011-2012 foi mais chuvoso que o período 2006-2012, apresentando, porém a mesma distribuição de períodos secos/chuvosos, inclusive as chuvas características do mês de março.

Devido a dificuldades operacionais que inviabilizaram um monitoramento remoto, a amostra de dados coletados na estação meteorológica instalada no escritório técnico do IPHAN em Congonhas não foi suficiente para uma caracterização do clima local. Visando uma análise comparativa, são apresentados, na Figura 46, dados de temperatura e umidade relativa coletados no IPHAN/Congonhas nos períodos 28/12/2011 a 01/01/2012 e 13/03/2012 a 15/03/2012. Os dados foram coletados de 15 em 15 minutos. Foram calculadas as médias horárias para serem comparadas com as médias horárias dos dados de Ouro Branco para o período 2006-2012, nas datas correspondentes.

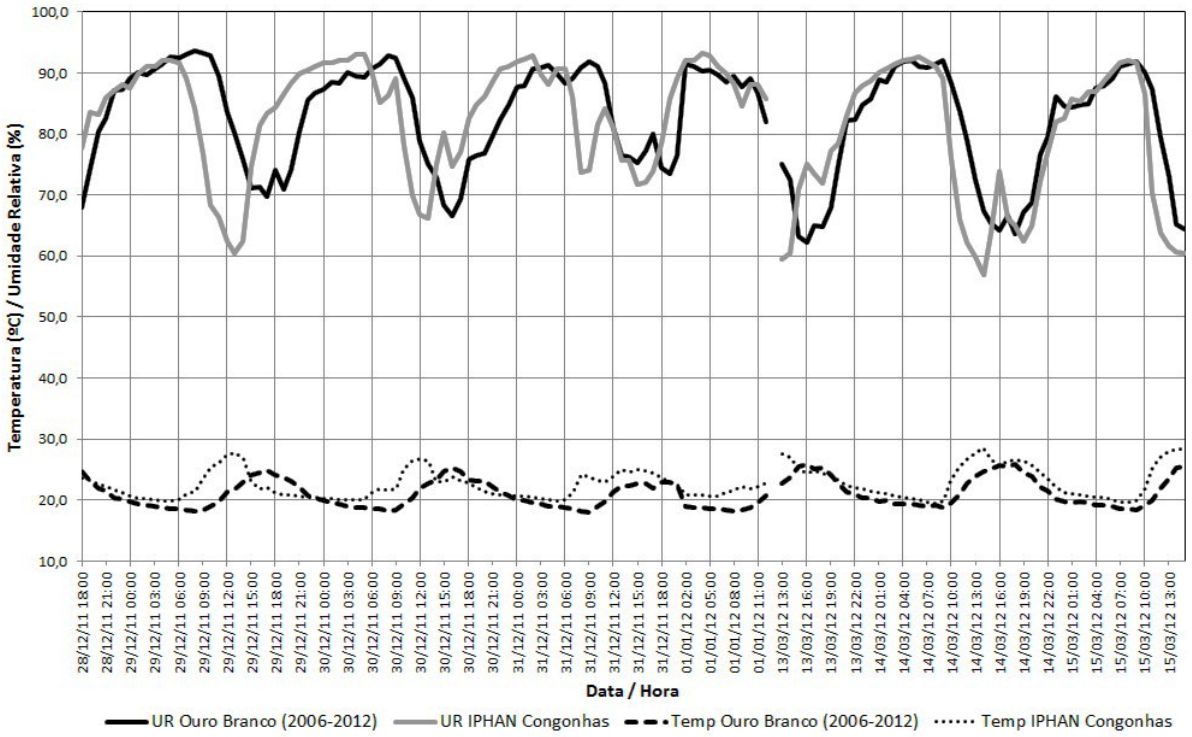


Figura 46 – Comparação de dados de *T* e *UR* medidos em Congonhas (período: 28/12/2011 a 01/01/2012 e 13/03/2012 a 15/03/2012) e em Ouro Branco (médias horárias de 2006 a 2012 nas datas correspondentes).

Para comparar as duas amostras, foi aplicado o teste “F” de comparação entre variâncias, **aceitando-se a hipótese de igualdade** com α=0,1. As tabelas com os resultados dos testes estatísticos são apresentadas no Apêndice E. A Tabela 4 compara as estatísticas descritivas dos dados em Congonhas e em Ouro Branco, nos diversos períodos analisados acima.

Tabela 4 – Ouro Branco / Congonhas - Comparação de estatísticas descritivas dos dados climáticos.

		temperatura						umidade relativa					
Local da medição	**Período**	**temp. média normal (°C)**	**variação (desvio padrão médio) (°C)**	**temp. média das máximas (°C)**	**temp. média das mínimas (°C)**	**temp. máxima absoluta (°C)**	**temp. mínima absoluta (°C)**	**U.R. média normal (%)**	**variação (desvio padrão médio) (%)**	**U.R. média das máximas (%)**	**U.R. média das mínimas (%)**	**U.R. máxima absoluta (%)**	**U.R. mínima absoluta (%)**
Ouro Branco	EPW/TMY RORIZ 01/01/2009 a 31/12/2009	19,6	3,9	25,0	15,8	31,2	7,6	79,6	16,3	94,9	56,3	99,0	20,0
Ouro Branco	Série histórica 01/08/2006 a 31/07/2012	19,5	3,6	24,7	15,4	34,1	5,9	75,9	16,5	91,7	52,1	100,0	12,0
Ouro Branco	Verificação de tipicidade 01/07/2011 a 30/06/2012	19,2	3,7	24,6	15,2	32,3	6,5	74,4	16,7	91,0	51,2	97,0	14,0
Ouro Branco	Comparação c/IPHAN 28/12/2011 a 01/01/2012 e 13/03/2012 a 15/03/2012	21,1	2,3	24,5	18,8	26,0	18,1	82,4	9,0	90,7	68,8	93,7	62,3
IPHAN - Congonhas	28/12/2011 a 01/01/2012 e 13/03/2012 a 15/03/2012	22,7	2,5	26,3	20,3	28,5	19,5	81,7	10,3	91,5	67,2	93,3	56,9
Ouro Branco	Comparação com Capela da Ceia 18/07/2011 a 17/07/2012	19,1	4,1	24,5	15,2	32,3	6,5	74,1	18,5	90,8	51,1	97,0	14,0
Capela da Ceia - Congonhas	18/07/2011 a 17/07/2012	20,0	1,0	20,8	18,9	24,2	13,2	72,9	4.7	75,8	69,3	89,6	45,1

Com base nas considerações acima, pode-se inferir que os dados de Congonhas apresentam uma boa correspondência com os dados de Ouro Branco no período comparado. As estatísticas descritivas para os dois locais de medição apresentaram valores próximos, o que corrobora com o uso da série de dados climáticos de Ouro Branco no presente trabalho, na falta da série completa medida localmente em Congonhas. Observa-se ainda que tanto o ano de 2009 escolhido por RORIZ (2012a, 2012b), quanto o extrato 2011-2012 apresentam estatísticas descritivas com pequenos desvios em relação às da série histórica 2006-2012.

5.1.1.2. Velocidade e direção do vento

CÓSTOLA (2006, p. 55) informa a lista completa de dados e considerações necessários para caracterizar o vento local. As informações fornecidas pelo INMET incluem os dados básicos de coordenadas geográficas, e períodos com dados disponíveis e faltantes, sem abranger informações sobre a rugosidade do terreno e detalhes dos equipamentos utilizados, como requisita Cóstola. Para o tratamento estatístico dos dados de vento, os dados

fornecidos pelo INMET foram reformatados em um arquivo do tipo SAMSON para lançamento no programa *WRplot view* ©. A Tabela 5 compara as estatísticas descritivas dos dados de velocidade do vento nos períodos 2006-2012 e 2011-2012, as "rosas dos ventos" são apresentadas na Figura 47 e o resumo gráfico das frequências por classe de velocidade, na Figura 48.

Tabela 5 – Ouro Branco – Velocidade do Vento – Comparação de estatísticas descritivas

Variável / período	média (m/s)	Desvio Padrão (m/s)	Máxima (m/s)
01/08/2006 a 31/07/2012	2,17	1,30	11,80
01/07/2011 a 30/06/2012	2,23	1,16	8,30

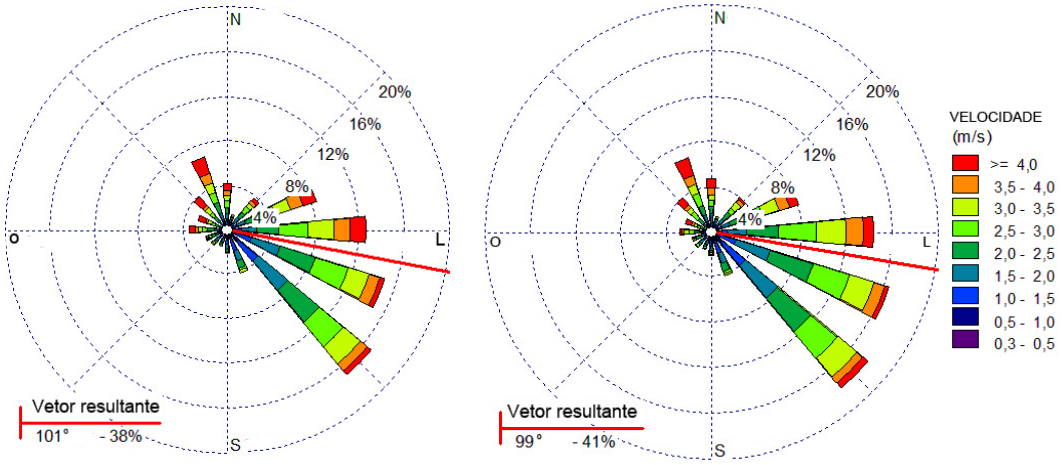


Figura 47 – Ouro Branco – rosas de ventos. Períodos: 01/08/2006 a 31/07/2012 (esquerda) e 01/07/2011 a 30/06/2012 (direita).

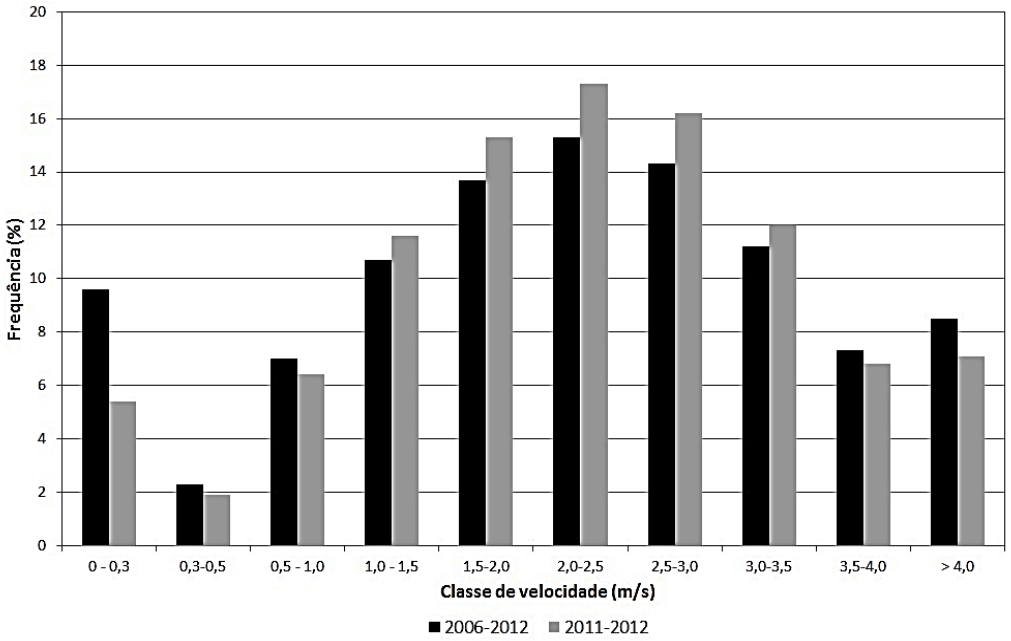


Figura 48 – Ouro Branco – distribuição de frequências da velocidade do vento (dados horários) - períodos: 01/08/2006 a 31/07/2012 e 01/07/2011 a 30/06/2012.

Verifica-se que a distribuição de frequências do vento e direções dominantes no período 2011-2012 não difere significativamente das do período 2006-2012. Observa-se ainda que ambas as distribuições são normais em torno das médias mostradas na Tabela 5. Há uma diferença de apenas dois graus no vetor resultante leste de ambos os períodos.

Seguindo o mesmo procedimento de comparação adotado para os dados de temperatura e umidade relativa, compararam-se as médias horárias vetoriais de velocidade do vento medidas no escritório técnico do IPHAN, corrigidas em altura pelo perfil de vento prescrito pela ASHRAE (vide seção 4.6.3.2) com os dados fornecidos pelo INMET. A média normal de ambas as séries comparadas foi 2,2m/s. **Estatisticamente, a igualdade das médias é admitida** pelo teste Z para médias de duas amostras com variâncias conhecidas, ao nível 95% de confiança. O resultado desse teste estatístico é apresentado no Apêndice E.

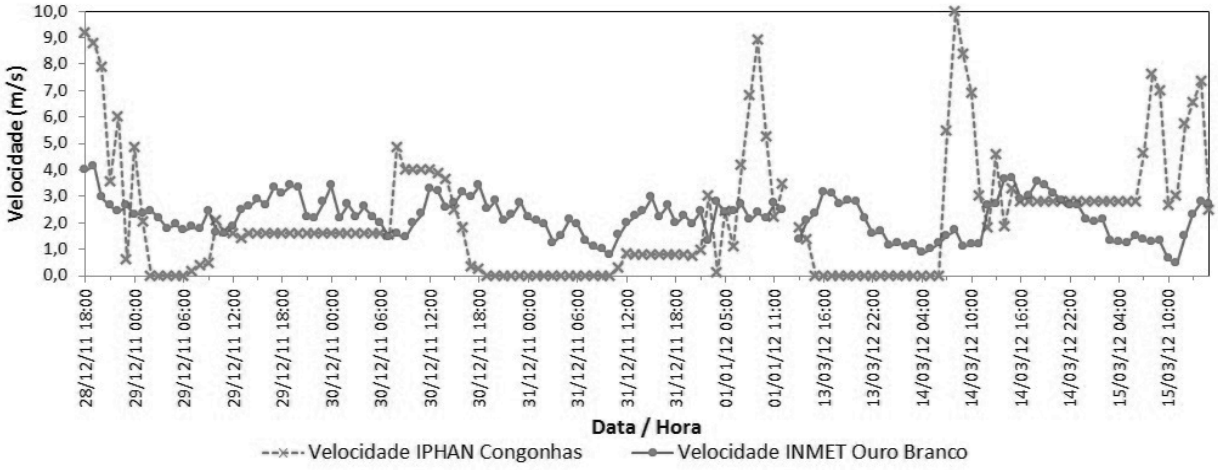


Figura 49 – Comparação de dados de velocidade do vento medidos em Congonhas (período: 28/12/2011 a 01/01/2012 e 13/03/2012 a 15/03/2012) e em Ouro Branco, nas datas correspondentes.

5.1.1.3. Estratégias arquitetônicas biocliomáticas aplicáveis ao clima de Ouro Branco

Aplicando a metodologia dos quadros de Mahoney (vide seção B.5.3 do Apêndice B) aos dados da Tabela 2, resultam indicações de ventilação como estratégia essencial ou desejável em todos os meses do ano, com exceção dos meses de agosto e setembro. No mapa mostrado na Figura 9, Ouro Branco localiza-se na zona bioclimática 4.

A Figura 50 mostra os dados climáticos de Ouro Branco plotados sobre o diagrama bioclimático de Givoni.

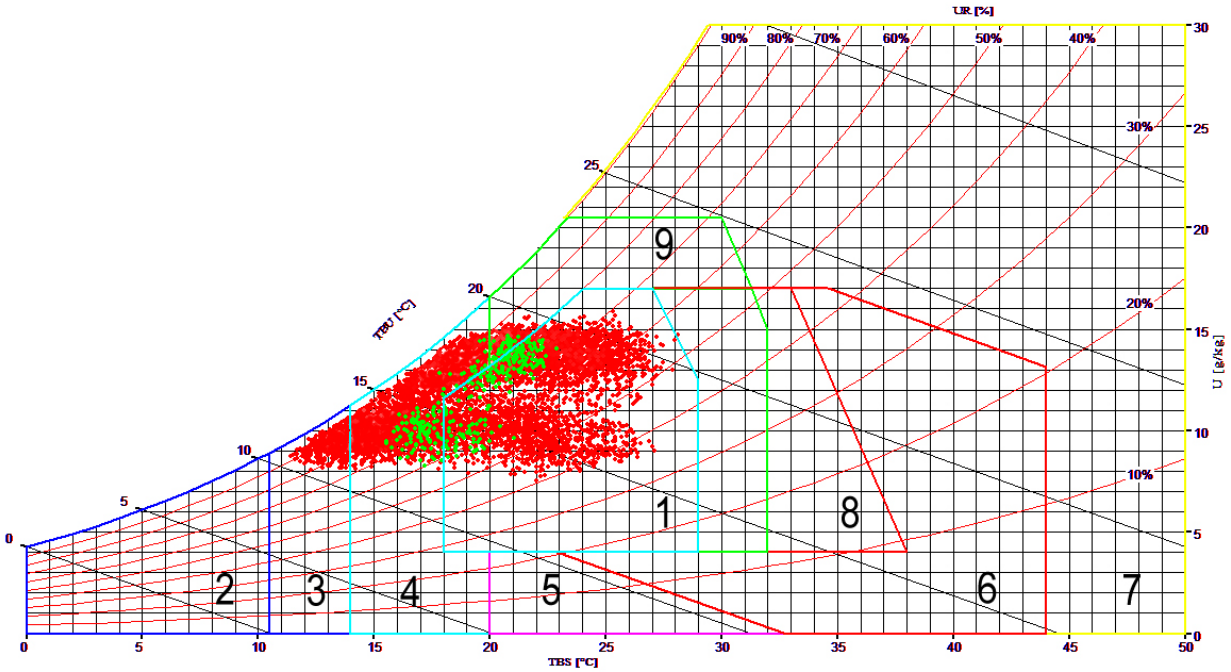


Figura 50 – Ouro Branco – diagrama bioclimático de Givoni com médias horárias de *T* e *UR* para o período 2006-2012. As médias diárias estão destacadas na cor verde. (1) Zona de Conforto; (2) Zona de aquecimento artificial; (3) Zona de aquecimento solar passivo; (4) Zona de massa térmica e aquecimento solar passivo; (5) Zona de umidificação; (6) Zona de resfriamento evaporativo; (7) Zona de resfriamento artificial; (8) Zona de massa térmica para resfriamento; (9) Zona de ventilação;

A análise bioclimática dos dados de Ouro Branco no programa *Analysis Bio* resulta nos potenciais de aplicação de estratégias bioclimáticas mostrados na Tabela 6. Cabe lembrar que as zonas das figuras 9 e 50 são definidas no diagrama em função do conforto humano.

Tabela 6 – Ouro Branco – Potencial de aplicação de estratégias bioclimáticas para conforto humano

Estratégia bioclimática / Zona	**Potencial de aplicação ao longo do ano (%)**
Zona de conforto (1)	44,7
Ventilação (9)	4,95
Inércia térmica para aquecimento + Aquecimento solar passivo (4)	44,8
Aquecimento solar passivo (3)	5,55

A Figura 51 mostra os dados da Figura 50 separados por estações do ano[117]. Constata-se que a primavera representa tipicamente o restante do ano climático. A amplitude da temperatura não varia muito de uma estação para a outra, conforme demonstrado na Tabela 3. Observa-se também que as razões de umidade do verão são maiores que as do inverno, em função da maior pluviosidade.

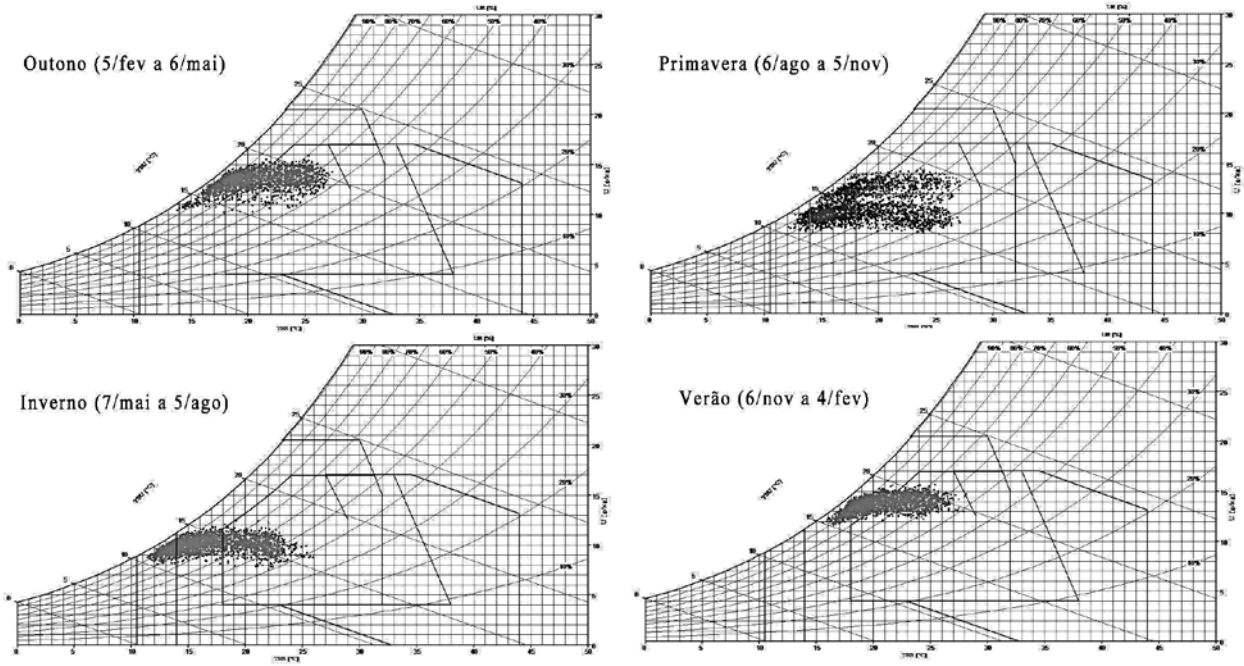


Figura 51 – Ouro Branco – diagrama bioclimático de Givoni com médias horárias de *T* e *UR* para o período 2006-2012, separadas por estação do ano

[117] O programa *Analysis Bio* permite separar os dados do arquivo TRY por estação do ano. Porém ele considera, seguindo o senso comum, que as estações iniciam e findam em datas que correspondem aproximadamente aos solstícios e equinócios. Isso constitui um equívoco, pois com relação ao ciclo solar, essas datas definem o ***ápice*** ou a ***mediatriz*** de cada estação. Os dias 21/6 e 21/12 marcam, no hemisfério sul, os solstícios de inverno e verão, respectivamente os dias com período de insolação mais curto e mais longo do ano. Além disso, devido ao movimento de precessão da Terra, o momento exato dos equinócios varia de um ano para o outro. No século XXI, o equinócio de março tem ocorrido mais frequentemente no dia 20 e o de setembro, no dia 21. Assim, para definir as datas mostradas na Figura 51, considerou-se um ano solar de 8760 horas, iniciando em 20/3 às 12h, marcando o meio exato do outono do hemisfério sul, com duração de 8760/4 = 2190 horas, também considerada para as demais estações.

A Figura 52 mostra as indicações de estratégias bioclimáticas para Ouro Branco, em conformidade com a NBR 15220-3 (ABNT, 2005), obtidas por meio do programa *ZBBR*[118], cabendo destacar a indicação de ventilação cruzada. A indicação de tipo de clima "estimado" aparece em função dos dados de Ouro Branco não terem sido incluídos nas Normais Climatológicas Brasileiras de 1961-1990. O zoneamento da NBR 15220-3 encontra-se atualmente em revisão (vide seção B.5.1 do Apêndice B)

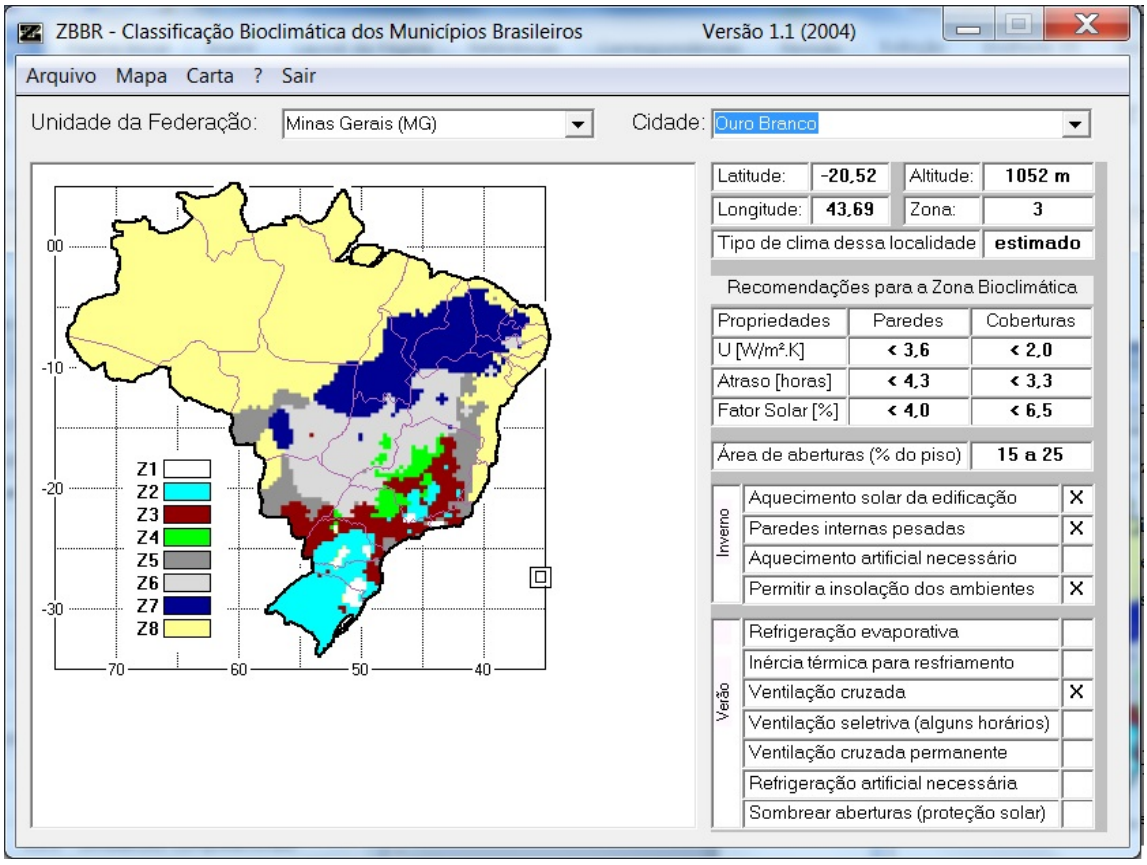


Figura 52 – Ouro Branco – recomendações de estratégias bioclimáticas segundo a norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Fonte: programa *ZBBR*.

5.1.2- Dados internos – Capela da Ceia - Congonhas

O monitoramento contínuo de temperatura e umidade relativa no interior da Capela da Ceia foi realizado durante o período 18/07/2011 a 21/10/2012, conforme metodologia descrita na seção 4.4. A Tabela 7 apresenta as estatísticas descritivas dos dados coletados, mostradas graficamente na Figura 53.

[118] Programa desenvolvido pelo prof. Maurício Roriz, da UFScar. Disponível em: http://roriz.dominiotemporario.com/doc/ZBBR.ZIP ou http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/softwares/ZBBR.zip (Acesso em 18/08/2011)

Tabela 7 – Capela da Ceia – Dados climáticos – Período: 18/07/2011 a 21/10/2012.

	variável / mês-ano	J-12	F-12	M-12	A-12	M-12	J-12	J-11/12	A-11/12	S-11/12	O-11	N-11	D-11	ANO
Temperatura	Média normal (ºC)	21,7	22,3	22,0	21,1	17,8	18,3	16,8	18,0	19,9	20,5	20,4	21,5	20,0
	Desvio padrão médio (ºC)	1,0	0,8	0,9	0,8	1,2	1,1	1,1	1,1	1,4	1,2	0,9	0,6	1,0
	Média das máximas (ºC)	22,4	23,0	22,0	21,9	18,6	19,2	18,0	19,3	21,1	21,1	21,1	22,0	20,8
	Máxima absoluta (ºC)	24,0	23,9	24,2	22,8	21,3	20,8	19,0	20,8	22,8	22,6	22,2	23,1	24,2
	Média das mínimas (ºC)	20,9	21,4	20,5	20,2	16,9	17,2	15,2	16,5	18,3	19,6	19,4	20,9	18,9
	Mínima absoluta (ºC)	19,8	19,8	19,9	17,5	15,2	14,4	13,2	15,2	15,5	17,7	17,7	19,9	13,2
	Amplitude média (ºC)	1,5	1,6	1,4	1,7	1,8	2,0	2,8	2,7	2,9	1,6	1,6	1,1	1,9
Umidade Relativa	Média normal (%)	79,2	73,3	75,6	76,1	76,7	76,8	70,1	64,7	58,7	68,6	73,6	80,7	72,9
	Desvio padrão médio (%)	5,4	3,7	5,9	3,5	4,1	3,6	4,1	4,1	4,4	8,0	7,4	2,3	4,7
	Média das máximas (%)	81,3	76,6	75,4	78,8	79,5	79,5	73,8	69,5	63,2	72,0	77,4	82,5	75,8
	Máxima absoluta (%)	89,6	83,3	84,7	83,7	86,1	83,8	80,5	74,4	68,8	87,1	85,7	85,2	89,6
	Média das mínimas (%)	77,0	69,8	70,6	73,4	73,6	74,2	66,7	59,8	53,4	65,0	69,5	78,5	69,3
	Mínima absoluta (%)	67,8	59,9	59,9	63,0	64,9	65,2	56,9	48,5	45,1	47,9	52,6	74,3	45,1
	Amplitude média (%)	4,3	6,7	4,8	5,4	5,9	5,3	7,1	9,6	9,7	7,0	7,9	4,0	6,5

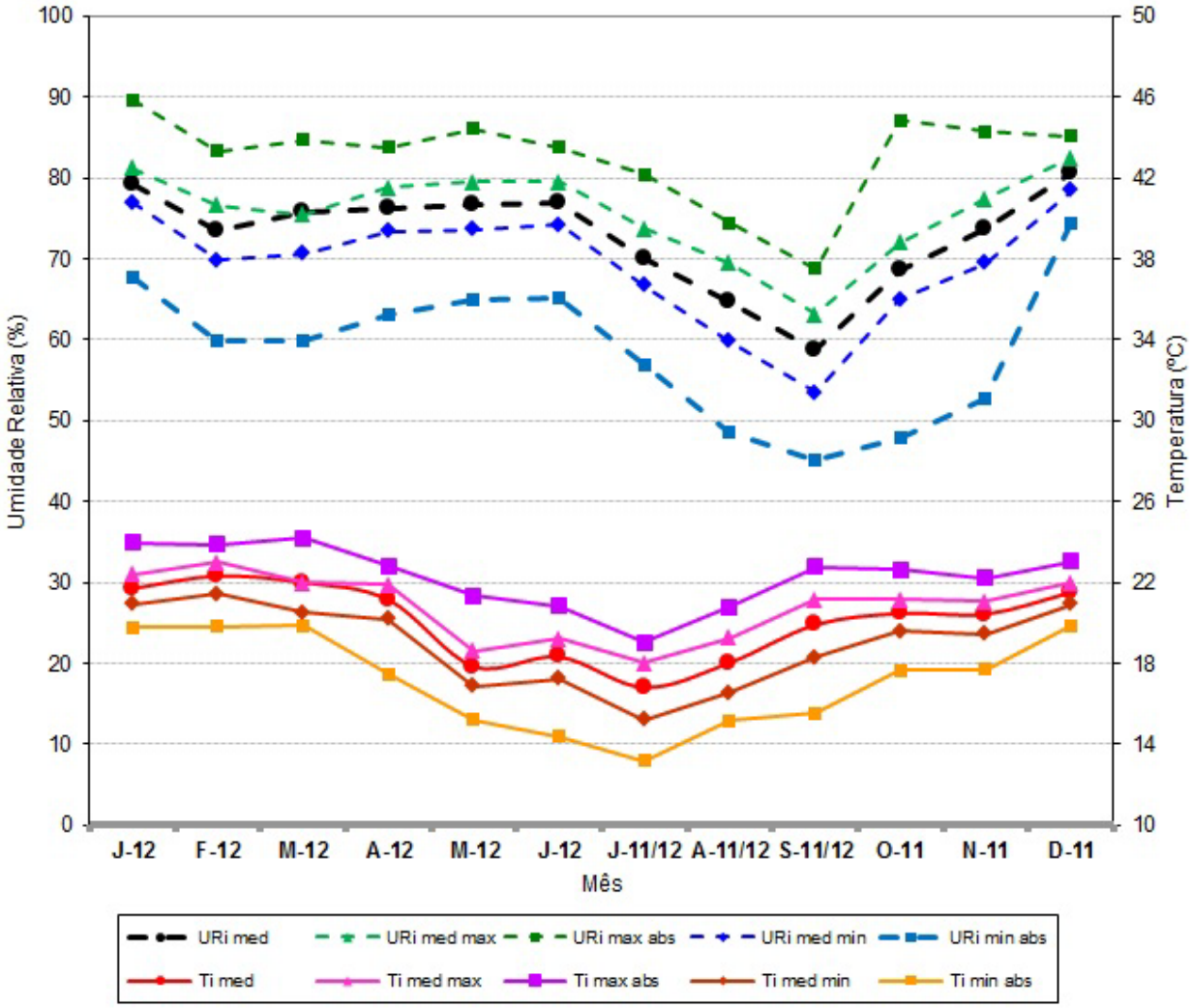


Figura 53 – Capela da Ceia – climograma de médias mensais internas. Período: 18/07/2011 a 21/10/2012. .

A Figura 54 mostra, ordenados de janeiro a dezembro, os dados coletados internamente à Capela no período 18/07/2011 a 21/10/2012, superpostos às médias horárias de Ouro Branco, para o período 2006-2012 (Figura 39). Para obtenção das razões de umidade foram utilizados os algoritmos de cálculos psicrométricos fornecidos pela ASHRAE (2009). Os ciclos sazonais foram calculados de acordo com as indicações da norma europeia EN 15767 (UNI, 2010), correspondendo a médias móveis centrais de 30 dias, abrangendo 15 dias antes e 15 dias após cada ponto considerado.

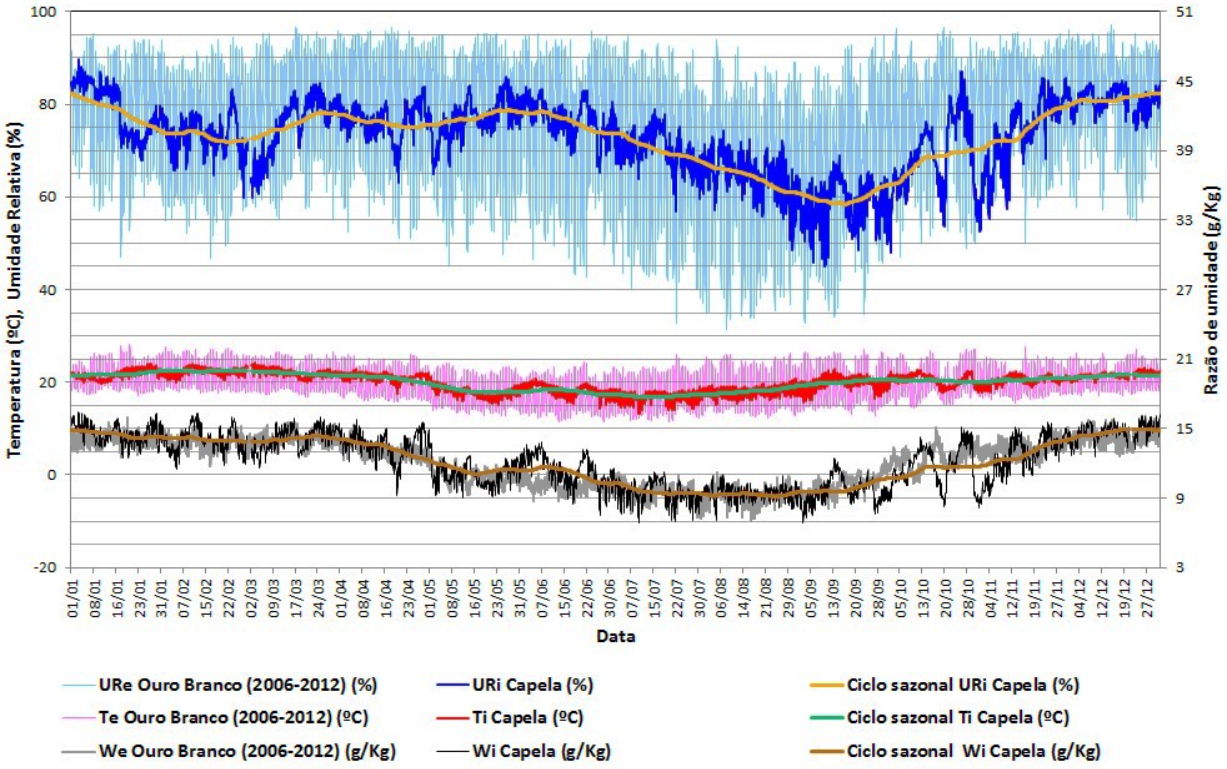


Figura 54 – T_i, Ur_i *e* W_i (Capela da Ceia, médias horárias, período 2011-2012) *versus* T_e, Ur_e *e* W_e (Ouro Branco, médias horárias históricas, período 2006-2012).

A Figura 55 mostra, na ordem cronológica em que foram coletadas, as médias horárias dos dados coletados no interior da capela superpostas aos dados externos correspondentes, coletados na estação meteorológica de Ouro Branco, no mesmo período e horários.

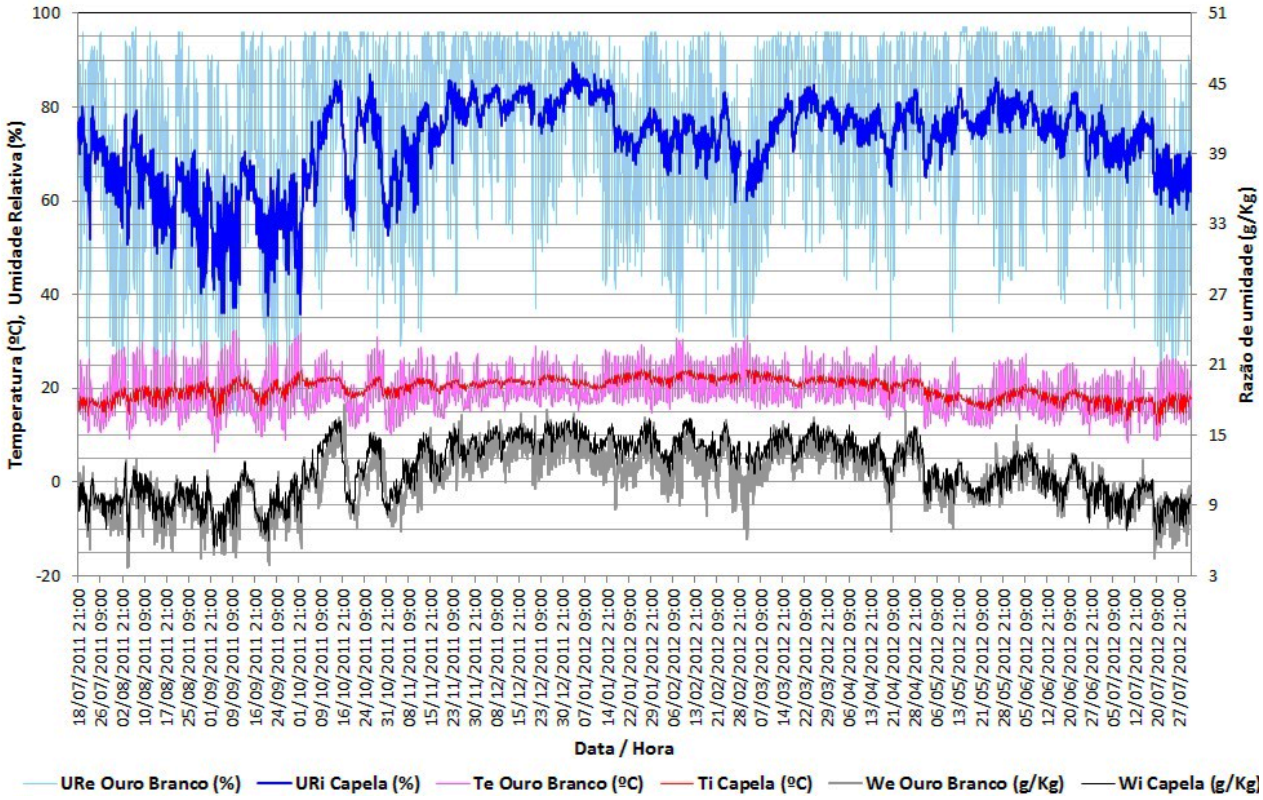


Figura 55 –T_i, Ur_i *e* W_i (Capela da Ceia) *versus* T_e, Ur_e *e* W_e (Ouro Branco, período 18/07/2011 a 31/07/2012).

5.1.2.1. Determinação de critérios-limite de T e UR para análise de índices de desempenho

a. Temperatura

A Figura 56 mostra o histograma de frequências da temperatura monitorada internamente na Capela da Ceia.

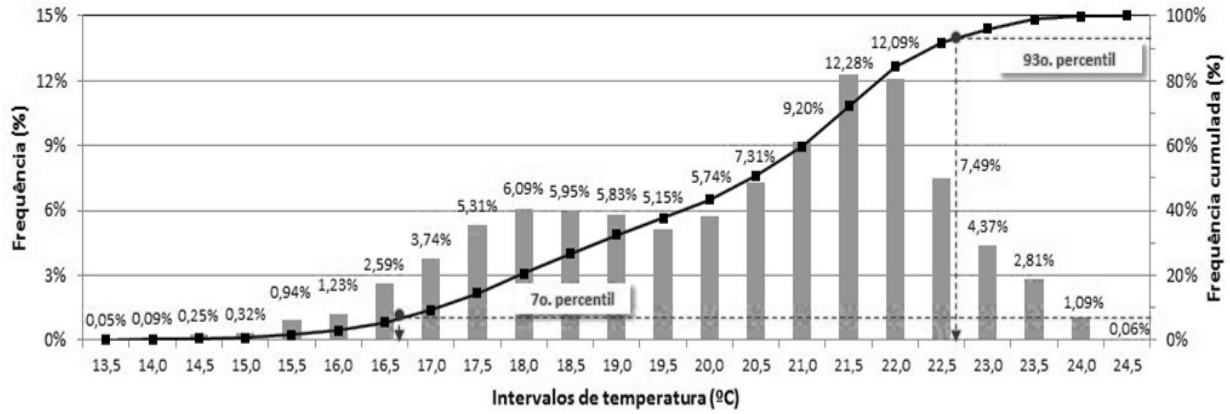


Figura 56 – Capela da Ceia – histograma de frequências de T_i. Período: 18/07/2011 a 21/10/2012.

Na Figura 56 foram **destacados o 7º. e o 93º. percentis**, correspondendo às temperaturas **16,6 e 22,6ºC,** respectivamente**.** De acordo com a norma europeia EN 15757 (UNI, 2010) esses percentis podem ser usados para determinar os limites de segurança para a umidade relativa, e também para a temperatura, quando tratada com igual prioridade.

A ASHRAE propõe (vide Quadro 2), para a classe C, um limite de temperatura de 25ºC, admitindo, eventualmente, registros de até 30ºC. Em diversas referências da literatura (vide Tabela 27 no Apêndice B) encontram-se, para coleções diversas e/ou com artefatos de madeira, um limite proposto de 24ºC.

Para a análise do potencial da ventilação natural visando à melhoria das condições de conservação das esculturas na Capela da Ceia **adotou-se um limite máximo de 25ºC para a temperatura,** que não foi ultrapassado internamente durante o período de monitoramento. Com relação aos dados externos, conforme se verifica na Figura 40, esse limite corresponde aproximadamente ao 95º. percentil, sendo ultrapassado em somente 5,40% das médias horárias de temperatura.

O limite mínimo adotado para a temperatura foi 16ºC, por estar próximo do 7º percentil (16,6ºC) e pela recorrência dentre as zonas de segurança ambiental encontradas na literatura (vide Tabela 27 no Apêndice B).

Para efeito de classificação da Capela no sistema da ASHRAE, o *set point* de temperatura considerado foi o centro da faixa 16-25ºC: **20,5ºC.**

b. Umidade relativa

A Figura 93 apresenta o histograma de frequências da umidade relativa monitorada internamente na Capela da Ceia.

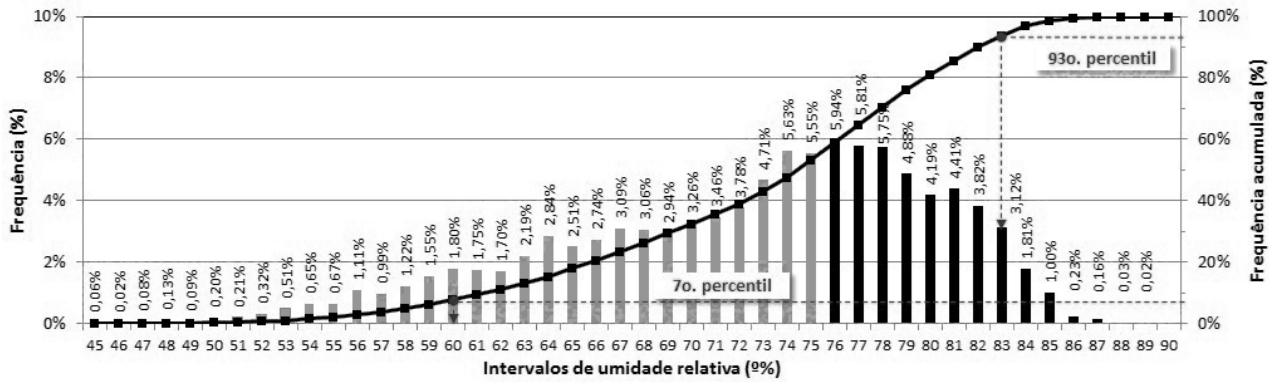


Figura 57 – Capela da Ceia – histograma de frequências de UR_i. Período: 18/07/2011 a 21/10/2012.

Cabe destacar a frequência significativa – 46,7% das ocorrências – dos valores superiores a 75% (colunas negras na Figura 57), sendo que as modas – 5,63 a 5,75% das ocorrências - correspondem a faixa de *UR* entre 74 e 78%. Essa frequência, considerando-se o período total de medição, corresponde ao limite considerado seguro pelo modelo *TOW* (*Time of wetness*), apresentado no Apêndice A (vide discussão na seção 5.4.1.5).

A Figura 57 destaca ainda os valores "seguros" de umidade "provada" pelas esculturas, **de acordo com as definições da norma EN15157 (UNI, 2010)**[119]: **7º. percentil (*UR*=59,5%) e 93º. percentil (*UR*=82,9%).**

b.1. Metodologia Bratasz-Kozłowski

A seguir são calculados os limites de flutuação de *UR*, pela metodologia Bratasz-Kozlowski, descrita na seção 4.8.1.1. A Figura 58 mostra as flutuações horárias de umidade relativa observadas entre o ciclo sazonal e a média normal anual (72,9% - vide Tabela 7), destacando o 7º. e o 93º. percentil da distribuição de frequências das flutuações, respectivamente -6,4% e 5,8%:

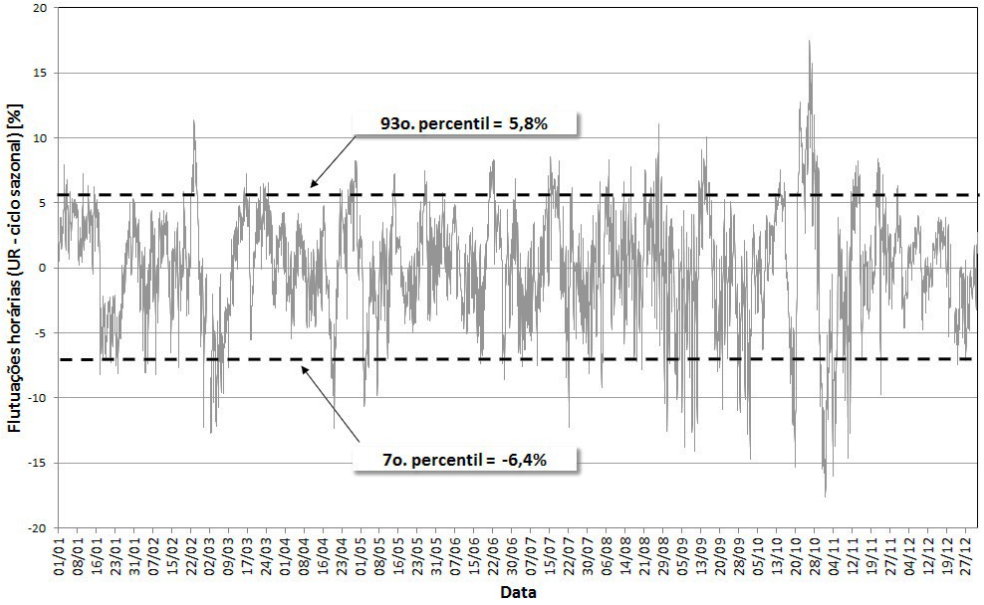


Figura 58 – Capela da Ceia – UR_i - flutuações horárias entre o ciclo sazonal e a média normal anual.

Adotando-se 20% como desvio máximo de referência *(ΔUR)* para a ponderação, calcula-se o fator de ponderação

$$F = 1 - (|\Delta UR|/20), \text{ para } |\Delta UR| < 20; F=1, \text{ para } |\Delta UR| \geq 20 \quad (20)$$

[119] Para mais detalhes, vide discussão na seção A.4 do Apêndice A.

Os limites superior e inferior da faixa segura de umidade relativa (UR_{sup} e UR_{inf}) são calculados para cada registro horário pelas equações (21) e (22):

$$UR_{sup} = UR + 5{,}8\ F \tag{21}$$

$$UR_{inf} = UR - 6{,}4\ F \tag{22}$$

Observa-se que pela metodologia de Bratasz e Kozłowski (BRATASZ et al., 2007a; KOZŁOWSKI, 2010), quanto maior o desvio entre o ciclo sazonal e a média normal anual, mais restritivos são os limites de flutuação de *UR*. A Figura 59 mostra os limites de flutuação de *UR* seguros para a Capela da ceia, calculados segundo essa metodologia. A média das flutuações permitidas acima do ciclo sazonal ficou em 4,3% e abaixo, 4,8%. KOZLOWSI (2010) aponta que quando a análise da série de dados determina flutuações menores que ±10%, os limites calculados seriam desnecessariamente restritivos, e o limite de ±10% em torno do ciclo sazonal pode ser aceito, sob a supervisão de um profissional conservador. Já MARTENS (2012, p. 104) considera que flutuações de *UR* menores que ±15% correspondem à zona elástica, de respostas reversíveis, e são admissíveis. Tal situação verifica-se na Capela da Ceia, conforme se pode observar na Figura 59.

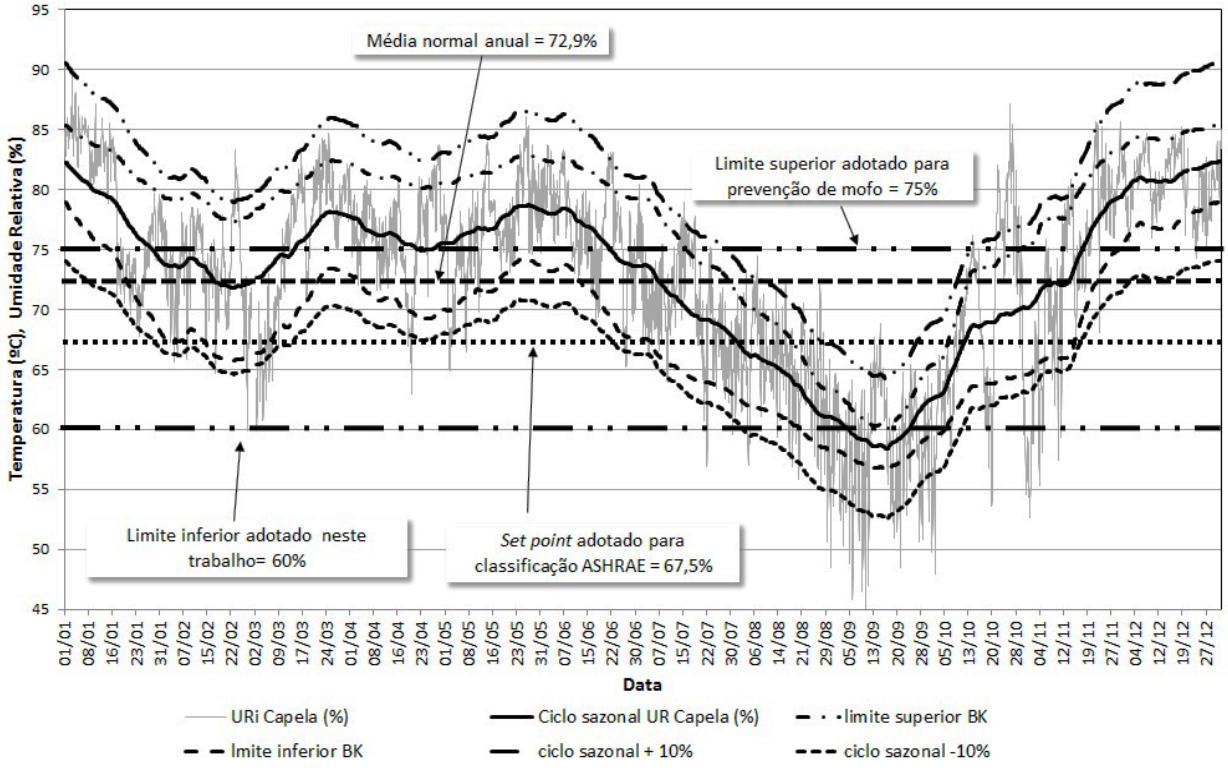


Figura 59 – Capela da Ceia – limites seguros de flutuação de *UR* pela metodologia Bratasz-Kozlowski.

A Tabela 8 resume os parâmetros obtidos pela metodologia Bratasz-Kozłowski:

Tabela 8 – Capela da Ceia – Comparação de critérios-limite de umidade relativa (valores em %)

Parâmetro	Bratasz-Kozłowski	Percentil 7º. ao 93º. (EN15157)	±10% do ciclo sazonal	Limites de *UR* adotados neste trabalho
Flutuações admissíveis pelos percentis 7 e 93	-6,4 a 5,8			
Flutuações admissíveis médias após ponderação	-4,3 a 4,8			
Limites de *UR* após ponderação (variáveis, valores extremos mínimo e máximo)	56,6 a 85,4	59,5 a 82,9	52,5 a 90,5	60 a 75
Índice de desempenho anual, dados horários	**71,7**	**93 -7=86,0**	**90,9**	**45,5**

Ao final do Apêndice A, a Tabela 25 compara valores de umidade relativa crítica para crescimento de mofo segundo os diversos modelos teóricos investigados nesta pesquisa. Tais umidades críticas são função de diversos fatores, como por exemplo, a temperatura e o tipo de substrato. O seu limite mínimo, em geral, varia entre 70 e 80%. A ASHRAE (vide Quadro 2) considera como limite "seguro" de umidade relativa o valor de 75%, nas classes C e D, mínimo de 25% na classe C.

ROSADO (2004, p. 116) propôs para esculturas em cedro uma zona de segurança mecânica, em termos de *UR*, de 45 a 65%. Verifica-se, observando-se o histograma da Figura 57, que a frequência dessa faixa internamente à Capela, durante o período de medições ficou abaixo de 20%.

Com base nessas considerações **adotou-se neste trabalho, para a avaliação do potencial de utilização da ventilação natural, a faixa de 60 a 75%.** Escolheu-se o limite mínimo pelo 7º. percentil das umidades provadas e o máximo para prevenção de mofo. Para efeito de classificação da Capela no sistema da ASHRAE, o *set point* de umidade relativa considerado foi o centro dessa faixa: **67,5%.**

5.1.3- Potencial de desumidificação por meio de ventilação natural ou forçada

A Figura 60 mostra os valores de umidade relativa monitorados internamente à Capela da Ceia, plotados em função das respectivas médias horárias de umidade relativa externas, para o período 2006-2012.

Conforme se discutiu na seção anterior, adotou-se 25ºC como limite seguro para a temperatura interna. No Apêndice A é discutida a influência da temperatura nas métricas de

preservação. Considerando que a análise das possíveis estratégias de ventilação natural ou forçada visa à melhoria das condições de conservação das esculturas na Capela da Ceia, foram incluídos no diagrama da Figura 60 somente os dados externos com T_e abaixo de 25ºC, o que correspondeu a 94,5% das temperaturas externas médias horárias, no período 2006-2012 (Figura 40) e 90,3%, no período 2011-2012 (Figura 55).

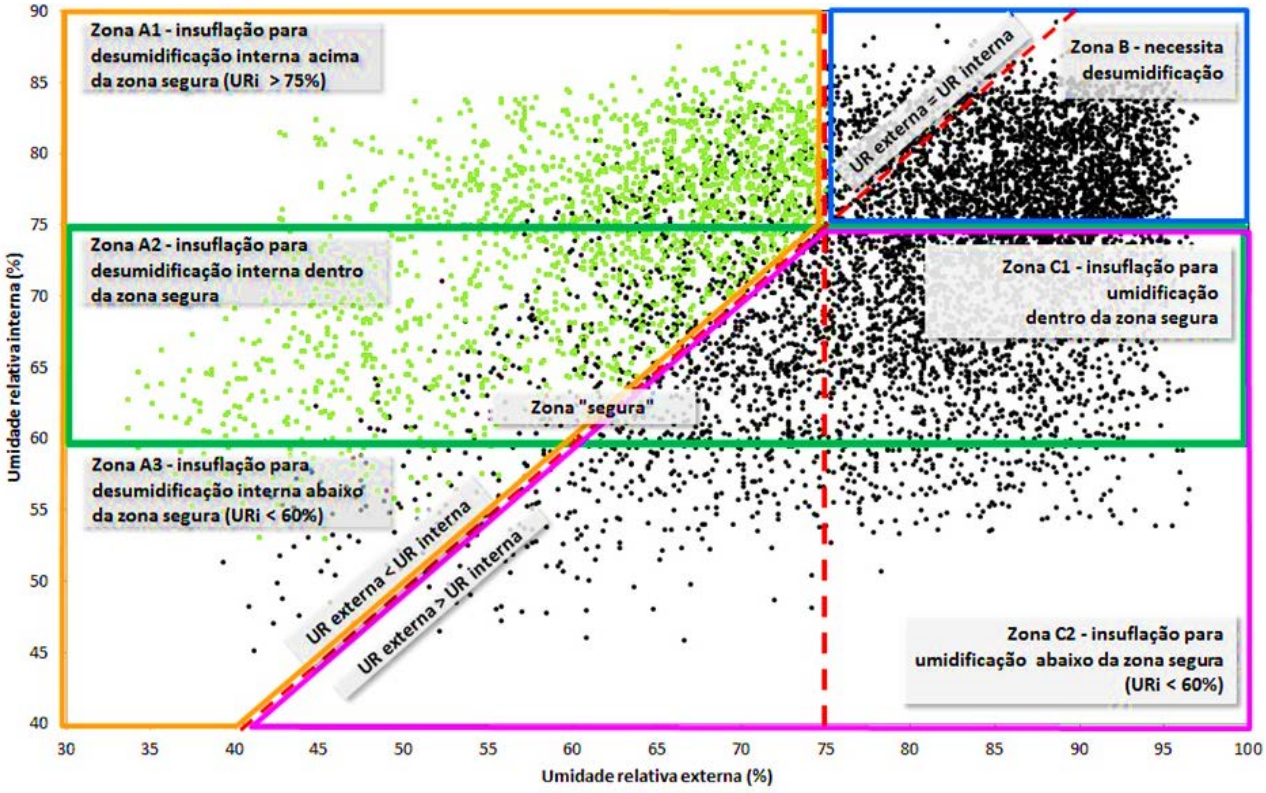


Figura 60 – Capela da Ceia – UR_e (médias horárias 2006-2012) *x* UR_i (médias horárias 2011-2012). Ocorrências c/ *Te* < 25ºC, correspondendo a 94,5% das ocorrências. Em verde, pontos com *We* < *Wi*.

A Figura 61 mostra um diagrama semelhante ao anterior, porém com as médias horárias de umidade relativa externa para o período 2011-2012. Nessa amostra, as temperaturas externas menores que 25ºC totalizaram 90,3% das ocorrências (vide Figura 44).

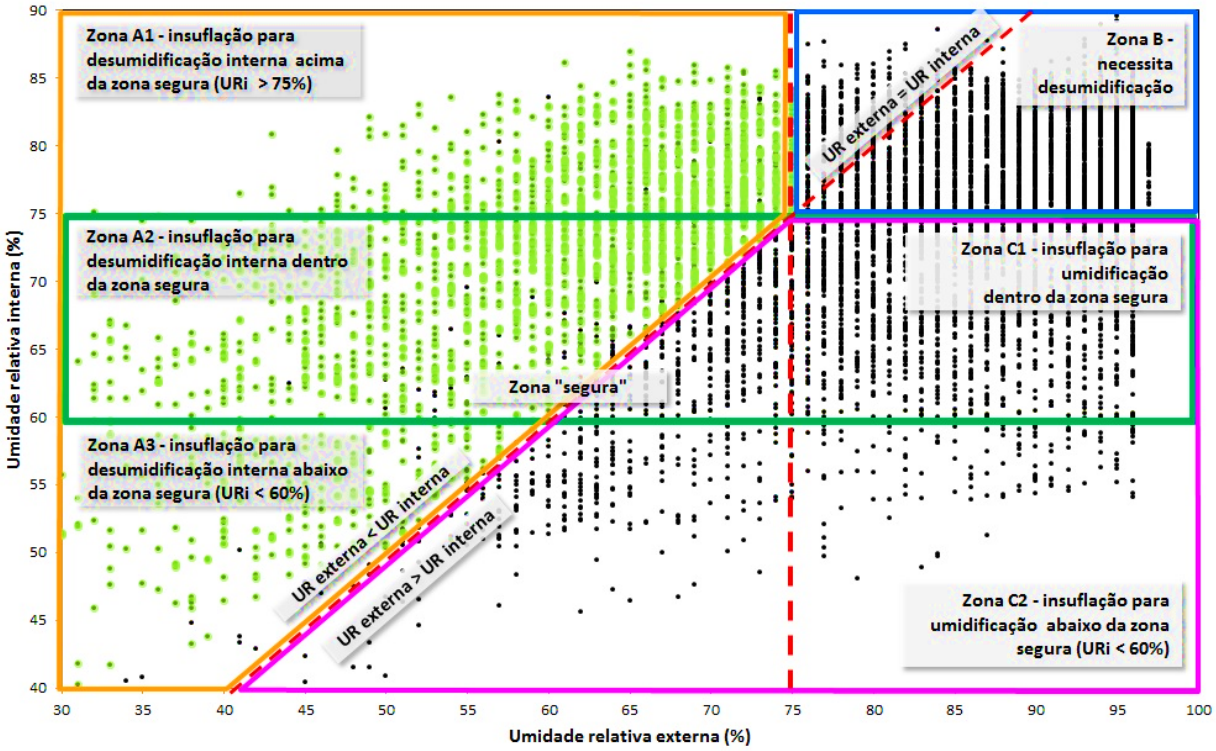


Figura 61 – Capela da Ceia – UR_e x UR_i (período 2011-2012). Ocorrências c/ T_e < 25ºC, correspondendo a 94,5% das ocorrências. Em verde, pontos com *We* < *Wi*.

Cabe destacar que o aspecto de alinhamento vertical dos pontos na Figura 61 ocorre em função dos dados horários de umidade relativa fornecidos pelo INMET não possuirem casas decimais. Na Figura 60 tal alinhamento não ocorre por causa dos decimais presentes nas médias históricas dos dados horários para os anos de 2006 a 2012.

A Tabela 9 compila os critérios, modo e potencial de utilização (tomado como frequência de ocorrência) de estratégias de ventilação natural ou forçada, visando desumidificação ou umidificação internamente à Capela da Ceia. Hipoteticamente, tais parâmetros poderiam ser utilizados como limites de controle em um sistema de controle automatizado de insuflação/exaustão de ar no ambiente em estudo. Das três estratégias descritas na Tabela 9, a estratégia "A*" seria a mais recomendável, por implicar em menor custo energético e menor risco de danos físico-mecânicos para as esculturas.

CARVALHO (2005b, p. 87) afirma que a utilização exclusiva de critérios baseados na comparação entre as umidades relativas externa e interna é insuficiente para o estabelecimento de parâmetros de controle para sistemas de ventilação visando a conservação de coleções, devendo-se considerar também as razões de umidade (umidades absolutas).

Tabela 9 – Capela da Ceia - Potencial de utilização de estratégias de ventilação natural ou forçada, com base na correlação UR_i x UR_e (T_e < 25ºC). Cores indicadas referem-se às figuras 60 e 61.

Zona	**Descrição**	**Critérios**	**Potencial de utilização = Frequência de ocorrência (%) / Período (UR_e)**		
			2006-2012	2011-2012	Simul. E+ [120]
"segura" (verde)		60% <= *URi* <= 75%	42,7	37,4	45,4
A1	Desumidificação interna acima da zona segura	*URe*<=75% E *URi*>75%	13,4	9,8	5,5
A2	Desumidificação interna dentro da zona segura	60% <= *URi*<=75% E *URe* < *URi*	12,4	13,7	21,1
A3	Desumidificação interna abaixo da zona segura	*URe* < *URi* < 60%	1,7	3,2	3,0
Subtotal A (amarelo)	**Desumidificação interna (A1+A2+A3)**	***URe* < *URi* E *URe* <= 75%**	**27,5**	**26,7**	**29,6**
A*	Desumidificação interna com critério adicional de razão de umidade	*URe* < *URi* E *URe*<= 75% E *We* <*Wi*	19,7	23,9	18,4
B (azul)	**Desumidificação interna mediante desumidificação do ar externo previamente à insuflação**	***URe* > 75% E *URi* >75%**	**31,2**	**33,9**	**39,9**
C1	Umidificação interna dentro da zona segura	60% <= *URe* <=75% E *URe* >*URi*	30,3	23,7	24,3
C2	Umidificação interna abaixo da zona segura	*URe* > *Uri* E *URi*< 60%	5,5	6,0	0,7
Subtotal C (rosa)	**Umidificação interna (C1+C2)**	***URe* > *URi* E *URi* <= 75%**	**35,8**	**29,7**	**25,0**
Subtotal	**A + B + C**	***Te* < 25ºC**	**94,5**	**90,3**	**94,5**

Acrescendo-se aos critérios adotados para a estratégia de desumidificação (zona A na Tabela 9) a exigência de que a razão de umidade do ar externo seja menor que a do ar interno (*We* < *Wi*), **o potencial de utilização da ventilação para desumidificação aplica-se em 19,7% e 23,9% das horas do ano,** respectivamente para os dados dos períodos 2006-2012 e 2011-2012 (zona A* na Tabela 9). Tais pontos foram destacados em verde nas figuras 60 e 61.

As figuras 62, 63 e 64 destacam, na cor verde, sobre extratos da Figura 54, cuja escala do eixo temporal foi ampliada para melhor visualização, os horários em que a estratégia de ventilação natural ou forçada para desumidificação é aplicável, atendendo aos critérios da

[120] Vide seção 5.2.2. Os resultados dos modelos preditivos não foram inseridos nesta tabela por consistirem em médias diárias, enquanto que os percentuais apresentados na Tabela 9 foram calculados com base nos dados horários.

zona A* (vide Tabela 9), considerando as médias horárias históricas de UR_e para o período 2006-2012, respectivamente para a primavera (período que representa tipicamente o ano todo), inverno e verão.

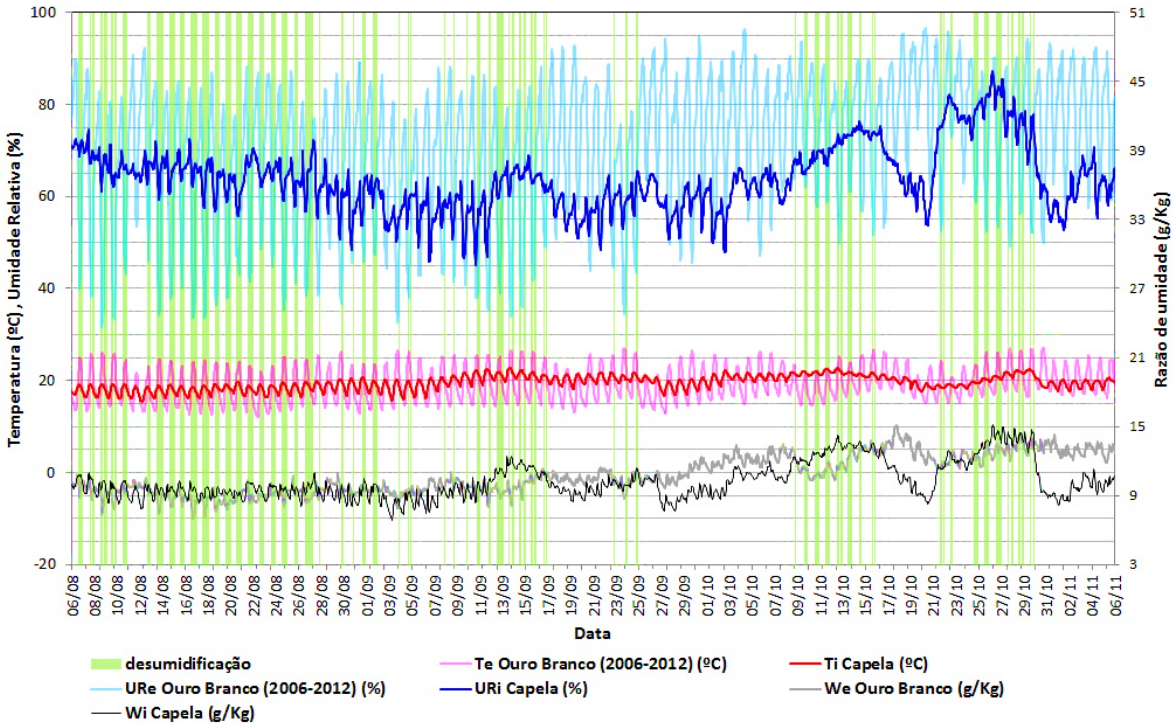


Figura 62 – Capela da Ceia – horários com desumidificação aplicável (em verde). Período: 06/8 a 05/11 – (**primavera**). T_i, Ur_i *e* W_i (Capela da Ceia, médias horárias, período 2011-2012) *versus* T_e, Ur_e *e* W_e (Ouro Branco, médias históricas, período 2006-2012).

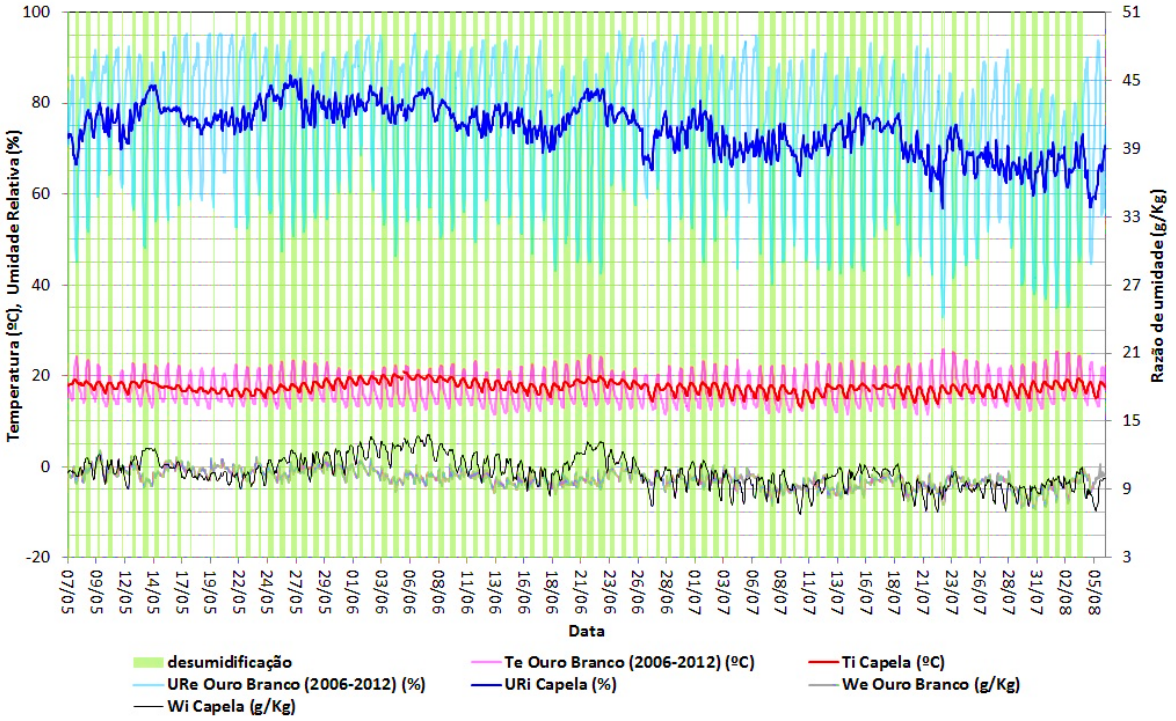


Figura 63 – Capela da Ceia – horários com desumidificação aplicável (em verde). Período: 07/5 a 05/8 (**inverno**). T_i, Ur_i *e* W_i (Capela da Ceia, médias horárias, período 2011-2012) *versus* T_e, Ur_e *e* W_e (Ouro Branco, médias históricas, período 2006-2012).

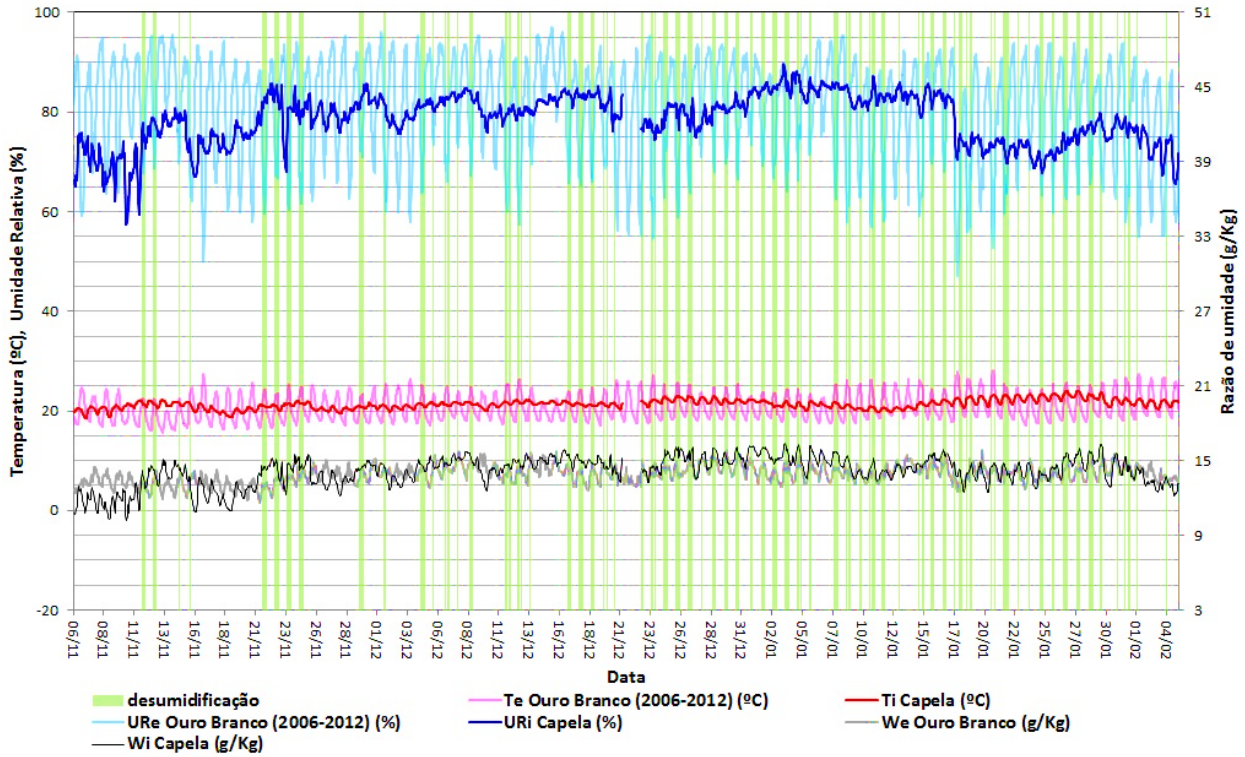


Figura 64 – Capela da Ceia – horários com desumidificação aplicável (em verde). Período: 06/11 a 04/2 (**verão**). T_i, Ur_i *e* W_i (Capela da Ceia, médias horárias, período 2011-2012) *versus* T_e, Ur_e *e* W_e (Ouro Branco, médias históricas, período 2006-2012).

Por inspeção das figuras 62, 63 e 64, verifica-se que os horários em que a estratégia de desumidificação é aplicável, correspondem aos picos máximos de temperatura diários, os quais ocorrem simultaneamente aos picos mínimos de umidade relativa. Cabe enfatizar que, embora a insuflação de ar externo mais quente que o ar interno contribua para acelerar processos de deterioração química, conforme se discute no Apêndice A, para a conservação preventiva das coleções, em geral o controle da umidade relativa tem prioridade sobre o controle da temperatura.

Observa-se ainda que no verão os horários em que estratégia de desumidificação é aplicável são menos frequentes e se apresentam com distribuição mais concentrada que no inverno, o que se confirma pelo histograma mostrado na Figura 65, que mostra a distribuição dos horários em que a desumidificação é aplicável, para cada mês do ano. Cabe ainda destacar que a aplicabilidade da estratégia de desumidificação foi obtida para os horários em que T_e < 25ºC, visando evitar o sobreaquecimento interno. No período de primavera ocorre uma situação híbrida, típica do ano como um todo.

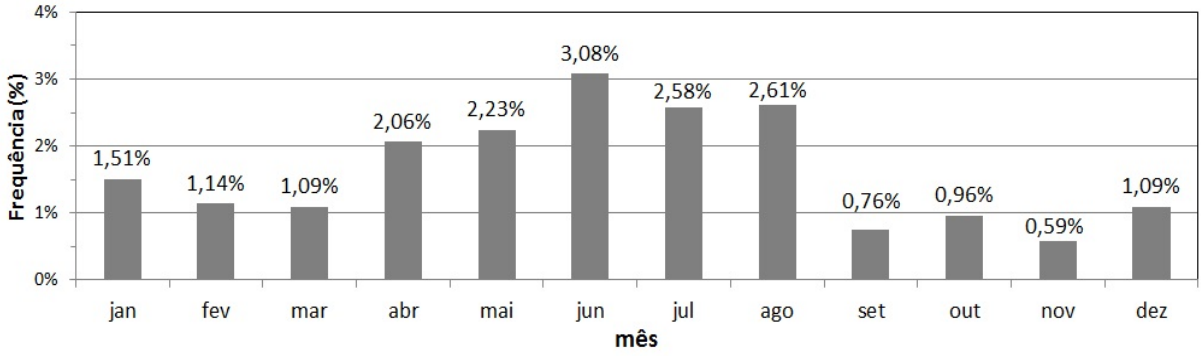


Figura 65 – Capela da Ceia – distribuição do potencial de aplicabilidade da estratégia de desumidificação ao longo do ano.

A Figura 66 mostra a distribuição dos horários em que a estratégia de desumidificação é aplicável ao longo do dia:

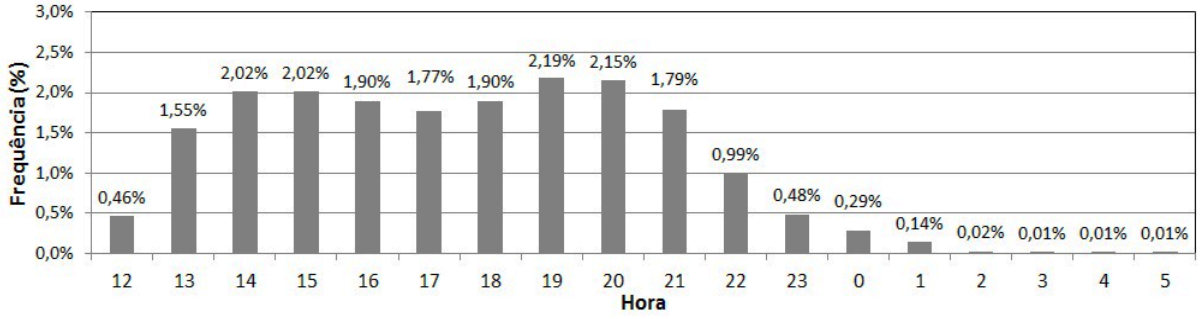


Figura 66 – Capela da Ceia – distribuição do potencial de aplicabilidade da estratégia de desumidificação ao longo do dia.

Constata-se que os horários de maior aplicabilidade se concentram entre 14 e 20 horas, quando ocorrem os picos diários máximos de temperatura e mínimos de umidade relativa, conforme apontado anteriormente. A distribuição bimodal da Figura 66 pode estar associada às variações radiação solar incidente nas envoltórias da Capela ao longo do ano. Nos dois histogramas acima, o somatório das frequências corresponde ao potencial anual de aplicação da desumidificação, de 19,7%.

Os resultados indicam um significativo potencial de aplicação da ventilação natural ou forçada para desumidificação, em torno de 20% das horas do ano, cabendo destacar o aspecto sustentável desta estratégia, conforme se discutiu no Capítulo 2.

5.2- Resultados das simulações computacionais

5.2.1- Modelos preditivos por regressão linear múltipla

Para definição das variáveis preditoras a serem utilizadas no modelo de regressão linear múltipla discutido na seção 4.6.1, procedeu-se à inspeção dos gráficos comparativos de T_{imed} *e* W_{imed} registradas na Capela da Ceia, com as respectivas mínimas, médias e máximas externas. A Figura 67 mostra a comparação das temperaturas e a Figura 68, a comparação das razões de umidade.

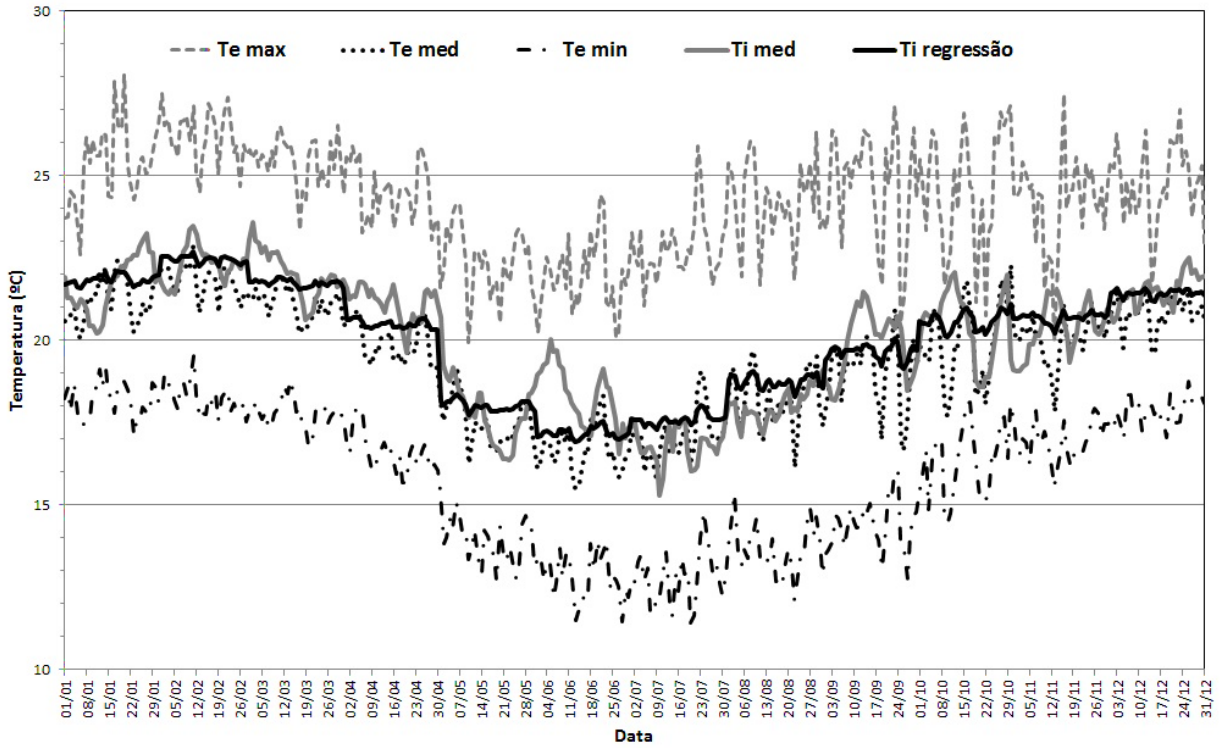


Figura 67 – Capela da Ceia – T_{imed} monitorada e calculada por modelo preditivo *versus* T_{emax}, T_{emed} e T_{emin} monitoradas.

Observa-se por inspeção visual da Figura 67, que a variável preditora adequada à temperatura média interna é a temperatura média externa, adotando-se para o modelo de regressão linear múltipla de previsão de T_{imed} as variáveis GT_e (média mensal externa) e (T_{emed} - GT_e), diferença entre a média diária externa e a média mensal externa.

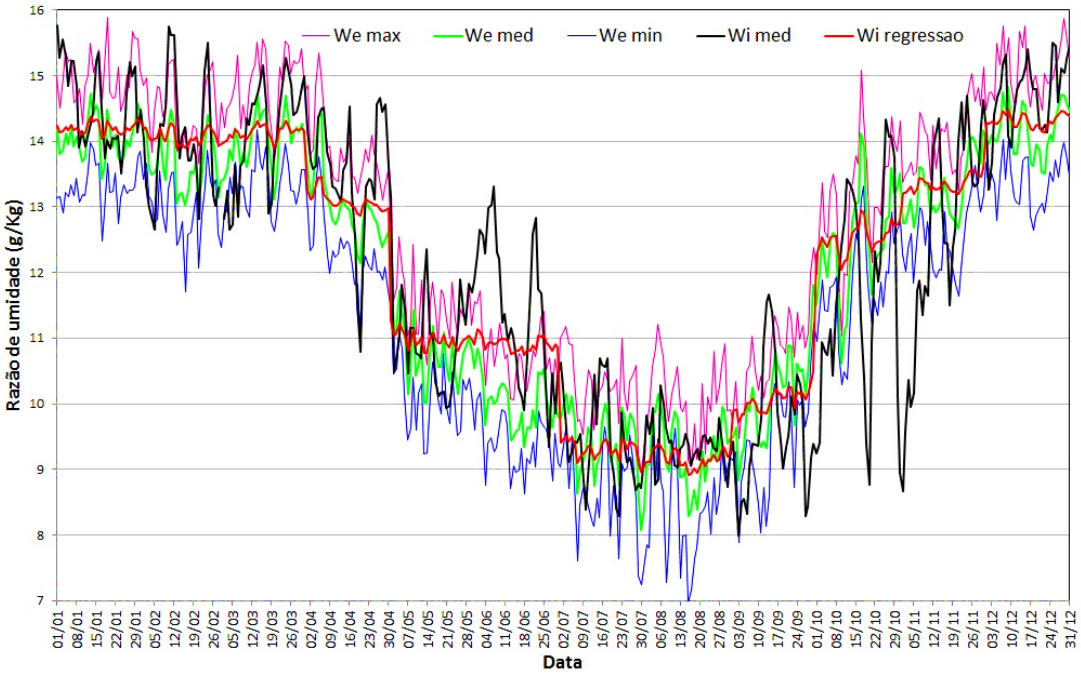


Figura 68 – Capela da Ceia – W_{imed} monitorada e calculada por modelo preditivo *versus* W_{emax}, W_{emed} e W_{emin} monitoradas.

Já a comparação de W_{imed} com as respectivas mínimas, médias e máximas diárias externas não indica claramente a variável preditora mais adequada. Foram então calculados os desvios entre W_{imed} e cada uma das outras três variáveis mostradas na Figura 68, identificando-se para cada dia do ano, o menor desvio. Com esse procedimento verificou-se que o menor desvio ocorre em 71% dos dias quando calculado com W_{emed} e 29% dos dias quando calculado com W_{emin}. Adotou-se então, como variáveis preditoras para o modelo de regressão linear múltipla para previsão de W_i as variáveis GW_e (média mensal externa) e (W_{emed} - GW_e), diferença entre a média diária externa e a média mensal externa.

As equações preditivas obtidas e respectivos coeficientes de determinação e desvios quadráticos médios foram

$$T_{imed} = 1{,}035\, GT_e + 0{,}213(T_{emed} - GT_e) - 0{,}109 \quad (R^2 = 0{,}78;\ DQM = 0{,}91ºC) \tag{23}$$

$$W_{imed} = 1{,}049\, GW_e + 0{,}262\, (W_{emed} - GW_e) - 0{,}549 \quad (R^2 = 0{,}77;\ DQM = 1{,}05g/kg) \tag{24}$$

As figuras 67 e 68 comparam os valores de T_{imed} e W_{imed} calculados por regressão com os valores monitorados na Capela. Os valores de GT_e e GW_e utilizados na análise de regressão são aqueles informados na Tabela 2. Para obtenção dos coeficientes do modelo de regressão

linear múltipla foi utilizado o pacote de análise de dados do programa *Microsoft Excel 2010* ©. As estatísticas das análises de regressão são apresentadas no **Apêndice E**.

Como tentativa de aperfeiçoamento da metodologia Kruger-Givoni-Carvalho (vide seção 4.6.1) foi testada a substituição, no modelo de regressão linear múltipla, da média mensal por uma média móvel calculada para os 30 dias anteriores a cada registro, mas os coeficientes de determinação obtidos (R^2 = 0,80 para T_{imed} e R^2 = 0,75 para W_{imed}) demonstraram apenas uma ligeira melhoria com relação à primeira variável e uma piora, com relação à segunda.

A partir dos valores de temperatura e razão de umidade médias diárias obtidos por regressão linear múltipla, foram calculadas as médias diárias de umidade relativa, utilizando os algoritmos da ASHRAE (2009). Os valores calculados são comparadas com as médias diárias monitoradas na capela, na Figura 69. O desvio quadrático médio entre as duas séries foi de 5,38%.

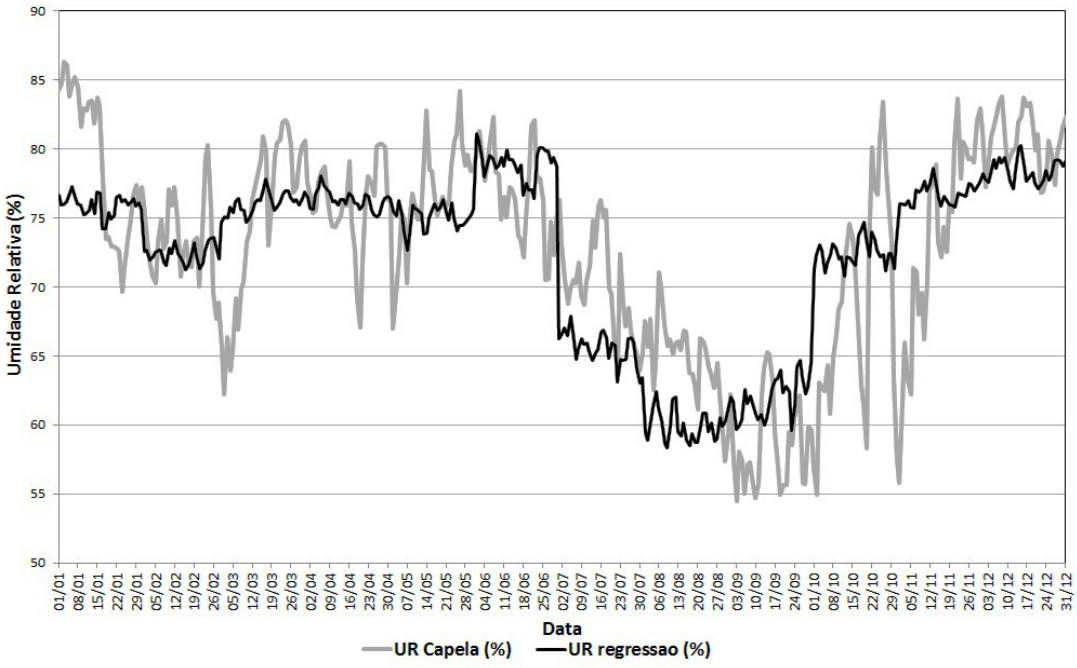


Figura 69 – Capela da Ceia – UR_{imed} monitorada *versus* UR_{imed} calculada com base em T_{imed} e W_{imed} obtidas por regressão linear múltipla.

A Figura 70 mostra os diagramas de dispersão dos dados monitorados e estimados por regressão linear múltipla:

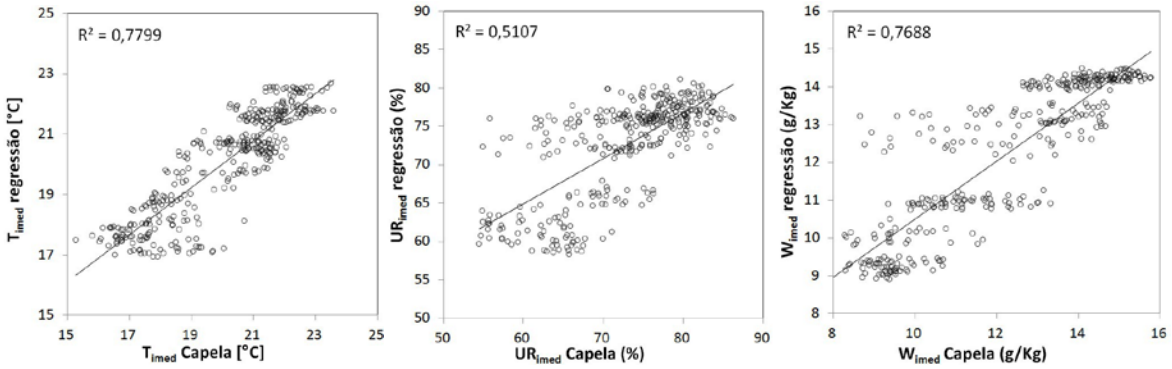


Figura 70 – Capela da Ceia – diagramas de dispersão de T_{imed}, UR_{imed} e W_{imed} monitoradas e obtidas por regressão linear múltipla.

5.2.2- Simulações de desempenho higrotérmico – programa Energy Plus ©

Por meio de simulações no programa *Energy Plus v. 7.2.6* ©, utilizando arquivo climático com as médias horárias históricas (2006-2012) de Ouro Branco fornecidas pelo INMET e um modelo elaborado no programa *SketchUp v.8* © com o *plugin Open Studio v.1.0.9*© (vide seção 4.6.2), foram obtidas a temperatura, umidade relativa e razão de umidade internas para a Capela da Ceia, mostradas na Figura 71.

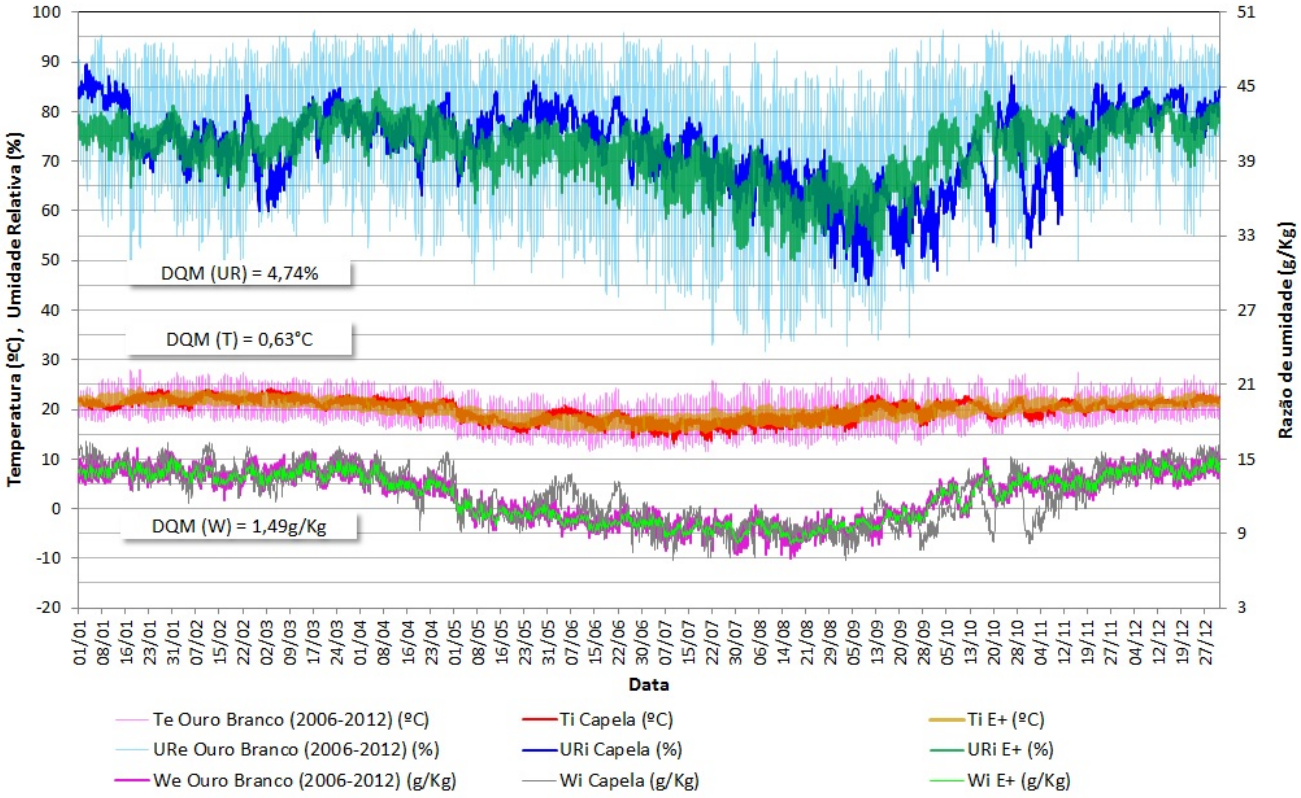


Figura 71 – Capela da Ceia - T_i, Ur_i *e* W_i monitoradas (médias horárias, período 2011-2012) *versus* T_e, Ur_e *e* W_e (Ouro Branco, médias horárias históricas, período 2006-2012), *versus* T_i, Ur_i *e* W_i simuladas no programa *Energy Plus* ©. (DQM = Desvio Quadrático Médio entre os valores simulados e valores monitorados)

Comparando-se figuras de 67 a 71 verifica-se que os resultados da simulação com o *Energy Plus* © apresentam distribuição e limites semelhantes à dos resultados dos modelos preditivos.

A Figura 72 mostra os diagramas de dispersão dos dados horários monitorados e simulados no *Energy Plus* © e de suas respectivas médias móveis:

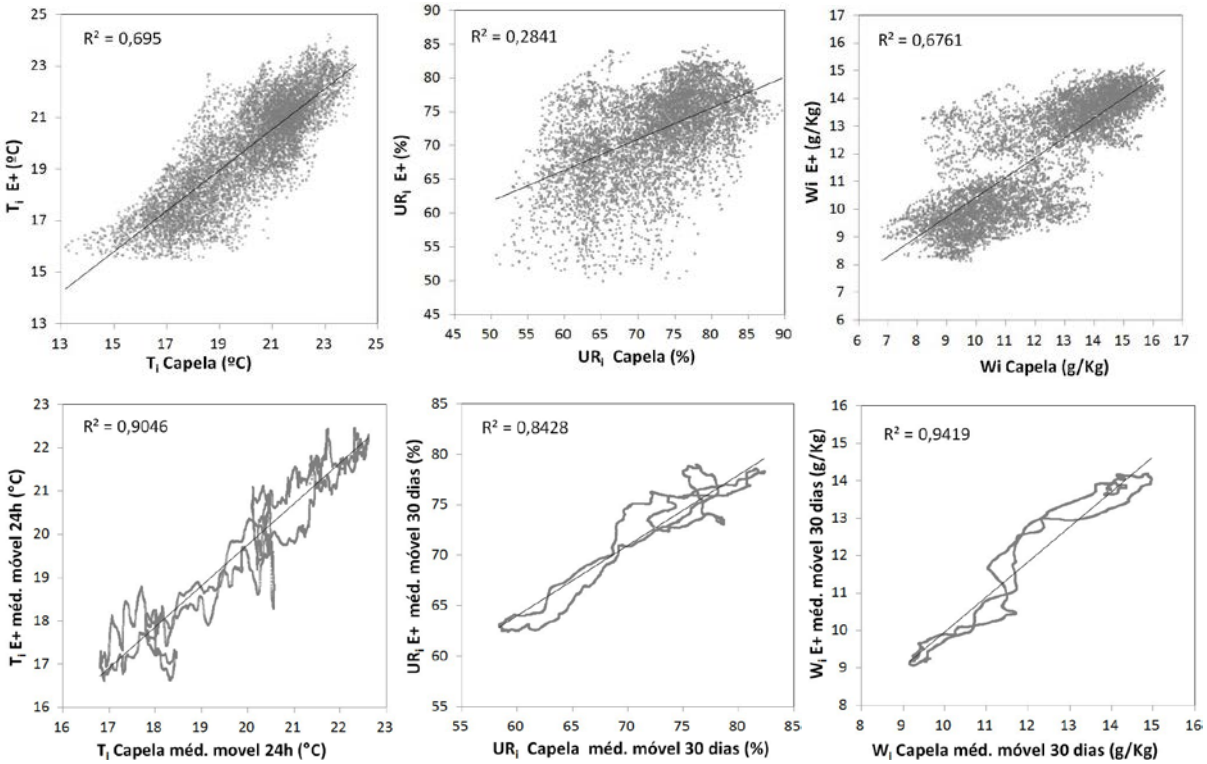


Figura 72 – Capela da Ceia – diagramas de dispersão de T_i, UR_i e W_i monitoradas e simuladas no programa *Energy Plus* ©, valores horários (acima) e médias móveis (abaixo).

A Tabela 10 compara os desvios quadráticos médios e coeficientes de determinação observados nas simulações de temperatura, umidade relativa e razão de umidade pelos dois métodos, em relação aos valores monitorados:

Tabela 10 – Comparação do DQM e R^2 para simulação de T_i, Ur_i, W_i por modelo preditivo por regressão linear multipla e por meio do programa *Energy Plus* ©

Método	T_i **(ºC)**		UR_i **(%)**		W_i **(g/kg)**	
	DQM	**R^2**	**DQM**	**R^2**	**DQM**	**R^2**
Modelo preditivo (regressão)	0,91	0,7799	5,38	0,5107	1,05	0,7688
Energy Plus	0,63	0,6950	4,74	0,2841	1,49	0,6761
Energy Plus (médias móveis)	0,59	0,9046	2,70	0,8428	0,50	0,9419

Infere-se da análise dos resultados acima que tanto os modelos preditivos quanto a simulação no *Energy Plus* © produziram estimativas com erros aceitáveis, da mesma ordem de grandeza das incertezas de medição dos sensores de *T/UR*, e poderiam ser utilizados para o cálculo das métricas de preservação estudadas neste trabalho.

Os coeficientes de determinação obtidos no *Energy Plus* © foram menores que os do modelo preditivo, em função do programa trabalhar com dados horários, enquanto o modelo preditivo é baseado em médias diárias e mensais, que não representam bem as oscilações diárias. Tomadas as médias móveis (Figura 72), esses coeficientes melhoram significativamente, ficando acima de 0,84. Verifica-se que os coeficientes de determinação para a *UR* foram menores que os demais. Observa-se, ainda, que os desvios médios quadráticos são da mesma ordem de grandeza dos critérios-limite adotados para o cálculo de **índices de desempenho**, diminuindo a sua confiabilidade para o cálculo dessa métrica específica (vide seção 5.4.2.1).

5.2.2.1. Critérios de convergência e análise de sensibilidade

Foram testados duas condições distintas para o controle inicial de convergência, *(warm up convergence)*, observando-se as condições relatadas na Tabela 11:

Tabela 11 – Teste do controle inicial de convergência no *Energy Plus* ©

Teste	**Erro admissível na carga térmica[W] (*loads convergence tolerance value*)**	**Erro admissível na temperatura [ºC] (*temperature convergence tolerance value***	**Número mínimo de dias de "aquecimento" *(Minimum number of warmup days)***	**Número máximo de dias de "aquecimento" *(Minimum number of warmup days)***	**Número de dias p/ convergência inicial**
1	0,1	0,1	-	25	6
2	0,001	0,001	-	25	19

Em função tempo computacional relativamente pequeno consumido pela simulação, foram mantidos os parâmetros do teste 2.

O Quadro 4 mostra os resultados da análise de sensibilidade do modelo, descrita na seção 4.6.2.2, na presença e ausência da ventilação natural (mínima infiltração), indicando-se (+) para uma correlação positiva, (-) para uma correlação negativa e (0) quando a correlação não pôde ser claramente determinada (MARTENS 2012, p. 129).

Quadro 4 – Capela da Ceia - análise de sensibilidade do modelo simulado no programa *Energy Plus* ©.

Variáveis / Parâmetro de saída	**Sem ventilação**			**Com ventilação permanente**			
	Ti	**Wi**	**URi**	**Ti**	**Wi**	**URi**	**TRHA(*)**
Espessura das camadas construtivas	-	-	-	-	+	+	0
Absortância	+	+	-	+	-	-	+
Densidade	-	-	-	-	+	+	+
Calor específico	-	-	-	-	0	+	+
Área das aberturas	-	+	+	-	0	+	+
Área de massa interna (esculturas, mesa e prateleiras)	-	+	+	-	-	-	+

(*) TRHA = Taxa de renovação horária do ar

5.2.2.2. Comparação com métodos analíticos de cálculo de ventilação

A vazão de ar proporcionada pela ventilação unilateral estimada pela eq. (13) é Q = 0,0297m^3/s. A vazão média anual obtida na simulação com o *Energy Plus* © foi Q = 0,0278m^3/s, verificando-se, portanto, um desvio absoluto de cerca de 6% entre as estimativas.

A Figura 73 mostra as vazões horárias simuladas no *Energy plus* ©. Para a conversão de número de renovações horárias para m^3/s foi adotado o volume do modelo simplificado, de 168,15 m^3.

O DQM observado em relação ao valor calculado pelo modelo analítico foi de 0,0088 m^3/s. Considera-se que a simulação apresentou uma boa correspondência com o modelo analítico.

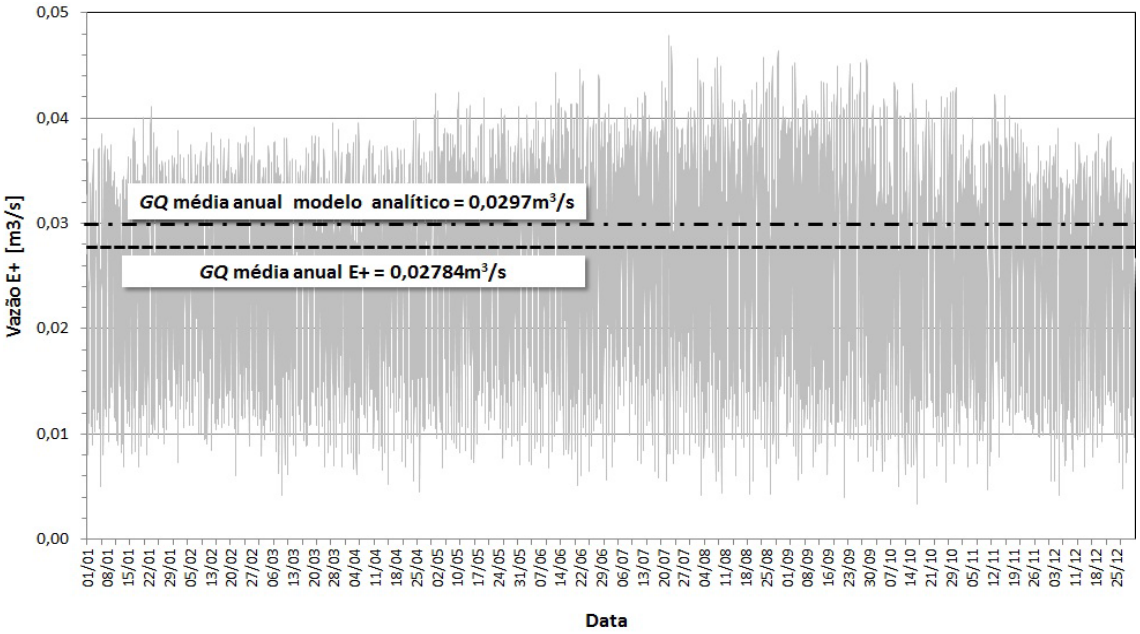


Figura 73 – Capela da Ceia – vazão de ar estimada por modelo analítico *versus* vazões horárias simuladas no programa *Energy Plus* ©.

5.2.2.3. Simulação de modificações no regime de ventilação visando à melhoria das condições de conservação

a. Regime 1

A simulação do Regime 1 descrito na seção 4.6.2.3 resulta no regime climático interno mostrado na Figura 74:

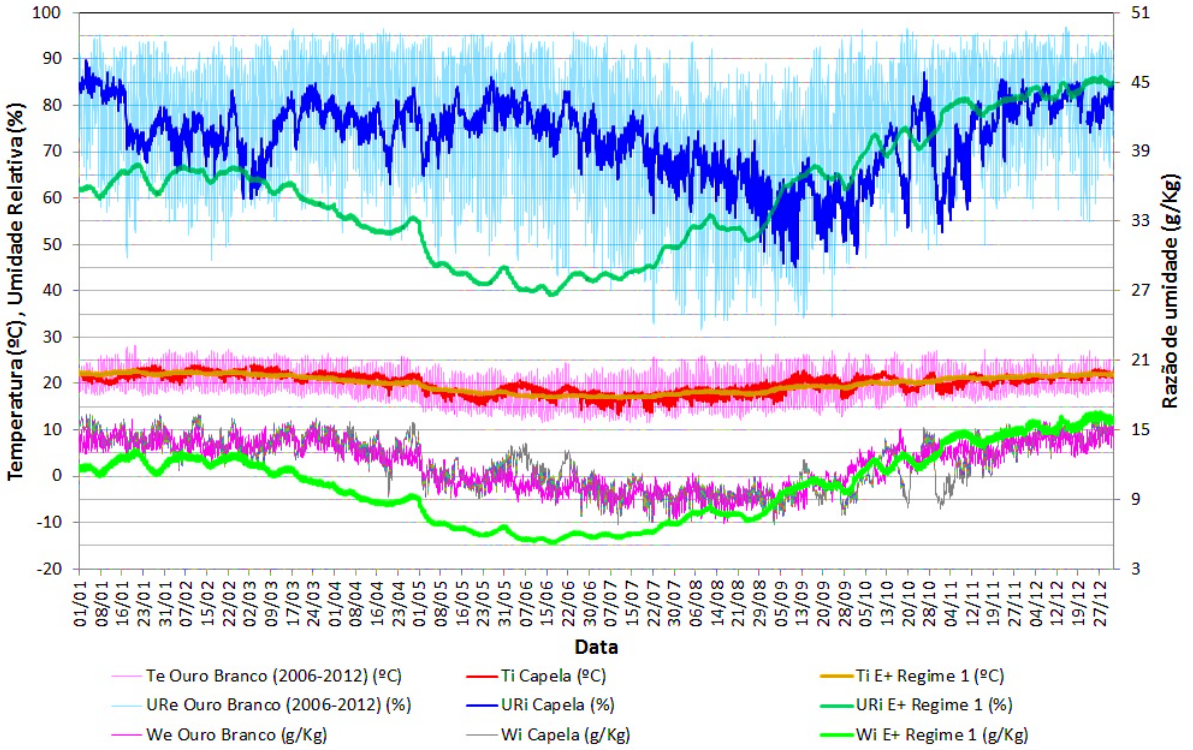


Figura 74 – Capela da Ceia - T_i, Ur_i *e* W_i monitoradas (médias horárias, período 2011-2012) *versus* T_e, Ur_e *e* W_e (Ouro Branco, médias históricas, período 2006-2012) *versus* T_i, Ur_i *e* W_i simuladas no programa *Energy Plus* ©. (Regime 1 – sem ventilação)

Comparando-se as figuras 71 e 74, constata-se que a vedação das aberturas de ventilação permanente da Capela (Regime 1) reduziria significativamente a amplitude de variação da temperatura e da umidade relativa, o que seria benéfico para a conservação das esculturas, do ponto de vista dos danos físico-mecânicos.

Contudo, essa medida aumentaria a desumidificação, atingindo valores inferiores ao limite mínimo de 60%, adotado neste trabalho, entre os meses de março e setembro (período de transição outono-inverno-primavera). Neste período, externa e internamente à Capela, há uma tendência de queda nas médias diárias de umidade relativa.

A supressão da ventilação permanente reduziria os riscos de deterioração química, na maior parte do ano, conforme se pode constatar analisando o impacto sobre as métricas de preservação (vide seção 5.4.2). Por outro lado, as médias de umidade relativa de verão tenderiam a ser ligeiramente superiores aos valores atualmente registrados.

b. Regime 2

Para simular o Regime 2 de ventilação descrito acima, inicialmente foi verificada a distribuição de frequências das diferenças de entalpia $\Delta H = H_i - H_e$, nos horários em que a estratégia de desumidificação seria aplicável (horários marcados em verde nas figuras 62, 63 e 64). O histograma de ΔH é apresentado na Figura 75:

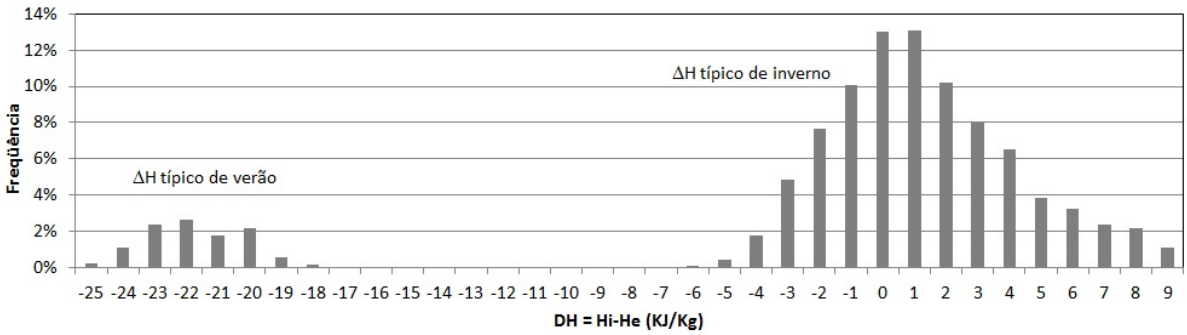


Figura 75 – Capela da Ceia – histograma de frequência das diferenças de entalpia (ΔH) monitoradas, nos horários em que a estratégia de ventilação para desumidificação é aplicável

A distribuição bimodal observada na Figura 75 corresponde às entalpias observadas no período de transição primavera – verão - outono e outono – inverno – primavera. Consideraram-se como valor de corte frequências de ΔH positivo superiores a 5%, propondo-se então o seguinte esquema de controle da ventilação com base em ΔH:

Para $\Delta H < 0$, $f_a = 1$;

Para $0 <= \Delta H <= 4$kJ/kg, fa interpolado linearmente;

Para $\Delta H > 4$kJ/kg, $fa = 0$;

Onde f_a é o fator de abertura da área de ventilação, considerada igual ao somatório atual das aberturas de ventilação permanente existente na porta da Capela.

Os resultados da simulação são mostrados na Figura 76:

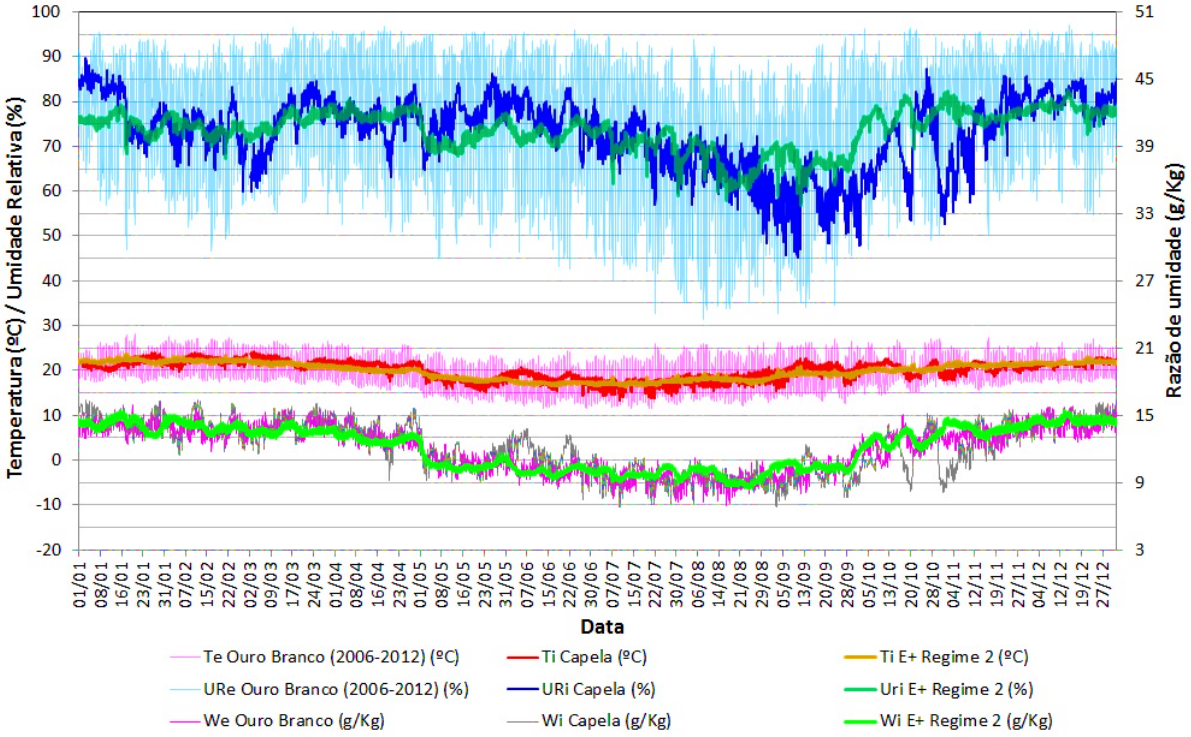


Figura 76 – Capela da Ceia - T_i, Ur_i *e* W_i (médias horárias, período 2011-2012) *versus* T_e, Ur_e *e* W_e (Ouro Branco, médias históricas, período 2006-2012) *versus* T_i, Ur_i *e* W_i simuladas no programa *Energy Plus* ©. (Regime 2 – sistema de ventilação com controle baseado em ΔH)

Constata-se que um sistema de ventilação natural com um controle das aberturas para aproveitar os períodos favoráveis para desumidificação, baseado em ΔH (regime 2) reduziria significativamente a amplitude de variação da temperatura e da umidade relativa, e consequentemente, diminuiria os riscos de danos físico-mecânicos às esculturas. Cabe destacar, que se tal sistema fosse implantado, seria conveniente prevenir a entrada de insetos pelas tomadas de ventilação por meio de telas. ELIAS (2000) constatou a presença de ataque ativo de insetos xilófagos na porta da Capela.

Na seção 5.4.2 são analisados os impactos, sobre as métricas de preservação, dos dois regimes de ventilação definidos acima.

5.2.3- Simulações fluidodinâmicas – programa Ansys CFX ©

5.2.3.1. Perfil de vento ASHRAE / regime permanente

Previamente aos ensaios realizados em túnel de vento, a malha do modelo simulado no programa *Ansys CFX* © foi refinada utilizando como condição de contorno no plano de

entrada um perfil de vento ASHRAE (vide seção 4.6.3.2). Após os ensaios em túnel de vento, o perfil de vento na entrada do modelo foi corrigido com um perfil polinomial (vide seção 5.3.2).

A Figura 77 mostra as projeções ortogonais do campo de velocidades e a Figura 78, as linhas de corrente do escoamento em vista isométrica, obtidas na simulação em regime permanente com o perfil de vento ASHRAE inicialmente adotado.

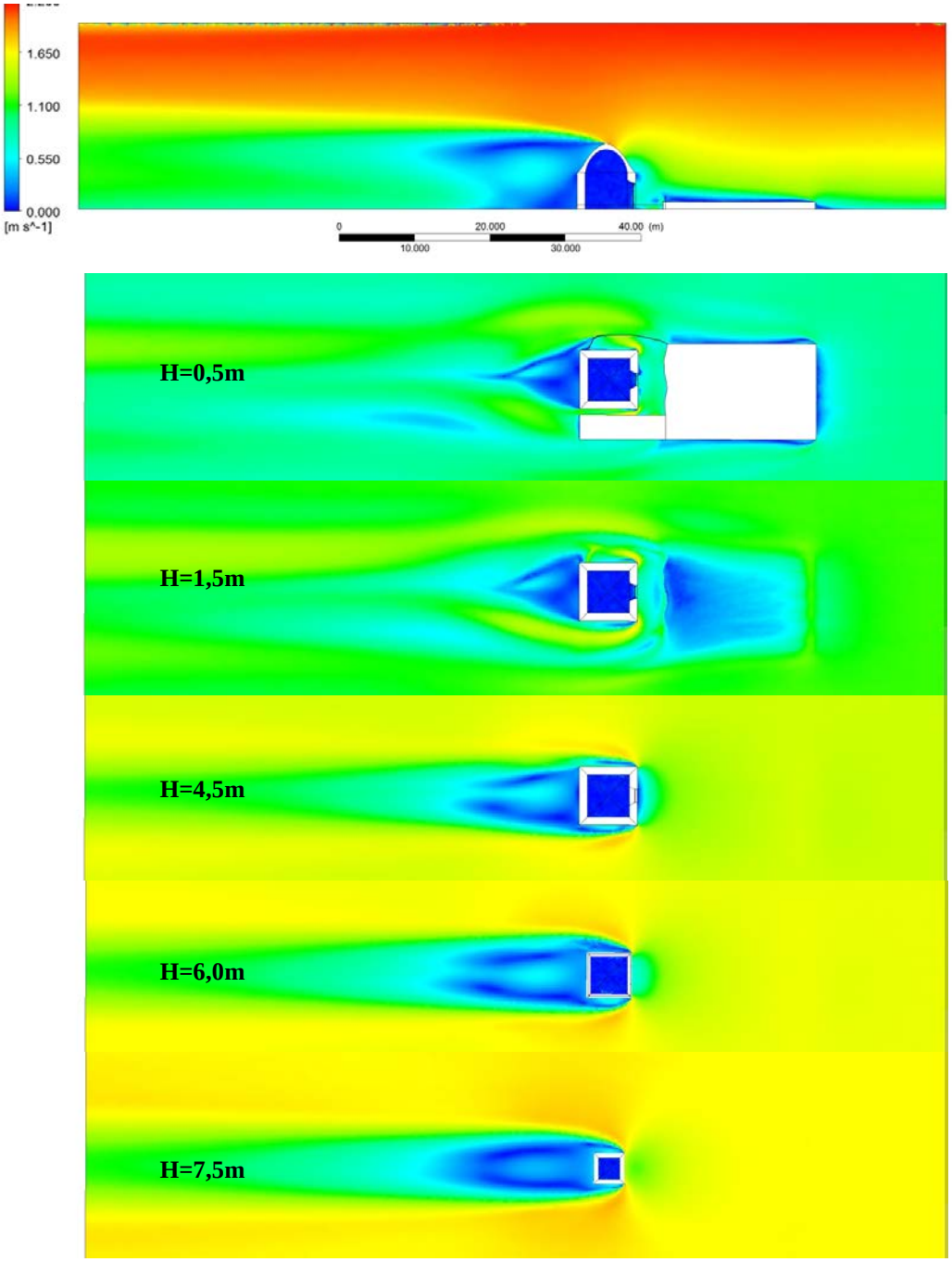


Figura 77 – Capela da Ceia – simulação do campo de velocidades externas, regime permanente, perfil de vento ASHRAE. Plano vertical no eixo longitudinal.

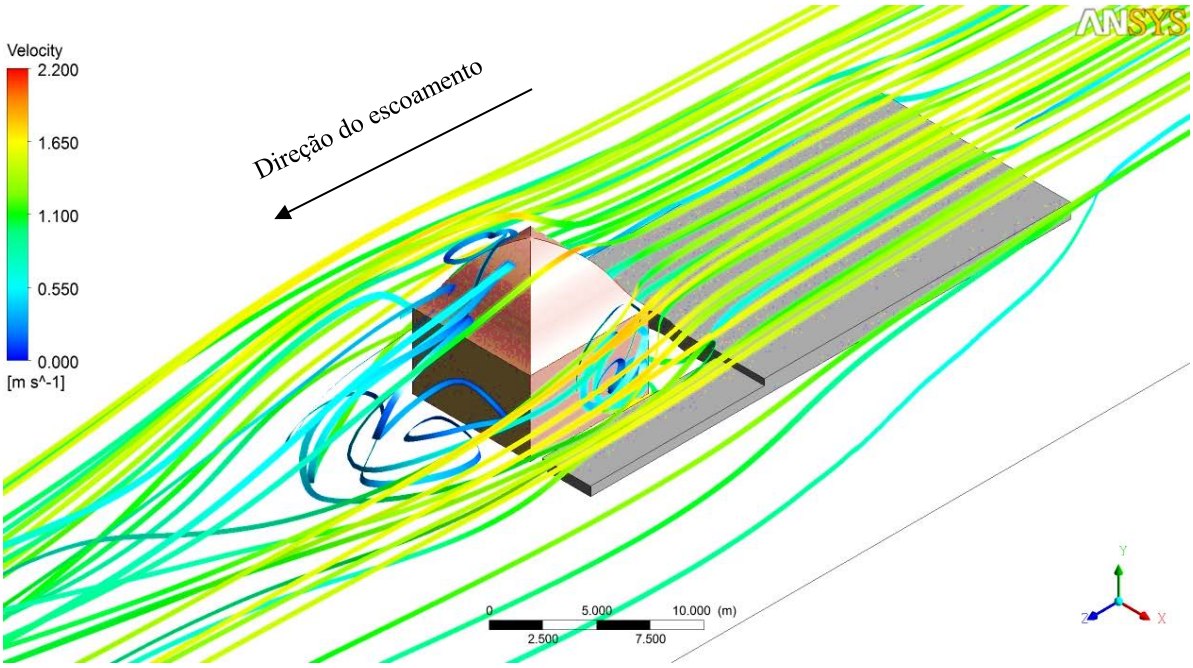


Figura 78 – Capela da Ceia – simulação das linhas de corrente externas, regime permanente, perfil de vento ASHRAE, vista isométrica.

A configuração da zona de esteira observada no escoamento a jusante do edifício, nas figuras 77 e 78, é compatível com resultados encontrados na literatura (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2006, p. 54; BROWN e DEKAY, 2004, p. 43; JIANG et al., 2003, 2004; MASCARÓ, 1991, p. 83).

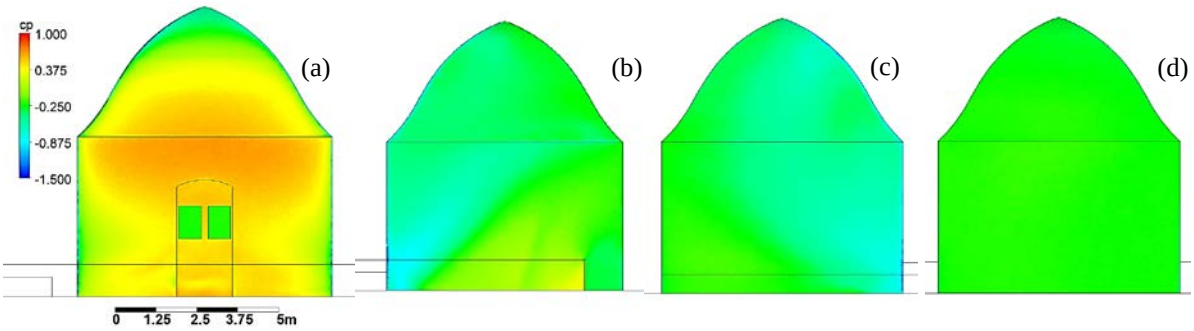


Figura 79 – Capela da Ceia – simulação dos coeficientes de pressão nas elevações, regime permanente, perfil de vento ASHRAE. a) sudeste; b) nordeste; c) sudoeste; d) noroeste.

A Figura 79 mostra os resultados da simulação do campo de coeficientes de pressão sobre as fachadas, em regime permanente, com perfil de vento ASHRAE. A ligeira diferença entre as duas fachadas laterais se deve à presença do muro em frente à elevação nordeste. Os resultados se mostram compatíveis com aqueles apresentados por JIANG et al., (2003) e

CÓSTOLA (2006, p. 79), que por sua vez remetem ao banco de dados de aerodinâmica de edifícios disponibilizado pela Universidade Politécnica de Tóquio[121].

A Figura 80 mostra vistas em perspectiva e ortogonal das linhas de corrente e vetores de velocidade internos, simulados em regime permanente, com perfil de vento ASHRAE. O padrão observado de linhas de corrente internas simuladas a partir deste perfil de entrada é complexo e as velocidades internas obtidas são baixas, em virtude da ausência da ventilação cruzada. As maiores velocidades observadas, entre 0,1 e 0,2m/s, ocorrem junto à porta. EVOLA e POPOV (2006) simularam a ventilação unilateral de um edifício com proporções semelhantes às da Capela, encontrando, próximo da porta, um campo de velocidades compatível com os resultados mostrados nas Figuras 80 e 82 .

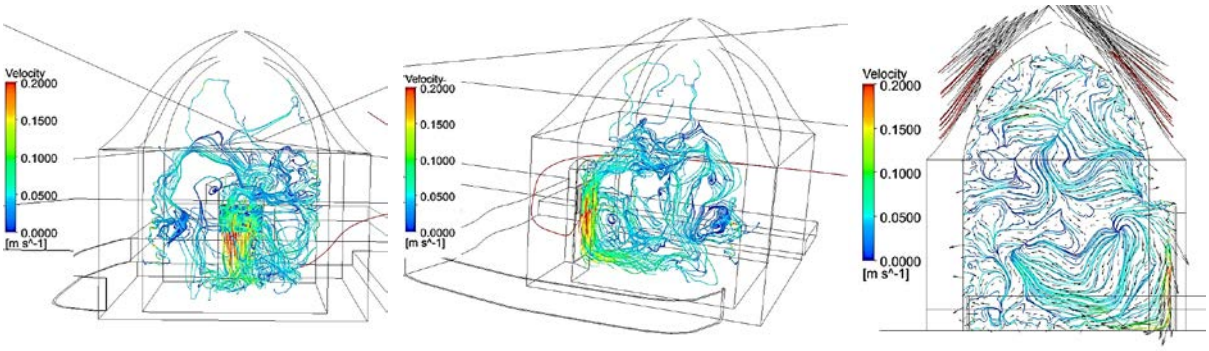


Figura 80 – Capela da Ceia – simulação das linhas de corrente e vetores de velocidade internos, regime permanente, perfil de vento ASHRAE. Vistas em perspectiva e em plano vertical no eixo longitudinal.

A vazão média observada nas aberturas, na simulação em regime permanente com perfil de vento AHSRAE, foi Q = 0,0371m^3/s. Comparada com a vazão calculada por método analítico para ventilação unilateral de 0,0297m^3/s, verifica-se um desvio absoluto de cerca de 20% entre a estimativa analítica e o valor simulado no programa *Ansys CFX* ©.

5.2.3.2. Perfil de vento ASHRAE / regime transiente

Para verificar a variação temporal dos campos de velocidade externos e internos, foram realizadas simulações transientes. A Figura 81 ilustra a variação temporal nos campos de velocidades obtidos utilizando perfil de vento ASHRAE na entrada do domínio de simulação. Os resultados mostram a formação de uma esteira ou **vórtice de Von Karman** na porção posterior do edifício, com comportamento cíclico. Esse tipo de comportamento é bem

[121] Vide nota 108 acima.

descrito na literatura de dinâmica de fluidos (KUMAR, 2009; VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007, p. 293).

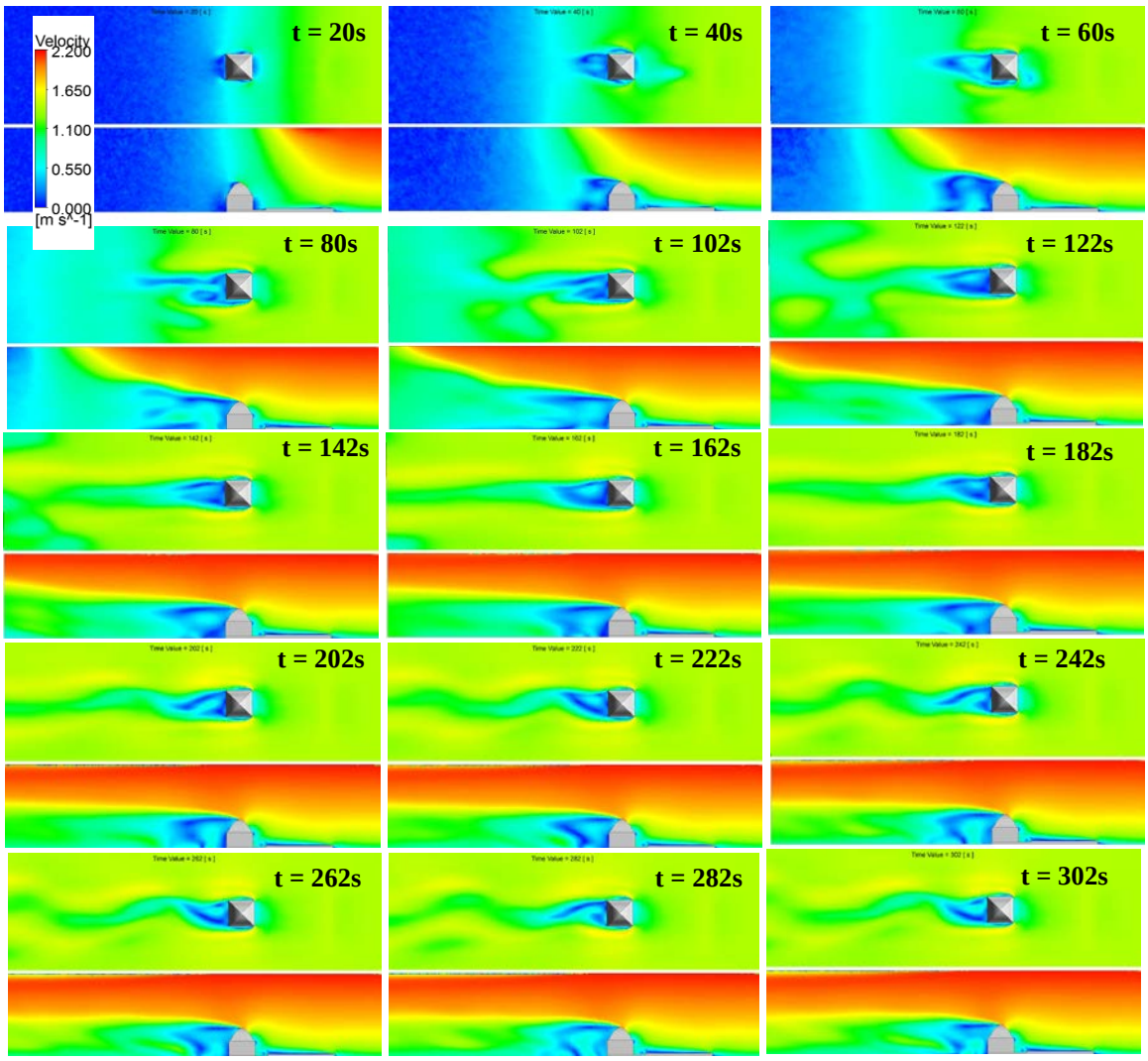


Figura 81 – Capela da Ceia – simulação do campo de velocidades externas, regime transiente, perfil de vento ASHRAE. Plano vertical no eixo longitudinal. Altura do plano horizontal: 3,4m.

Na simulação transiente com perfil de vento ASHRAE não se observou um ciclo de "enchimento / esvaziamento" da Capela, uma vez que a pressão interna não chegou a superar a externa, confirmando a análise expedita de ELIAS (2002, p. 73). Além de velocidades maiores no sentido descendente junto à porta (vide figuras 80 e 82), o que é compatível com os resultados de EVOLA e POPOV (2006), observa-se a formação de um vórtice de baixas velocidades junto à cúpula logo acima da porta de entrada, que se desloca ciclicamente para baixo, acompanhando as variações cíclicas do vórtice de Von Karman externo.

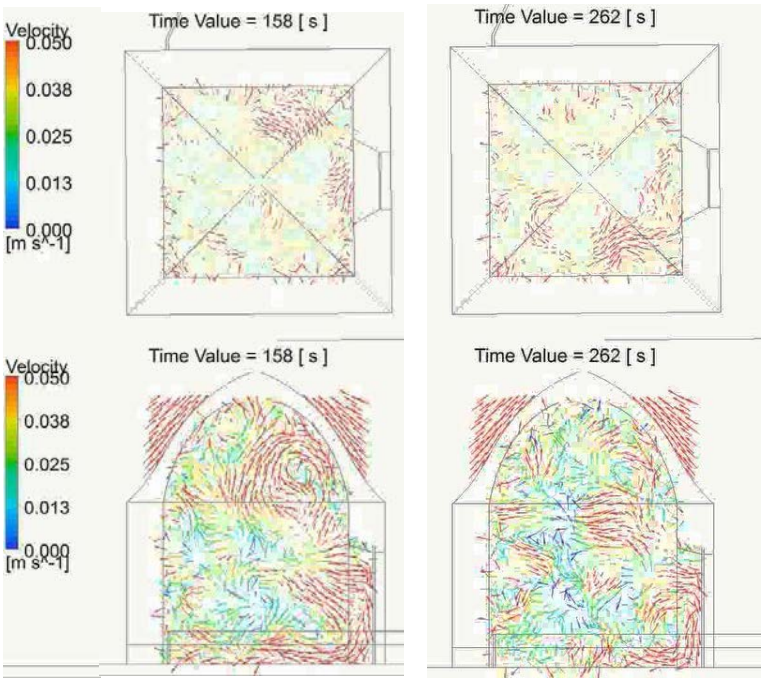


Figura 82 – Capela da Ceia – simulação do campo de velocidades internas, regime transiente, perfil de vento ASHRAE. Plano vertical no eixo longitudinal. Altura do plano horizontal = 3,4m.

Os resultados acima indicam como zonas potencialmente favoráveis à deposição de particulados e micro organismos sobre as esculturas, o fundo da Capela, próximo à escultura do Cristo, bem como as porções posteriores das paredes e cúpula. ALMEIDA (apud GABAS, 2008, p. 13) encontrou partículas de finos de mineração com diâmetro entre 18,5 e 25,1μm em minerações situadas na região metropolitana de São Paulo. ALMEIDA (1999, p. 117) relata diâmetros médios variando aproximadamente entre 17 e 20μm em mineração de grande porte e aproximadamente entre 22 e 24μm para mineração de pequeno porte. De acordo com as velocidades de deposição informadas por GABAS (2008) e NAZAROFF et al. (1993), e considerando uma ordem de grandeza de 20μm para o diâmetro de particulados potencialmente depositáveis na Capela, as velocidades do ar interno resultantes da simulação em regime permanente com perfil de vento ASHRAE seriam, em principio, suficientes para mantê-los em suspensão. Porém, tal situação não ocorre na prática, e os particulados acabam se depositando, em virtude dos períodos de calmaria. BERNARDI (2008, seção 4.3) discute como processos de deposição gravitacional atuam sobre partículas dessa ordem de grandeza.

Segundo informações dos funcionários do Santuário, a manutenção de limpeza expedita da Capela é feita semanalmente, e não se observou, ao longo do período de monitoramento em campo. um acúmulo excessivo de particulados. Contudo, o depósito cumulativo em fissuras ou em detalhes de difícil acesso nas esculturas pode contribuir para

aumentar os riscos de deterioração química nas superfícies. O mesmo se aplica às pinturas murais da Capela.

5.2.3.3. Perfil de vento corrigido por função polinomial / regime permanente

Após a obtenção dos perfis de velocidade no túnel de vento (vide seções 4.7.3 e 5.3.2) as condições de contorno das simulações fluidodinâmicas foram corrigidas com a inserção de um perfil de vento polinomial de 6ª ordem no plano de entrada, multiplicado pela velocidade de referência de 6m/s (vide seção 5.3) e com a alteração das propriedades do ar para reproduzir as condições observadas durante os ensaios no túnel de vento. Esse procedimento foi adotado com vistas à validação do modelo utilizado nas simulações fluidodinâmicas.

A Figura 83 mostra as linhas de corrente do escoamento em vista isométrica, obtidas na simulação em regime permanente utilizando o perfil de vento polinomial baseado nas medições realizadas em túnel de vento, e a Figura 84 mostra projeções ortogonais do campo de velocidades resultantes dessa simulação.

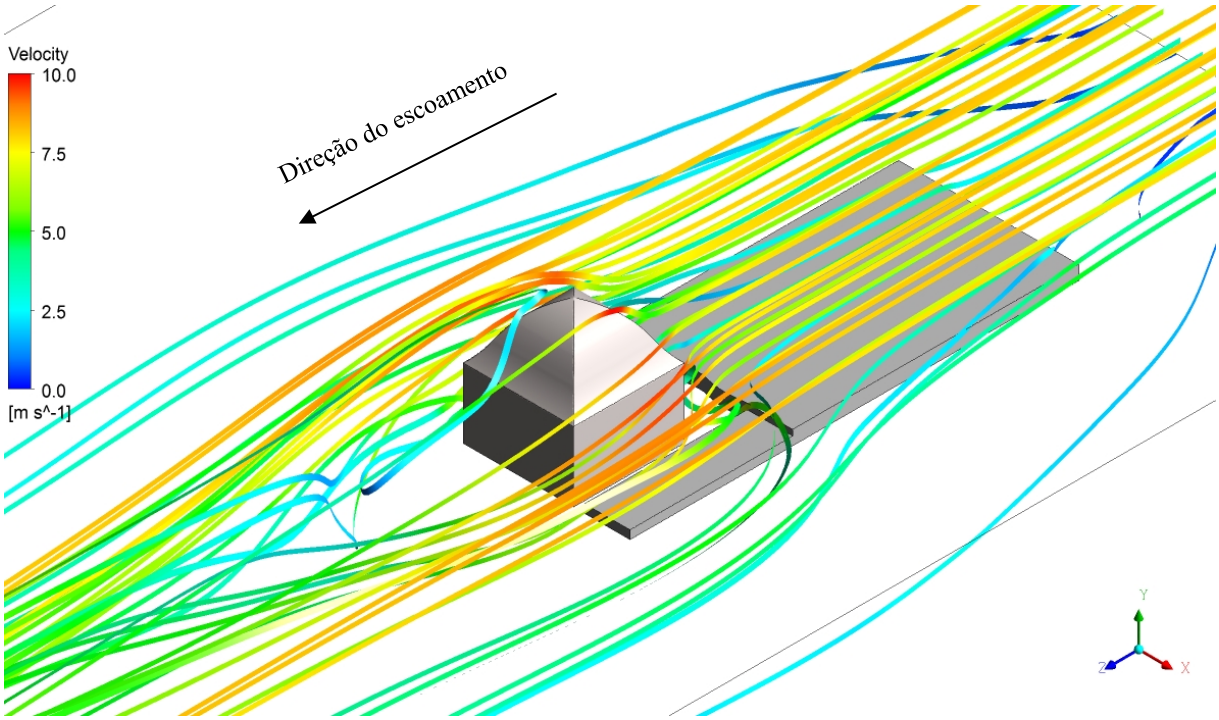


Figura 83 – Capela da Ceia – simulação das linhas de corrente externas, regime permanente, perfil de vento polinomial corrigido, vista isométrica.

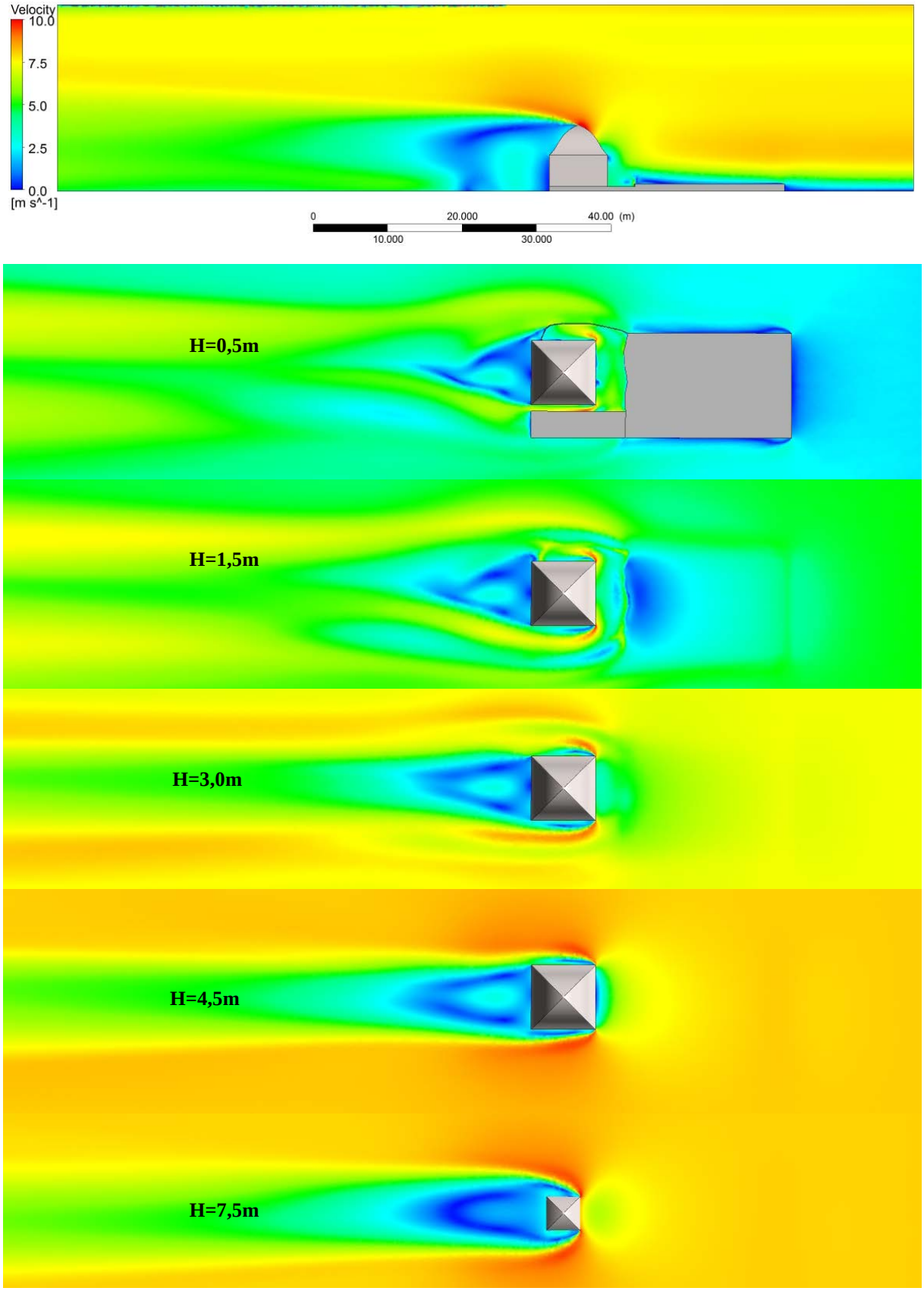


Figura 84 – Capela da Ceia – simulação do campo de velocidades externas, regime permanente, perfil de vento polinomial corrigido. Plano vertical no eixo longitudinal.

Cabe destacar que a velocidade de 6m/s foi adotada como referência em função do dos resultados obtidos no túnel de vento com relação ao descolamento do escoamento nas quinas vivas da maquete e estabilização dos coeficientes de pressão (vide seção 5.3). Essa velocidade, contudo, ocorre em Ouro Branco com uma frequência inferior a 8%, conforme resultados apresentados na seção 5.1.1.2.

Comparando as figuras 77, 78, 84 e 83, verifica-se que a simulação em regime permanente utilizando o perfil polinomial corrigido resulta em velocidades maiores em torno da Capela, decorrentes da velocidade de referência maior. Verifica-se também a compatibilidade, nas duas simulações, da zona de turbulência (esteira) formada a jusante do edifício, quanto ao tamanho e formação de vórtices.

A Figura 85 mostra os resultados da simulação do campo de coeficientes de pressão sobre as fachadas, em regime permanente, após a correção do perfil de vento na entrada por uma função polinomial. Foi mantida a mesma escala utilizada na Figura 79, para facilitar a comparação. Verifica-se que a distribuição dos coeficientes é compatível entre as duas simulações, observando-se, na Figura 85, um aumento dos módulos dos coeficientes, em cada ponto das fachadas, com relação à Figura 79, decorrente do aumento na velocidade de referência.

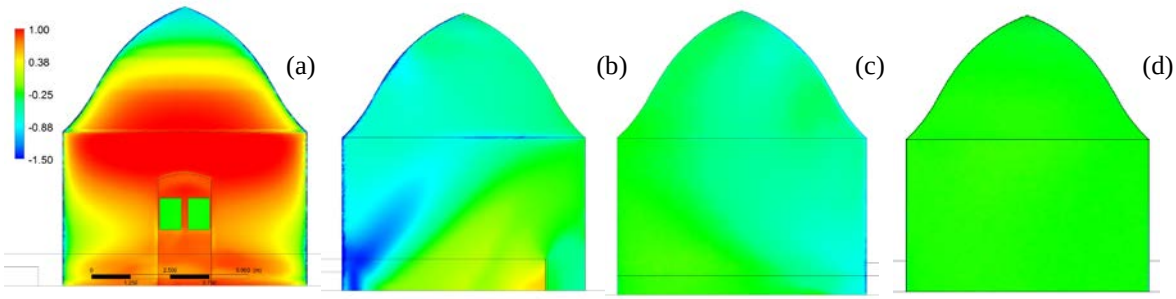


Figura 85 – Capela da Ceia – simulação dos coeficientes de pressão nas elevações, regime permanente, perfil de vento polinomial corrigido. a) sudeste; b) nordeste; c) sudoeste; d) noroeste.

A Figura 86 mostra os vetores de velocidade internos, obtidos na simulação em regime permanente, com perfil de vento polinomial corrigido. Comparado às figuras 80 e 82 , o padrão de linhas de corrente e vetores ilustrado na figura é mais estruturado, com as maiores velocidades ocorrendo junto à porta e às paredes, diminuindo progressivamente em direção ao centro da sala, onde se forma um vórtice.

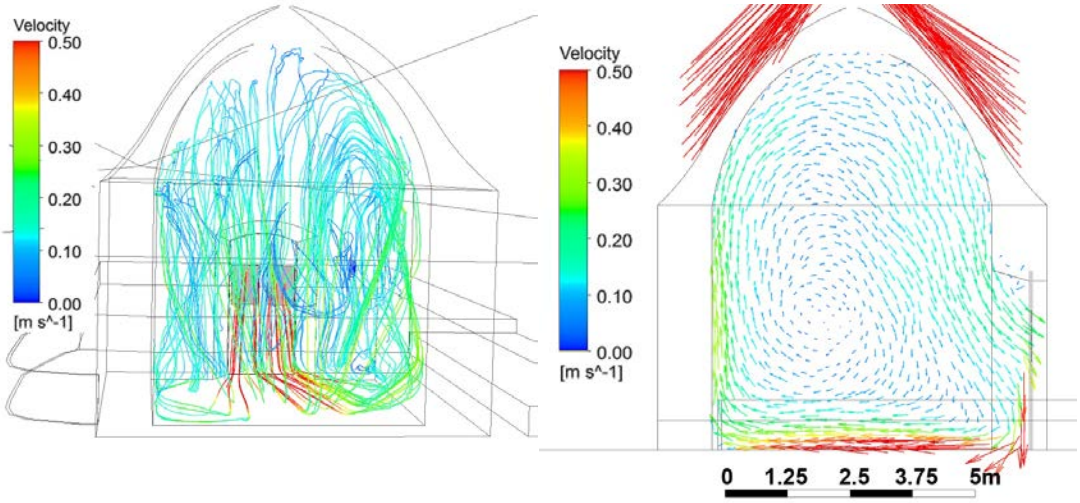


Figura 86 – Capela da Ceia – simulação das linhas de corrente (esquerda) e vetores de velocidade internos (direita), regime permanente, perfil de vento polinomial corrigido. Vista em perspectiva e em plano vertical no eixo longitudinal.

5.2.3.4. Perfil de vento corrigido por função polinomial / regime transiente

A Figura 87 mostra a variação temporal do campo de velocidades externas obtida na simulação em regime transiente com o perfil de vento polinomial.

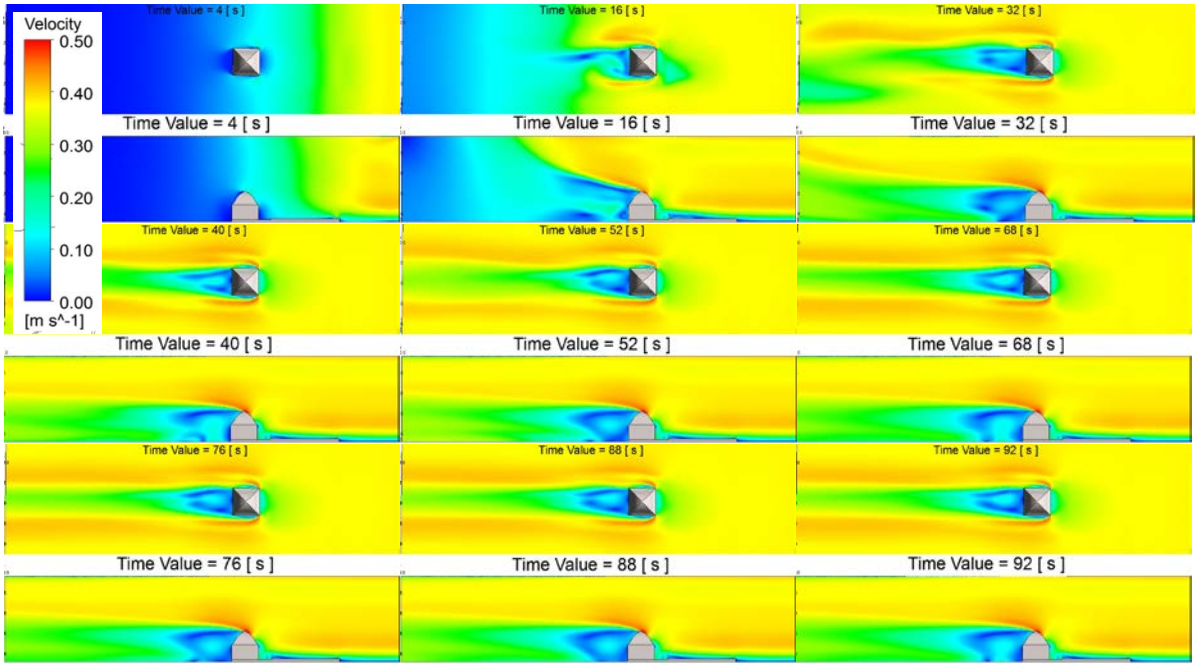


Figura 87 – Capela da Ceia – simulação do campo de velocidades externas, regime transiente, perfil de vento polinomial corrigido. Plano vertical no eixo longitudinal. Altura do plano horizontal: 3,4m.

Verificou-se que a formação da esteira de Von Karman a jusante da Capela ocorre mais discretamente, em relação aos resultados da simulação transiente com o perfil de vento ASHRAE, sendo os ciclos mais facilmente observados no plano vertical longitudinal.

Assim como na simulação transiente com perfil de vento ASHRAE, durante o período de 350s simulado, a pressão interna não supera a pressão externa. O vórtice central mostrado na Figura 86 permaneceu sem se deslocar.

Por meio dos métodos e resultados acima apresentados, verificou-se o potencial e aplicabilidade das simulações computacionais fluidodinâmicas à conservação preventiva de coleções. Não obstante, deve-se ressaltar que o seu uso demanda um alto investimento em recursos computacionais em termos de máquinas e programas, principalmente se envolver simulações de malhas complexas, como a que foi simulada neste trabalho. Utilizando um computador com processador *Intel I7* © e 10GB de RAM, cada simulação fluidodinâmica em regime permanente com 200 iterações demorou cerca de três dias e as simulações transientes, com 350 iterações de 7 *loops*, entre sete e dez dias. Para cada passo de tempo simulado, o arquivo de saída ocupou cerca de 6GB em disco rígido, sendo que o conjunto dos arquivos das simulações ocupou mais de 1,5TB em disco rígido.

Outro aspecto a considerar é a necessidade da capacitação técnica específica para o uso das ferramentas de simulação fluidodinâmica, determinando a sua caracterização, na aplicação à conservação preventiva de coleções, como ferramenta de pesquisa acadêmica e desenvolvimento tecnológico, e extrapolando o uso cotidiano por parte dos conservadores restauradores. Conforme se discutiu anteriormente, tal aplicação ocorre em um âmbito transdisciplinar, entre as várias áreas de conhecimento envolvidas. Como conhecimentos básicos necessários a compreensão dos impactos da ventilação natural sobre a preservação de coleções, indica-se os modelos analíticos simplificados e exemplos comentados no **Apêndice C**.

5.3- Resultados de validação das simulações fluidodinâmicas por meio de ensaios em túnel de vento

5.3.1- Medições de pressão

A Tabela 12 compara os coeficientes de pressão obtidos nas medições de pressão realizadas no túnel de vento com os coeficientes obtidos na simulação em regime permanente e perfil de vento polinomial no programa *Ansys CFX* ©. A Figura 88 mostra graficamente a variação dos coeficientes de pressão indicados na Tabela 12, em função da velocidade de referência no centro da seção do túnel de vento:

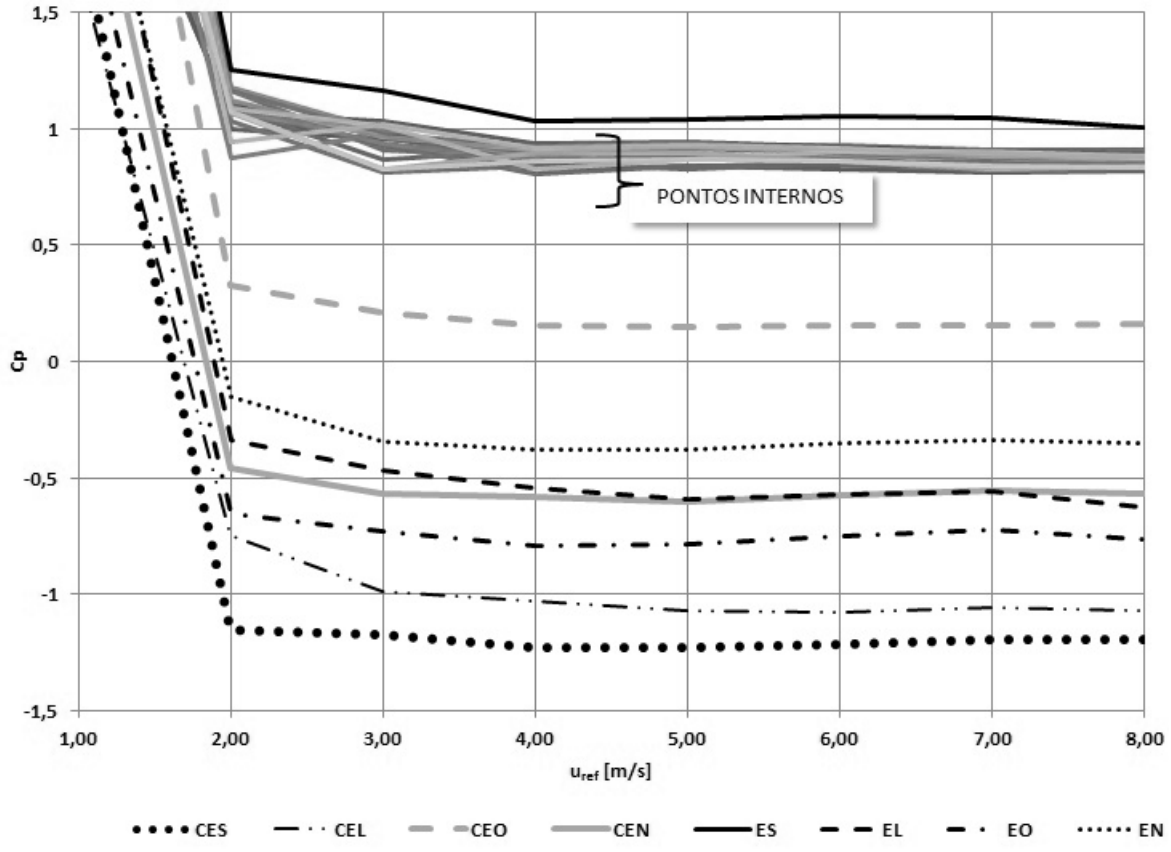


Figura 88 – Ensaio em túnel de vento – u_{ref} x C_p.

Verifica-se que acima de 4m/s a taxa de variação de C_p com a velocidade aproxima-se de zero. Observou-se também, por meio dos pedaços de linhas de costura fixados na maquete, que acima dessa velocidade o escoamento começa a se descolar das fachadas laterais. Com base nessas evidências, adotou-se como velocidade de referência para obtenção de perfis de velocidade na maquete, o valor de 6m/s, medido no centro da seção de ensaio, posicionando-se o anemômetro 15cm a montante da borda de ataque.

Tabela 12 – Resultados das medições de pressão em túnel de vento

Ponto/ variável	Orient.	u_{ref} (m/s) 1	2	3	4	5	6	7	8	Média	Cp *CFX*	Erro absoluto
Ti (ºC)		21,1	21,2	21,7	22,1	22,0	22,0	18,8	19,3	**21,0**		
p (Pa)		93200	93160	93100	93100	93100	93400	93500	93420	**93247**		
ρ (kg/m3)		1,1036	1,1027	1,1000	1,0987	1,0990	1,1026	1,1159	1,1130	**1,1044**		
Cp túnel												
IS	SE	3,7392	1,0014	0,9557	0,9091	0,9215	0,9144	0,8960	0,8972	0,9076	0,8814	-0,026
ISL	SE	2,6098	1,0651	0,9285	0,8293	0,8372	0,8274	0,8091	0,8224	0,8251	0,8814	0,056
ISO	SO	2,4819	1,1627	0,9109	0,8761	0,9297	0,9275	0,9113	0,9089	0,9107	0,8814	-0,029
IL1	NE	2,6005	1,0639	1,0342	0,9365	0,9403	0,9234	0,9000	0,8920	0,9184	0,8816	-0,037
IL2	NE	3,4038	1,0906	0,8675	0,9073	0,9290	0,8962	0,8652	0,8762	0,8948	0,8812	-0,014
IL3	NE	3,6814	1,1012	0,9804	0,8947	0,8960	0,8680	0,8398	0,8448	0,8687	0,8811	0,012
IL4	NE	3,8730	1,0292	0,8104	0,8418	0,8717	0,8459	0,8192	0,8287	0,8415	0,8811	0,040
IL5	NE	3,4906	1,1121	0,9608	0,8553	0,8272	0,8533	0,8525	0,8317	0,8440	0,8811	0,037
IO1	SO	3,8103	1,1756	0,9914	0,8764	0,8698	0,8819	0,8737	0,8372	0,8678	0,8814	0,014
IO2	SO	4,4168	1,0869	0,9327	0,8075	0,8422	0,8466	0,8351	0,8386	0,8340	0,8811	0,047
IO3	SO	4,5062	1,1626	0,9744	0,9244	0,9376	0,9149	0,8887	0,8933	0,9118	0,8803	-0,031
IO5	SO	4,4659	1,0689	0,9752	0,8968	0,9122	0,8978	0,8760	0,8755	0,8917	0,8824	-0,009
IN1	NO	3,5621	0,8734	0,9759	0,9081	0,9331	0,9077	0,8801	0,8770	0,9012	0,8811	-0,020
IN2	NO	4,0803	1,1192	0,9630	0,9058	0,9192	0,9036	0,8811	0,8697	0,8959	0,8814	-0,014
IN3	NO	3,5713	1,0958	0,9372	0,8676	0,8841	0,8680	0,8458	0,8541	0,8639	0,8827	0,019
CES	SE	1,8826	-1,1522	-1,1760	-1,2275	-1,2289	-1,2174	-1,1919	-1,1909	-1,2113	0,3894	**1,601**
CEL	NE	1,7046	-0,7447	-0,9886	-1,0273	-1,0673	-1,0737	-1,0595	-1,0667	-1,0589	-0,5302	**0,529**
CEO	SO	3,7467	0,3262	0,2128	0,1561	0,1458	0,1522	0,1530	0,1626	0,1540	-0,6461	**-0,800**
CEN	NO	2,4258	-0,4551	-0,5660	-0,5812	-0,6015	-0,5747	-0,5519	-0,5697	-0,5758	-0,3636	**0,212**
CIS	SE	3,8728	1,0855	1,0110	0,8236	0,8680	0,9001	0,9017	0,8839	0,8755	0,8816	0,006
CIL	NE	3,9871	1,0690	0,8294	0,8924	0,8960	0,8596	0,8274	0,8414	0,8633	0,8816	0,018
CIO	SO	3,8795	0,9449	1,0221	0,9188	0,9260	0,9135	0,8923	0,8771	0,9056	0,8819	-0,024
CIN	NO	3,5407	1,0718	0,8246	0,8611	0,8689	0,8607	0,8426	0,8331	0,8533	0,8819	0,029
ES	SE	4,4964	1,2561	1,1651	1,0319	1,0389	1,0547	1,0456	1,0037	1,0350	1,1719	**0,137**
EL	NE	2,6860	-0,3354	-0,4687	-0,5425	-0,5889	-0,5738	-0,5569	-0,6244	-0,5773	-0,2173	**0,360**
EO	SO	2,0803	-0,6512	-0,7301	-0,7921	-0,7812	-0,7512	-0,7240	-0,7629	-0,7623	-0,6427	**0,120**
EN	NO	2,5826	-0,1530	-0,3440	-0,3799	-0,3778	-0,3539	-0,3361	-0,3531	-0,3601	-0,2291	**0,131**

Notação: E = externo; I = interno; C = Cúpula. O Cp médio foi calculado considerando u_{ref} > 4m/s.

Os resultados acima se encontram em conformidade com a teoria descrita na metodologia (vide seção 4.7.1) e são compatíveis com resultados de um experimento similar apresentados por ETHERIDGE (2012, p. 310). Os maiores erros absolutos **médios** foram observados nas superfícies externas, localizados na cúpula (0,38) e, em segundo lugar, nas fachadas (0,18). Conforme discutido na seção 4.9.4, tais erros estão associados, dentre outros fatores, a diferenças geométricas entre a maquete física e o modelo tridimensional simulado no programa *Ansys CFX* ©, principalmente no caso da cúpula. Cabe lembrar também as fontes de erro relacionadas à malha de simulação e ao modelamento de fenômenos físicos

como turbulência e convecção. Já para os pontos internos, o erro absoluto médio observado foi 0,0038, variando de -0,036 a 0,056.

5.3.2- Medições de perfis de velocidade do vento

A Tabela 13 mostra as velocidades (médias aritméticas de 60 medições de 1/1s) medidas nas posições 1 e 2 mostradas na Figura 35, com $\mathbf{u_{ref}}$ = 6 m/s, no centro da seção de ensaio. Para comparar com $\mathbf{u/u_{ref}}$ no programa *Ansys CFX* © foi considerada como $\mathbf{u_{ref}}$ a velocidade média no ponto do domínio de simulação correspondente ao centro da seção do túnel de vento. Os dados são mostrados graficamente na Figura 89.

Tabela 13 – Comparação entre perfis de velocidade do vento medidos no túnel de vento e perfil simulado no programa *Ansys CFX* © em regime permanente

Altura (m na escala 1:33)	**u/u_{ref} média posição 1**	**u/u_{ref} média posição 2**	**u/u_{ref} *CFX***	**Erro absoluto (CFX-posição 2)**
0,5	0,3799	0,3790	0,0099	-0,3691
1	0,5734	0,5606	0,1929	-0,3678
2	1,0460	0,6992	0,6822	-0,0169
3	1,0838	0,7945	0,9232	0,1287
4	1,0692	0,9044	1,0037	0,0993
5	1,0691	0,9806	1,0313	0,0507
6	1,0661	1,0154	1,0475	0,0320
7	1,0607	1,0164	1,0576	0,0412
8	1,0538	1,0415	1,0648	0,0233
9	1,0550	1,0837	1,0715	-0,0122
10	1,0455	1,0768	1,0801	0,0033
11	1,0483	1,0883	1,0905	0,0023
12	1,0474	1,0955	1,0959	0,0004
13	1,0463	1,1046	1,1079	0,0032
14	1,0443	1,1035	1,1113	0,0078
15	1,0579	1,1271	1,1102	-0,0169
16	1,0487	1,1260	1,1037	-0,0224
17	1,0450	1,1355	1,0933	-0,0421
18	1,0478	1,1378	1,0805	-0,0573
19	1,0475	1,1371	1,0697	-0,0674
20	1,0527	1,1287	1,0653	-0,0634

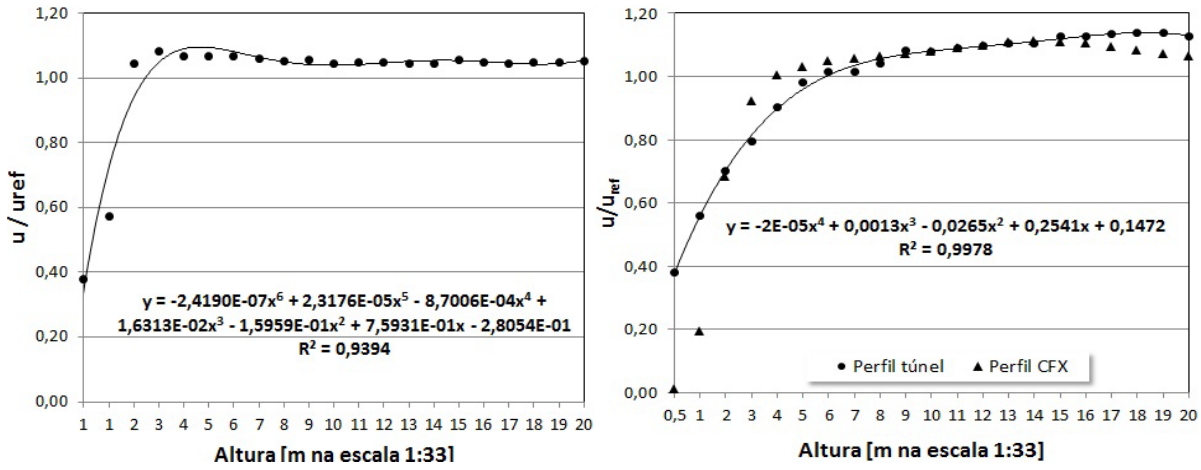


Figura 89 – Ensaio em túnel de vento - perfis de velocidade medidos sobre o eixo longitudinal da maquete. Posição 1: 126,5cm da fachada frontal (esquerda); posição 2: 13,2cm da fachada frontal comparado ao perfil obtido na simulação em regime permanente com perfil de entrada corrigido (direita).

Utilizando a ferramenta de linha de tendência do *Microsoft Excel 2010* © foram obtidos polinômios que se ajustaram aos dados com R^2 superior a 0,93. O perfil obtido na posição 1 foi utilizado para corrigir o perfil no plano de entrada do domínio das simulações fluidodinâmicas, nas quais havia sido utilizado inicialmente o perfil de vento da ASHRAE. O termo constante (-0,2805) foi suprimido para eliminar velocidades negativas no plano de entrada do domínio de simulação.

Após a correção do perfil de vento na entrada, foi repetida a simulação fluidodinâmica em regime permanente, obtendo-se os resultados indicados na Tabela 13 e na Figura 89. O erro absoluto médio observado entre o perfil simulado e o perfil medido na posição 2 no túnel de vento foi de 1,5%. Juntamente com os resultados apresentados acima para os coeficientes de pressão, tais evidências permitem afirmar que a simulação fluidodinâmica produziu resultados confiáveis.

5.3.3- Velocimetria por imageamento de partículas (PIV)

A Figura 90 apresenta campos de velocidades na porção do escoamento a jusante da Capela, obtidas conforme metodologia descrita na seção 4.7.4, com $\mathbf{u_{ref}}$ = 6m/s. Apesar da natureza transiente do escoamento, foi possível verificar a direção predominante na região de recirculação dentro da esteira formada a jusante da Capela.

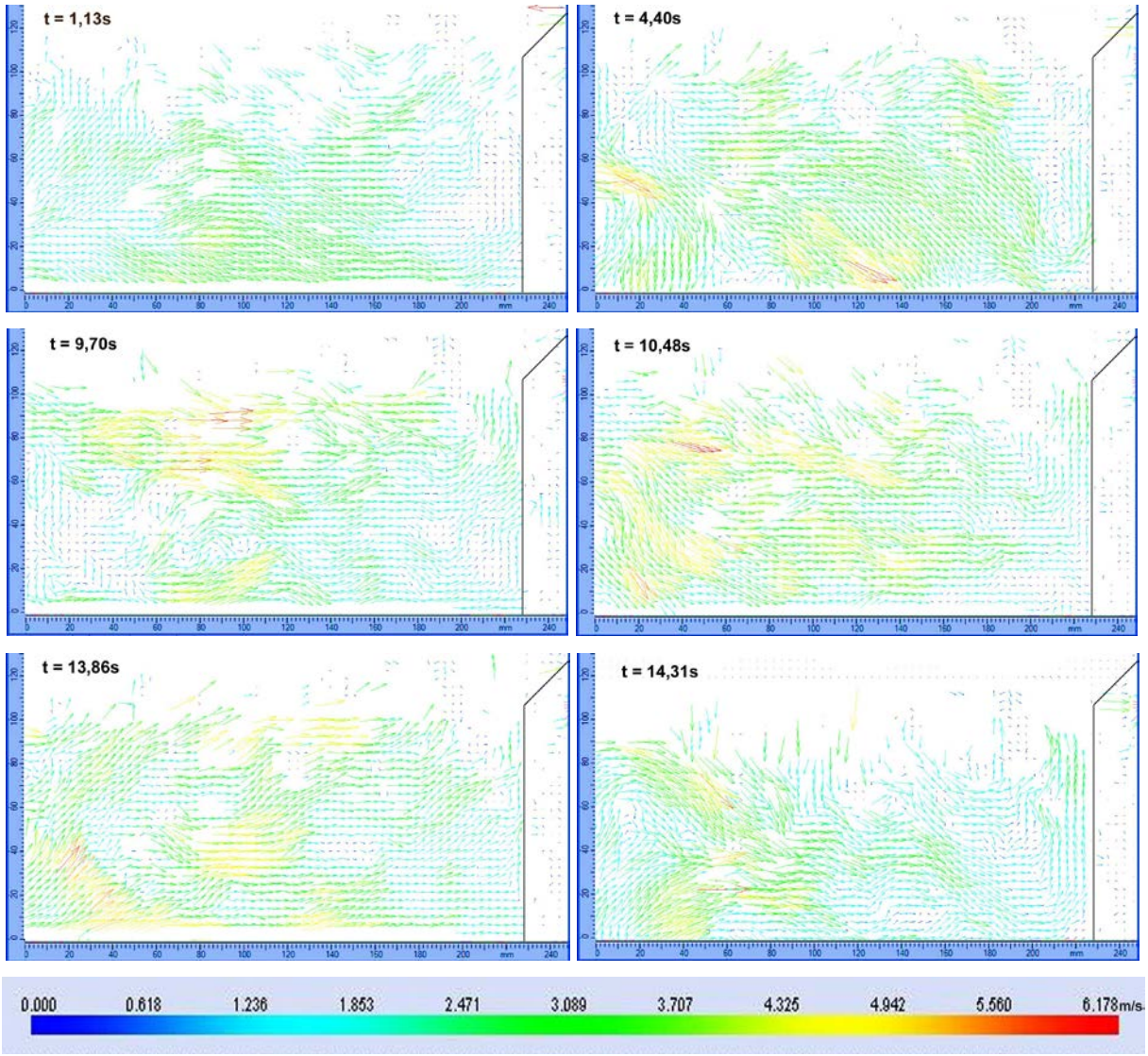


Figura 90 – Ensaio em túnel de vento - campos de velocidade obtidos por meio da técnica PIV. Escala 1:1 em mm medidos na maquete física. A direção do escoamento no túnel é da direita para a esquerda, podendo se verificar a zona de recirculação a jusante da Capela.

A Figura 91 mostra o campo de velocidades na mesma região da Figura 90, obtido na simulação fluidodinâmica em regime permanente com o perfil de vento polinomial, multiplicado pela mesma velocidade de referência.

Observa-se que, em ambas as figuras, os módulos médios das velocidades apresentam a mesma ordem de grandeza – entre 1,5 e 3,5m/s – com presença de valores um pouco mais elevados – entre 4,0 e 4,5m/s na Figura 90. O mesmo se pode observar com relação às velocidades próximas à parede da maquete, que resultaram um pouco menores na simulação computacional. Tais diferenças podem estar relacionadas às fontes de erro discutidas nas seções 4.9.4 e 5.3.1.

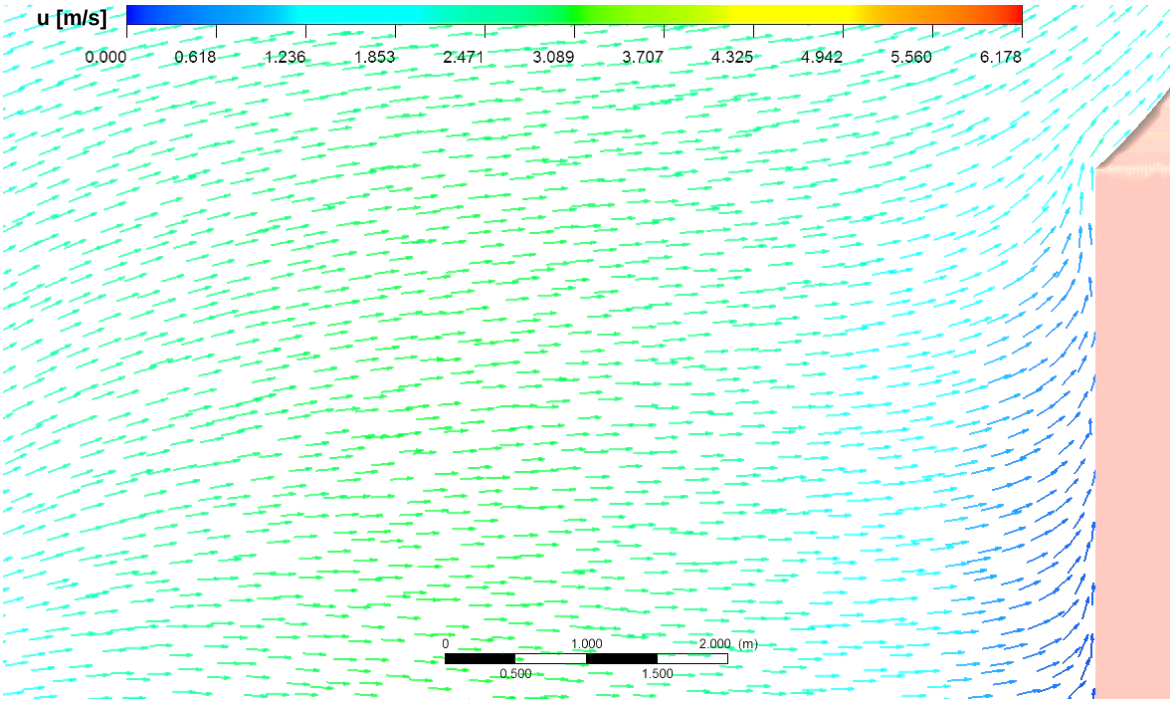


Figura 91 – Capela da Ceia - detalhe do campo de velocidades obtido na simulação em regime permanente com perfil de vento polinomial corrigido. Escala 1:1 em [m]. Plano vertical no eixo longitudinal.

Os resultados apresentados acima foram considerados razoáveis para corroborar na validação do modelo utilizado nas simulações fluidodinâmicas.

5.4- Métricas de preservação

5.4.1- Métricas derivadas do monitoramento ambiental

5.4.1.1. Índices de desempenho

a. Ciclos de flutuação de temperatura e umidade relativa

As figuras 92, 93 e 94 apresentam as flutuações na temperatura interna média, em base horária, diária e semanal, respectivamente:

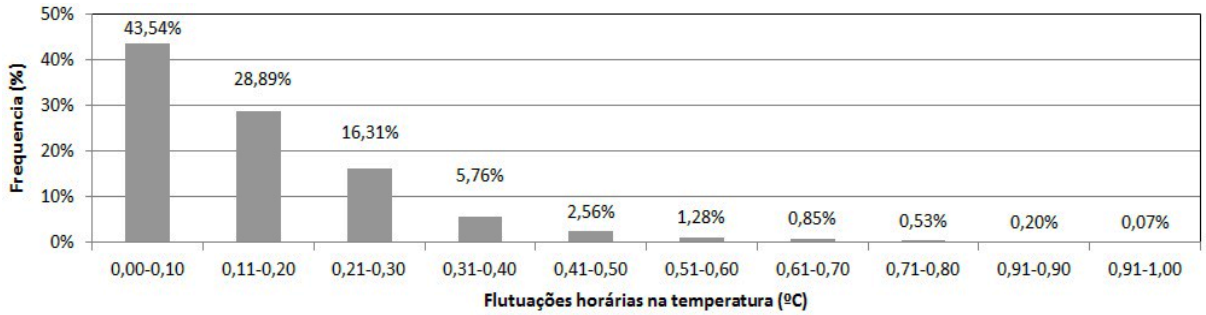


Figura 92 – Capela da Ceia – histograma de flutuações nas médias horárias de T_i monitorada.

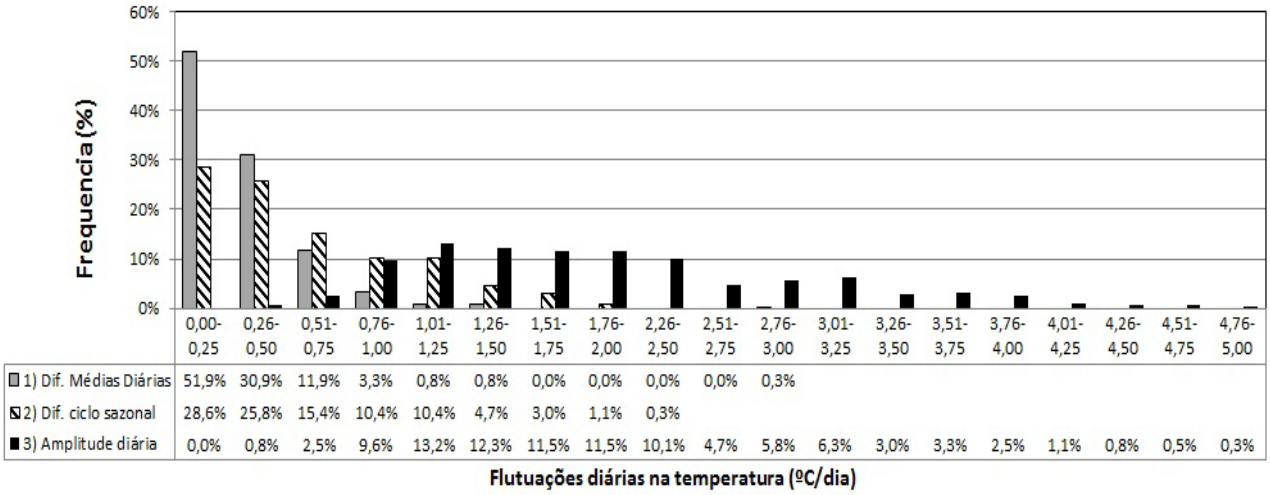


Figura 93 – Capela da Ceia – histograma de flutuações diárias na T_{imed} monitorada.

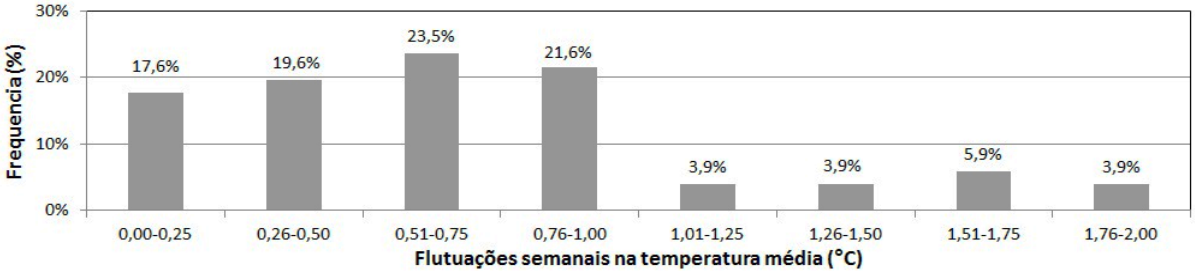


Figura 94 – Capela da Ceia – histograma de flutuações semanais na GT_i semanal monitorada.

As flutuações diárias na temperatura cuja frequência é mostrada nos histogramas da Figura 93 foram calculadas por três métodos diferentes: (i) Diferença entre médias diárias consecutivas; (ii) Diferença entre a média diária e o ciclo sazonal (***média móvel***[122] central de 30 dias, 15 anteriores e 15 posteriores), conforme indicação da norma EN 15757 (UNI, 2012); (iii) Amplitude diária (diferença entre máxima e mínima diária).

A Tabela 14 compila as faixas de flutuações de temperatura consideradas “seguras” e “admissíveis” para prevenir danos físico-mecânicos, segundo a metodologia Camuffo-Pagan, com as flutuações diárias de temperatura calculadas pelos três métodos descritos acima. A última coluna indica percentualmente o número de ocorrências em que cada limite seguro de flutuação de temperatura foi atendido na Capela da Ceia, no período monitorado, tomado como índice de desempenho. A Tabela 14 compara ainda os índices calculados de acordo com os limites de flutuação prescritos pela ASHRAE (vide Quadro 2) e pelas normas técnicas

[122] Para maiores detalhes sobre as estatísticas descritivas apropriadas ao tratamento de dados no gerenciamento ambiental de coleções, vide MARTENS (2012, p. 62).

UNI 10829 (UNI, 1999; LA GENNUSA et al., 2008) e UNI 10969 (UNI, 2002; CAMUFFO et. al., 2004b).

Tabela 14 – Capela da Ceia – comparação entre índices de desempenho quanto às flutuações diárias de *T*

Método de cálculo / Norma	**Faixa de flutuação diária segura [ºC/dia] (moda)**	**Frequência da moda [%]**	**Faixa de flutuação admissível [ºC/dia] / ajuste sazonal admissível em torno do *set point* [ºC] (moda x 2)**	**Índice de desempenho (%) / Método de cálculo**		
				1	**2**	**3**
Flutuações diárias em *T* Metodologia Camuffo-Pagan						
1.Diferença entre médias diárias consecutivas	0 - 0,25	51,9	0 - 0,5	51,9	-	-
2.Diferença entre T_{imed} e ciclo sazonal	0 - 0,5	29,8; 25,1	0 - 1,0	-	54,4	-
3.Amplitudes diárias	0 – 2,5	9,6; 13,2; 12,3; 11,5; 10,1	0 – 5,0	-	-	76,4
Faixas Prescritas						
ASHRAE classe AA	0-2,0	-	±5	99,5	99,5	61,5
ASHRAE classe A	0-2,0	-	+5 ou -10	99,7	99,7	61,5
ASHRAE classe B	0-5,0	-	+10	100,0	100,0	100,0
ASHRAE classe C	-	-	*T*<25 (30)	100,0	100,0	100,0
UNI 10829	0-1,5	-		99,7	95,6	38,5
UNI 10969	0-3,2	-		100,0	100,0	90,9
Limite adotado neste trabalho	***T<25***			**100,0**	**100,0**	**100,0**

Verifica-se que os limites de flutuação admissível calculados pelos métodos 1 ou 2, respectivamente 0,5 e 1,0ºC, seriam ainda mais restritivos se comparados com os limites prescritos pela ASHRAE e pelo UNI, cuja faixa já é relativamente estreita. ERHARDT et al. (1996, p. 905) alertam para essa possibilidade. Já os limites calculados pelo método 3 (amplitudes diárias) são compatíveis com os da classe B proposta pela ASHRAE.

Avaliando-se somente as flutuações diárias **de temperatura** pelos métodos 1 ou 2 escritos, a Capela da Ceia poderia ser classificada na classe AA ou A no sistema de ranqueamento da ASHRAE. Utilizando o método 3, ela seria classificada 61,5% do tempo nas classes AA ou A e o restante do tempo na classe B. Esse resultado deve-se provavelmente à grande inércia térmica das envoltórias da Capela, que diminui a amplitude de flutuação interna da temperatura.

Constata-se ainda que a Capela atende razoavelmente aos requisitos das normas UNI 10829 e UNI 10969, exceto para a primeira, quando o calculo das flutuações é feito pelas amplitudes diárias (método 3). Neste caso, as flutuações ficaram abaixo de 1,5ºC somente em

38,5% dos dias, durante o período monitorado, o que pode também ser constatado inspecionando-se o histograma da Figura 93.

As figuras 95, 96, e 97 apresentam respectivamente os histogramas de flutuações horárias, diárias e semanais para a umidade relativa. As flutuações diárias de *UR* foram calculadas utilizando os mesmos três métodos usados para a temperatura.

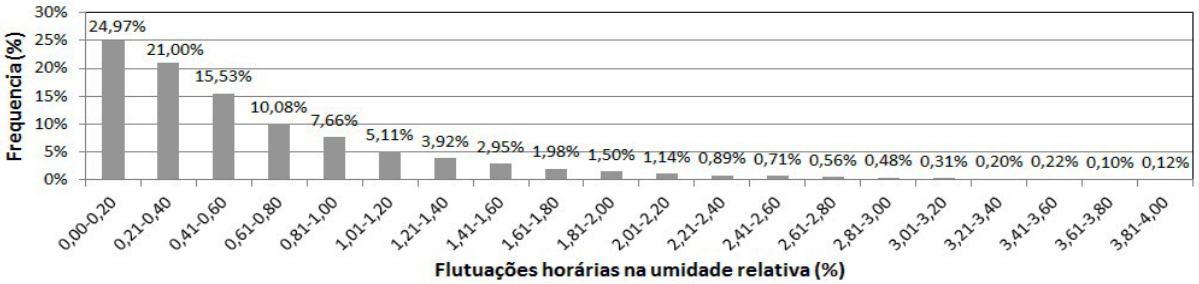
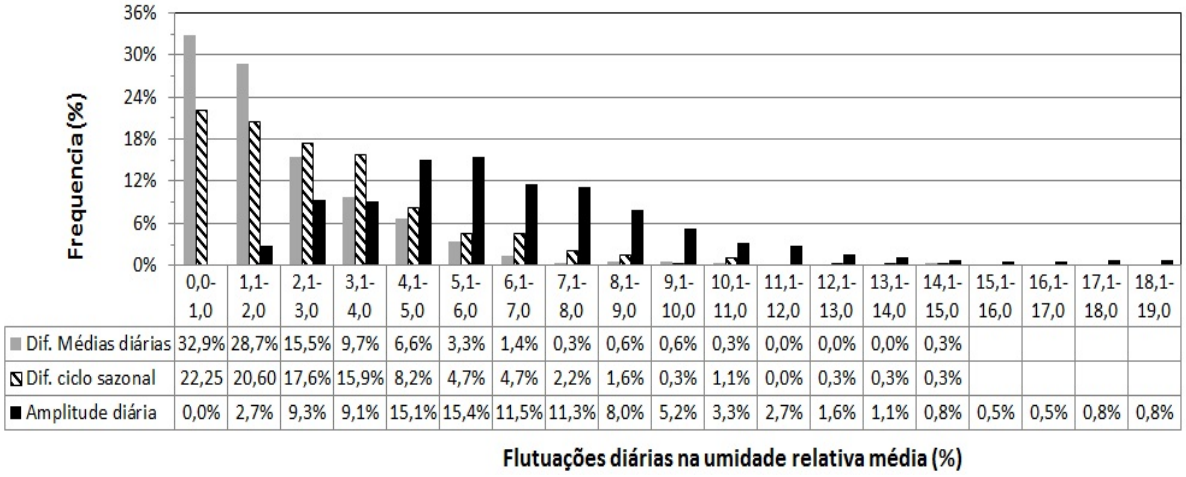


Figura 95 – Capela da Ceia – histograma de flutuações nas médias horárias de UR_i monitorada.



	0,0-1,0	1,1-2,0	2,1-3,0	3,1-4,0	4,1-5,0	5,1-6,0	6,1-7,0	7,1-8,0	8,1-9,0	9,1-10,0	10,1-11,0	11,1-12,0	12,1-13,0	13,1-14,0	14,1-15,0	15,1-16,0	16,1-17,0	17,1-18,0	18,1-19,0
Dif. Médias diárias	32,9%	28,7%	15,5%	9,7%	6,6%	3,3%	1,4%	0,3%	0,6%	0,6%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%				
Dif. ciclo sazonal	22,25	20,60	17,6%	15,9%	8,2%	4,7%	4,7%	2,2%	1,6%	0,3%	1,1%	0,0%	0,3%	0,3%	0,3%				
Amplitude diária	0,0%	2,7%	9,3%	9,1%	15,1%	15,4%	11,5%	11,3%	8,0%	5,2%	3,3%	2,7%	1,6%	1,1%	0,8%	0,5%	0,5%	0,8%	0,8%

Figura 96 – Capela da Ceia – histograma de flutuações diárias na UR_{imed} monitorada.

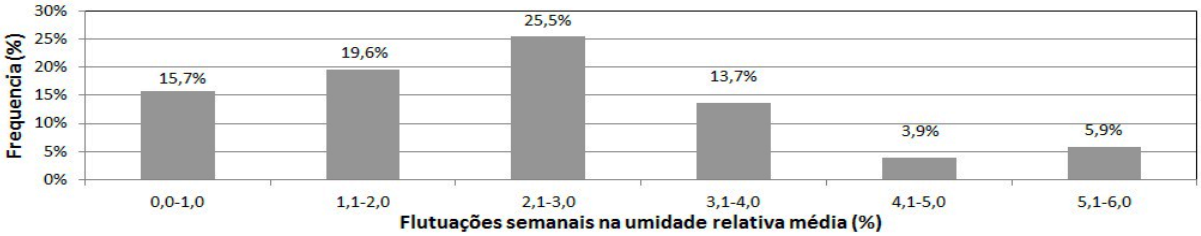


Figura 97 – Capela da Ceia – histogramas de flutuações semanais na GUR_i semanal monitorada.

Os histogramas dos ciclos de flutuação de umidade relativa mostram que, apesar do contato direto com o ambiente externo através dos furos na porta da capela, as superfícies internas provocam um efeito de tamponamento, reduzindo internamente a amplitude de flutuação da *UR* externa, o que se deve, dentre outros fatores, como o potencial de adsorção dos materiais internos, ao grande isolamento e inércia térmica das envoltórias.

Os histogramas de ciclos de flutuações diárias na *UR* (Figura 96) são analisados a seguir, à luz das mesmas metodologias e referências citadas anteriormente para a temperatura, resultando nos valores compilados na Tabela 15.

Tabela 15 – Capela da Ceia – comparação entre índices de desempenho quanto às flutuações diárias de *UR*

Método de cálculo / Norma	**Faixa flutuação diária segura [%/dia] (moda)**	**Frequência da moda [%]**	**Faixa de flutuação admissível [%/dia] / ajuste sazonal admissível em torno do *set point* [%] (moda x 2)**	**Índice de desempenho [%] / Método de cálculo**		
				1	**2**	**3**
Metodologia Camuffo-Pagan						
1.Diferença entre médias diárias consecutivas	0 – 2,0	32,9; 28,7	0 – 4,0	61,6	-	-
2.Diferença entre UR_{imed} e ciclo sazonal	0 – 2,0	22,4; 20,7	0 – 4,0	-	43,0	-
3.Amplitudes diárias	0 - 6,0	15,2;15,5	0 – 12,0	-	-	51,7
Faixas Prescritas						
ASHRAE classe AA	0-5,0	-	0	26,0	24,5	5,0
ASHRAE classe A 1	0-5,0	-	±10,0	58,3	54,4	17,6
ASHRAE classe A 2	0-10,0	-	0	28,7	29,1	24,2
ASHRAE classe B	0-10,0	-	±10,0	55,5	62,6	55,2
ASHRAE classe C	-	-	25,0 <*UR*<75,0	52,8	52,8	52,8
ASHRAE classe D	-	-	*UR*<75,0	53,3	53,3	53,3
UNI 10829	0-2,0	-		61,6	43,1	2,8
UNI 10969	0-4,0	-		86,7	76,8	21,3
Martens 2012		-	±15,0	100,0	99,7	96,3

O limite de flutuação admissível de até 4%/dia indicado pela metodologia Camuffo-Pagan para as flutuações diárias calculadas pelos métodos 1 e/ou 2 é o mesmo que propõe a norma UNI 10969 e é compatível com o limite das classes AA/A prescrito pela ASHRAE (5%/dia).

Observa-se que em termos da flutuações diárias de *UR*, a Capela não poderia ser classificada nas classes AA ou A2 da ASHRAE, atendendo aos requisitos da classe A1 apenas parcialmente, com as flutuações diárias calculadas pelos métodos 1 e 2. A Capela atenderia aos requisitos das classes B, C e D da ASHRAE aproximadamente entre 50 e 60% do tempo.

Esse desempenho pode ser considerado fraco, principalmente quanto ao limite de prevenção de mofo (75%), como também se pode averiguar graficamente pela Figura 59. Cerca de metade das ocorrências de UR_i estão abaixo deste limite, indicando que a Capela pode ser classificada na classe D, mas atendendo aos requisitos desta classe apenas parcialmente.

Ressalta-se, portanto, a necessidade da atenção criteriosa na interpretação do Quadro 2, para que não se extraia uma classificação equivocada dos ambientes.

As figuras 98, 99 e 100 mostram as dispersões das flutuações diárias em T_{imed} e UR_{imed} monitoradas na Capela, para os três métodos de cálculo acima discutidos. As áreas demarcadas correspondem aos limites seguros e aos limites admissíveis (estendidos), de acordo com as metodologias aplicadas conforme resultados e discussões acima.

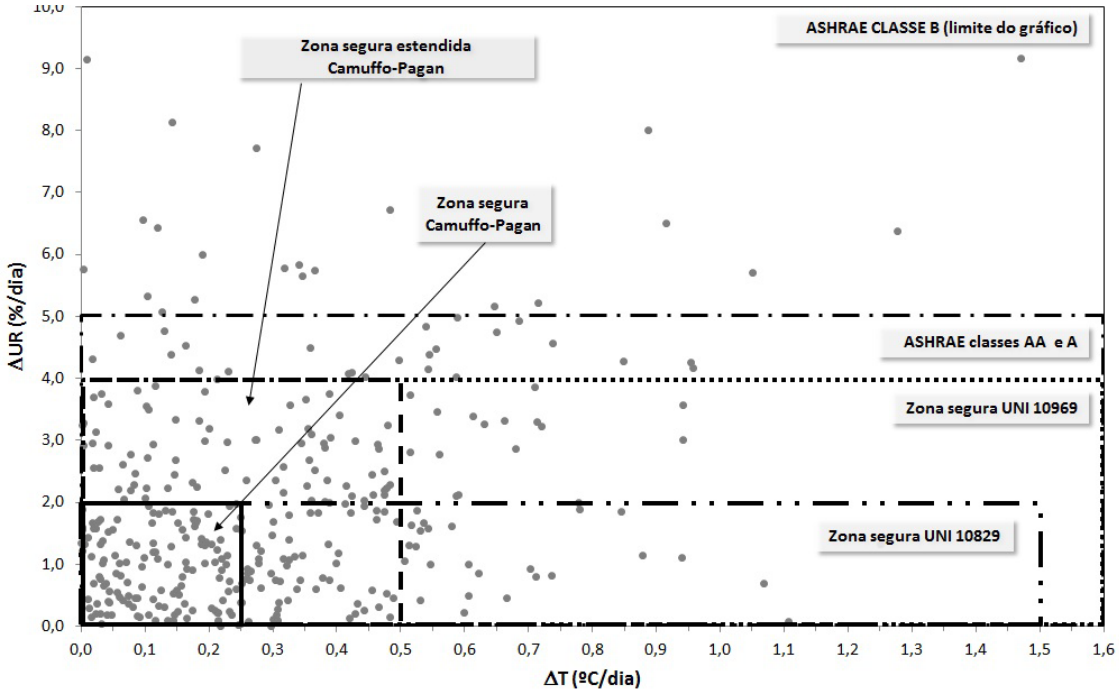


Figura 98 – Capela da Ceia – diagrama de dispersão de flutuações diárias de T_{imed} *versus* flutuações diárias de UR_{imed} (método 1 – diferença entre médias diárias consecutivas).

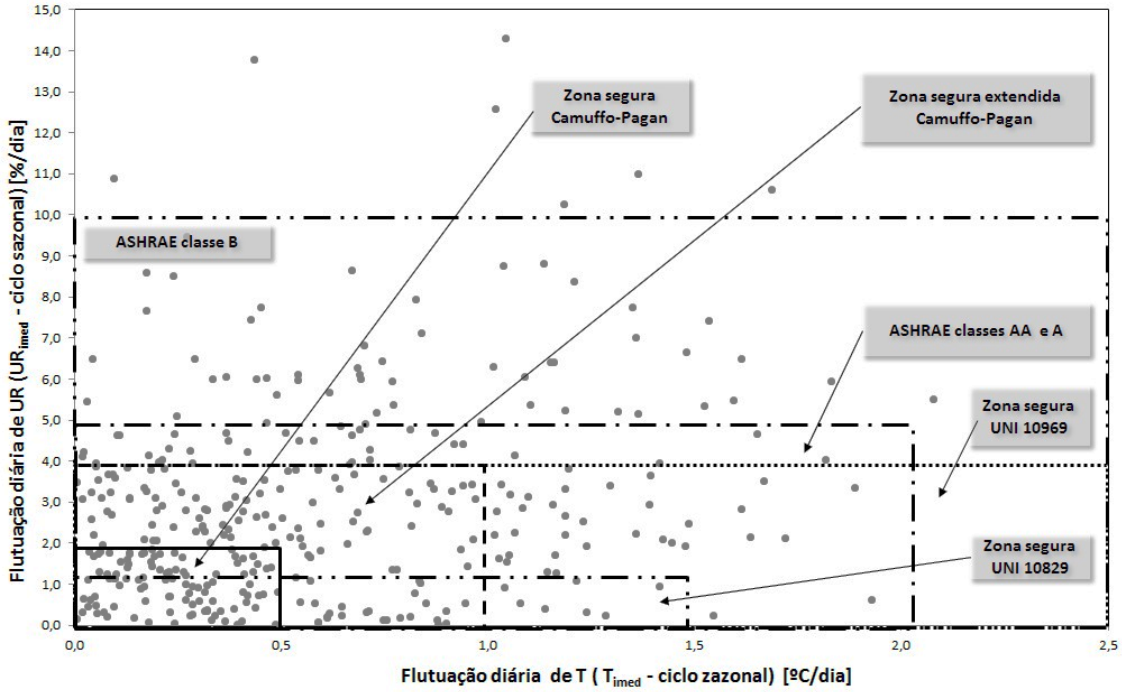


Figura 99 – Capela da Ceia – diagrama de dispersão de flutuações diárias de T_{imed} *versus* flutuações diárias de UR_{imed} (método 2 – diferença entre média diária e ciclo sazonal).

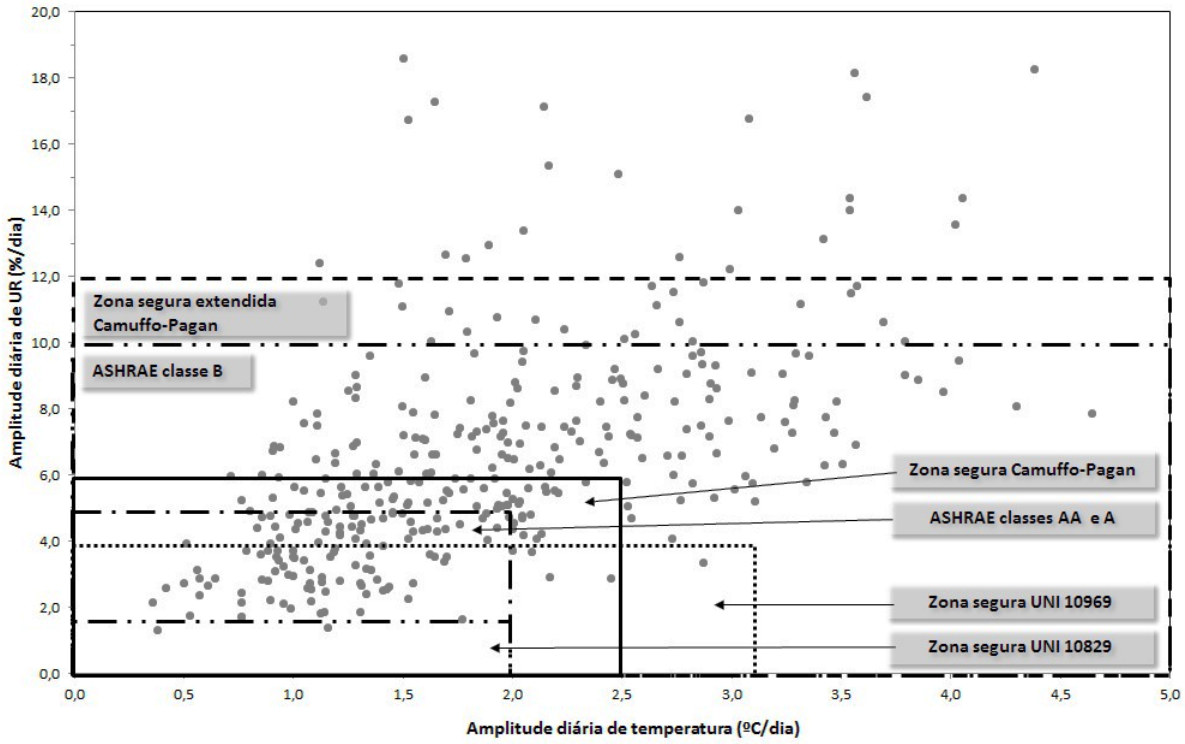


Figura 100 – Capela da Ceia – diagrama de dispersão de flutuações diárias de T_{imed} *versus* flutuações diárias de UR_{imed} (método 3 – amplitudes diárias).

A Tabela 16 compara os índices de desempenho da Capela da Ceia, considerando-se simultaneamente os limites de temperatura e umidade relativa mostrados nas figuras acima. Os índices correspondem ao percentual de pertinência às zonas demarcadas nas figuras 98, 99 e 100.

Tabela 16 – Capela da Ceia – comparação entre índices de desempenho da Capela da Ceia, considerando simultaneamente critérios-limite de flutuações de *T* e *UR* indicados nas tabelas 14 e 15.

Método de cálculo / Norma	**Índice de desempenho (%) / Método de cálculo**		
	1	**2**	**3**
Flutuações diárias em *T* e *UR* (Camuffo-Pagan)			
1.Diferença entre médias diárias	36,5	-	-
2.Diferença entre média diária e ciclo sazonal	-	28,6	-
3.Amplitudes diárias	-	-	48,1
Faixas Prescritas			
ASHRAE classe AA	25,7	24,2	3,3
ASHRAE classe A (1)	58,0	54,1	14,3
ASHRAE classe A (2)	28,5	28,9	8,8
ASHRAE classe B	55,5	62,6	55,2
ASHRAE classe C	52,8	52,8	52,8
ASHRAE classe D	53,3	53,3	53,3
UNI 10829	61,6	42,3	2,5
UNI 10969	86,7	76,8	21,2

Considerando a zona segura de *UR* adotada neste trabalho (60-75%), a Capela apresentou um índice de desempenho de 45,5% (vide Tabela 8). A metodologia Camuffo-Pagan resulta um índice de desempenho bem próximo desse (48,1%) ao ser aplicada às amplitudes diárias monitoradas (método 3).

MARTENS (2012, p. 58) investigou o risco de fissuração de madeira tília (*limewood*), considerada por ele como madeira "típica" utilizada em esculturas policromadas, em função da resposta dimensional a ciclos diários de flutuação de umidade relativa, propondo o diagrama apresentado na Figura 140 do Apêndice A. MARTENS (2012, p. 104) considerou que flutuações de *UR* menores que ±15% correspondem à zona de deformações elásticas, de respostas reversíveis, adotando esse critério-limite como admissível. Para análise das flutuações superiores a esse limite, Martens propõe um algoritmo que envolve o cálculo do tempo de resposta típico com funções matemáticas de primeira ordem (vide Apêndice A).

As figuras 101, 102 e 103 mostram diagramas de dispersão de flutuações diárias de *UR* na Capela da Ceia calculadas pelos métodos 1, 2 e 3 introduzidos acima, respectivamente, sobrepostos aos limites propostos por Martens com base nos estudos de JAKIELA et al. (2008), bem como as flutuações máximas propostas por Bratasz e Kozłowski, conforme discussão acima. Esses gráficos poderiam ser utilizados para análise de flutuações curtas (diárias) na Capela da Ceia, a exemplo do gráfico de Martens-Jakiela (Figura 140 do Apêndice A), considerando-se a abcissa como "umidade relativa inicial" e a ordenada como "umidade relativa final".

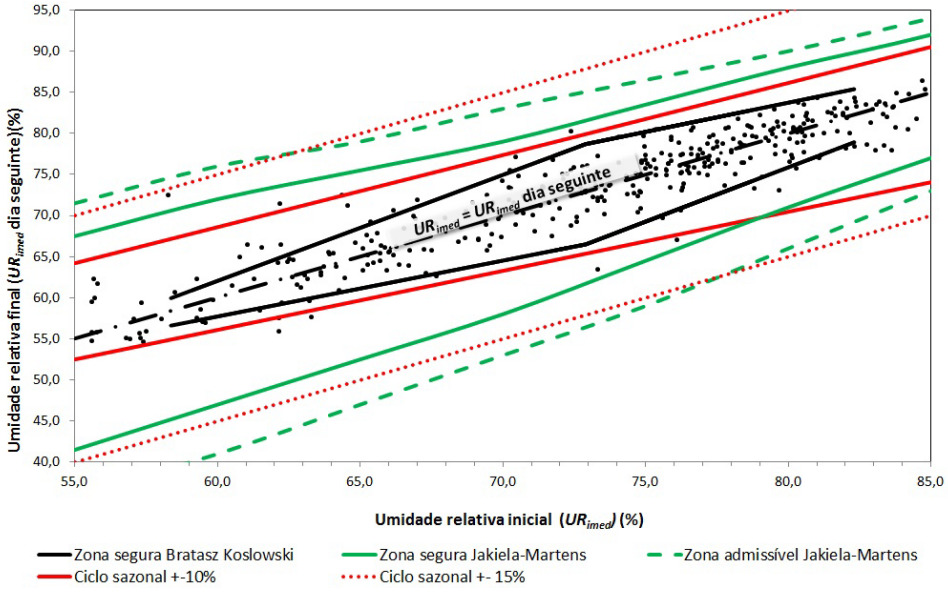


Figura 101 – Capela da Ceia – flutuações diárias admissíveis na *UR* (método 1 - UR_{imed} *versus* UR_{imed} do dia seguinte).

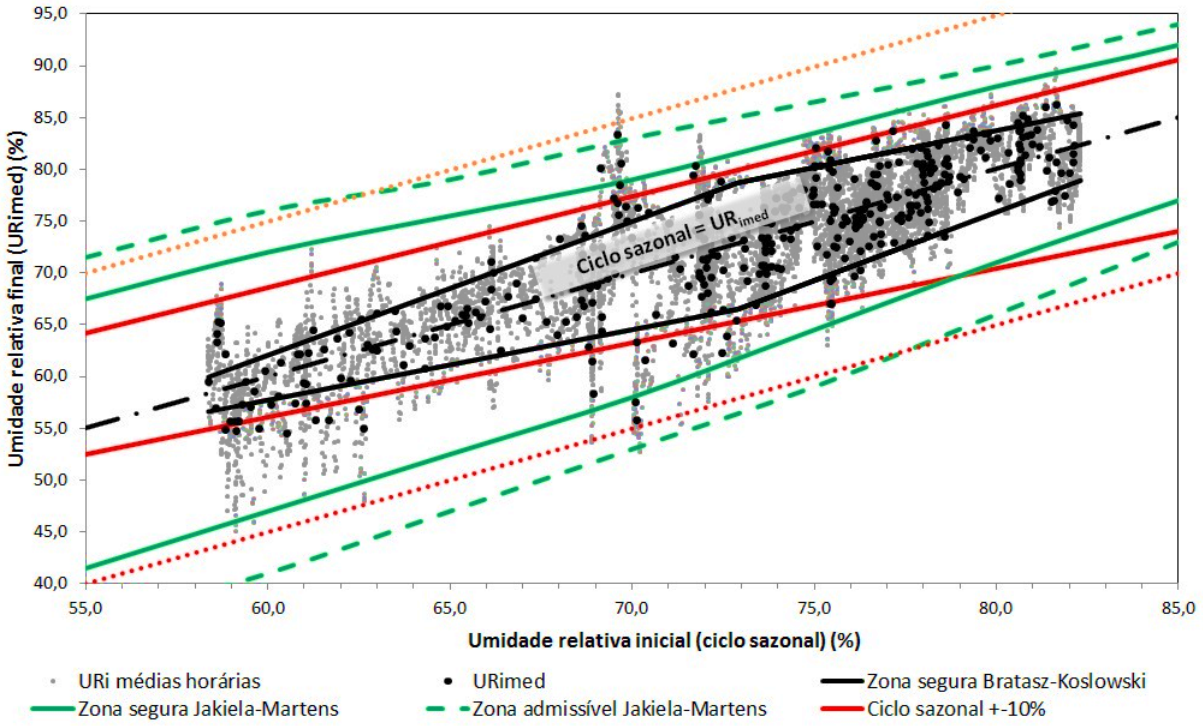


Figura 102 – Capela da Ceia – flutuações diárias admissíveis na *UR*– (Método 2 – ciclo sazonal *versus* UR_{imed}).

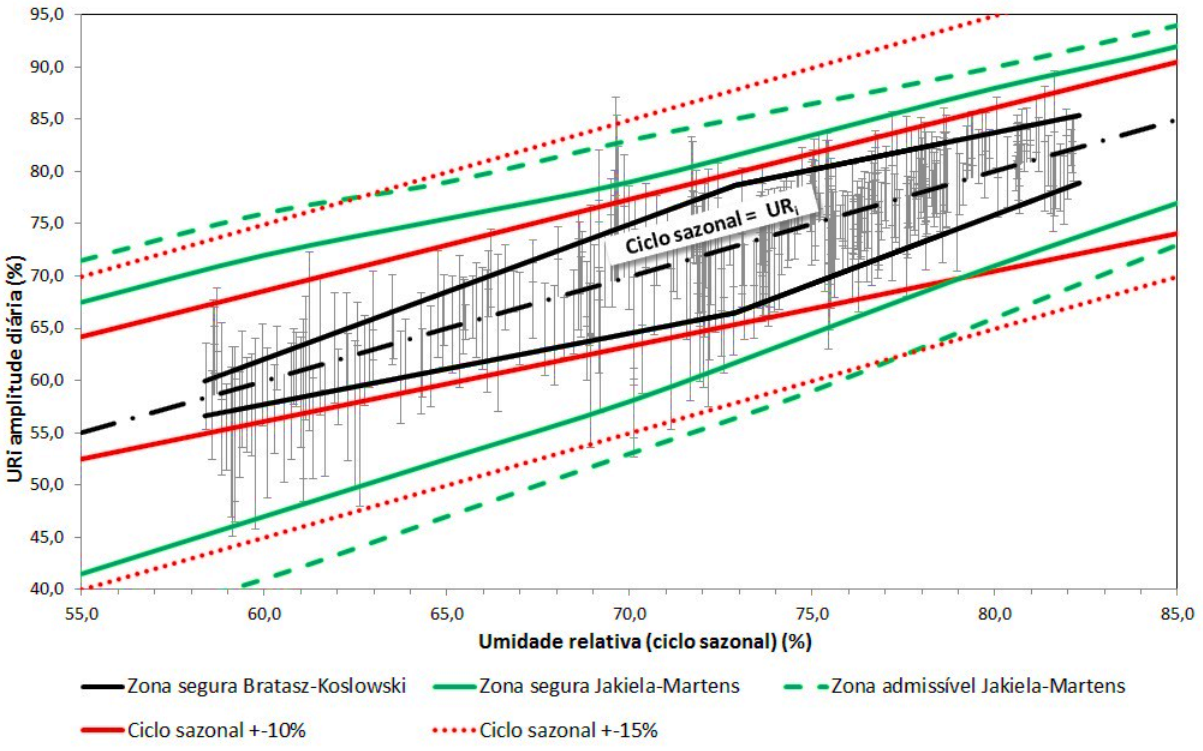


Figura 103 – Capela da Ceia –flutuações diárias admissíveis na *UR* (método 3 - ciclo sazonal versus amplitudes diárias).

Constata-se que os índices de desempenho da Capela da Ceia com relação à flutuação diária máxima admitida por Martens (±15%) utilizando-se os métodos de cálculo 1, 2 e 3 acima discutidos são respectivamente 100%, 99,7% e 96,3%.

Conclui-se da análise dos ciclos de flutuação de temperatura e umidade relativa, a partir das metodologias e resultados apresentados acima, que durante o período monitorado, o microclima interno da Capela da Ceia não impôs riscos significativos às esculturas em termos de danos físico-mecânicos. Observa-se que, em função do grande isolamento térmico das envoltórias, apesar das aberturas de ventilação permanente na porta, a ocorrência de flutuações de *UR* com ciclo temporal de mesma ordem de grandeza do tempo de resposta das esculturas (15 dias) é bastante reduzida. BRATASZ et al. (2007b) chegaram a uma conclusão parecida ao monitorar um altar na Itália. Já com relação às camadas pictóricas é necessário considerar flutuações mais curtas (p. ex., flutuações diárias) e, para essas, verificou-se que durante o período monitorado, o microclima da Capela também apresentou um bom desempenho.

b. Zonas de segurança ambiental para coleções diversas e com artefatos de madeira

A seção B.2 do Apêndice B discute as especificidades do Conforto Ambiental para pessoas e coleções, destacando zonas de segurança ambiental para coleções diversas e com artefatos de madeira, encontradas na literatura (vide Tabela 27).

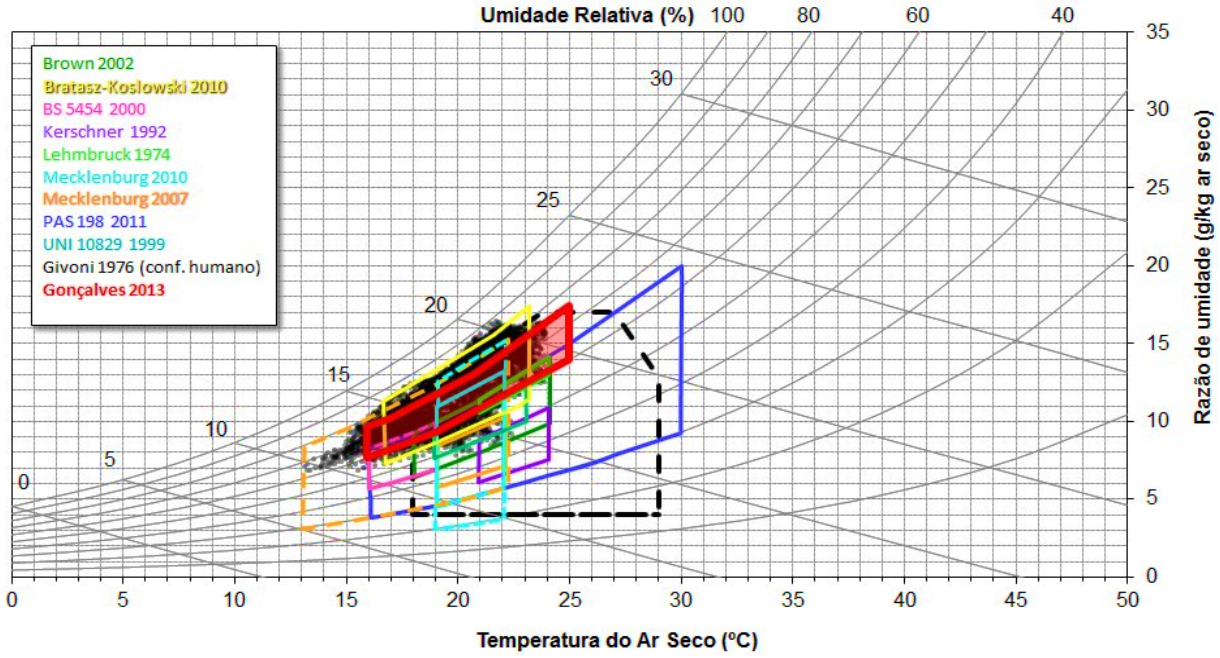


Figura 104 – T_i e UR_i monitoradas plotadas sobre diagrama psicrométrico contendo zonas de segurança ambiental para coleções diversas e com artefatos de madeira.

A Figura 104 mostra os dados monitorados internamente à Capela da Ceia (pontos negros) plotados sobre uma carta psicrométrica na qual foram superpostas zonas de segurança ambiental para coleções estudadas na seção B.2 do Apêndice B (Tabela 27 e Figura 160). Em vermelho está destacada a zona de segurança proposta neste trabalho, conforme discussão acima. Analisando-se a Figura 104 em conjunto com a dispersão dos dados internos em relação aos externos (Figura 50), verifica-se o efeito de tamponamento provido pelas envoltórias e superfícies internas da Capela, cujo efeito é a diminuição da amplitude de flutuação da umidade relativa interna. A Tabela 17 compila os índices de desempenho da Capela, com relação às diversas zonas mostradas na Figura 104:

Tabela 17 – Capela da Ceia – índices de desempenho com relação a zonas de segurança ambiental propostas na literatura para artefatos de madeira ou coleções diversas (vide Apêndice B, os valores entre parênteses referem-se às faixas admissíveis estendidas)

Referência	***UR* segura (%)**	***UR* admis. (%)**	***T* segura (ºC)**	***T* admis. (ºC)**	**Índice de desempenho (%)**
ASHRAE (2007); MICHALSKI, 2007; MICHALSKI e GRATTAN, 2007		25-75			53,2
BROWN (2002)	45-65		18-24		15,0
BS 5454 (BSI, 2000)	45-60	40-65	16-19		1,8 (6,0)
ERHARDT E MECKLENBURG (1994)	40-70	30-80			32,4 (81,2)
KERSCHNER (1992)	35-50		21-24		0,3
LEHMBRUCK (1974)	60-65		16-24		9,8
MECKLENBURG E TUMOSA (1999)	35-60				7,8
MECKLENBURG (2007a, 2007b)	37-53	30-80	19-23	13-23	1,1 (77,2)
MECKLENBURG (2010)	30-70	20-80	19-23		16,4 (46,9)
PADFIELD (s.d.a)	35-65				18,1
PAS 198 (BSI, 2011)	30-65		16-30		17,6
SEBERA (2001)		20-65			18,1
THOMSON (1986)	50-60	40-70			7,4 (32,4)
UNI 10829 (UNI, 1999)	50-60		19-24		5,5
UNI EN 15757 (UNI, 2010)	60-83		16,6-22,6		72,6
Limites adotados neste trabalho	**60-75**		**16-25**		**42,9**

A Figura 105 ilustra a frequência dos dados monitorados, dentro e em torno da zona segura proposta neste trabalho, para cada estação do ano. Somando-se aos 42,9% da zona segura os 2,5% em que os limites de *UR* são atendidos com T<16ºC, obtém-se o total de 45,5% indicado na Tabela 8.

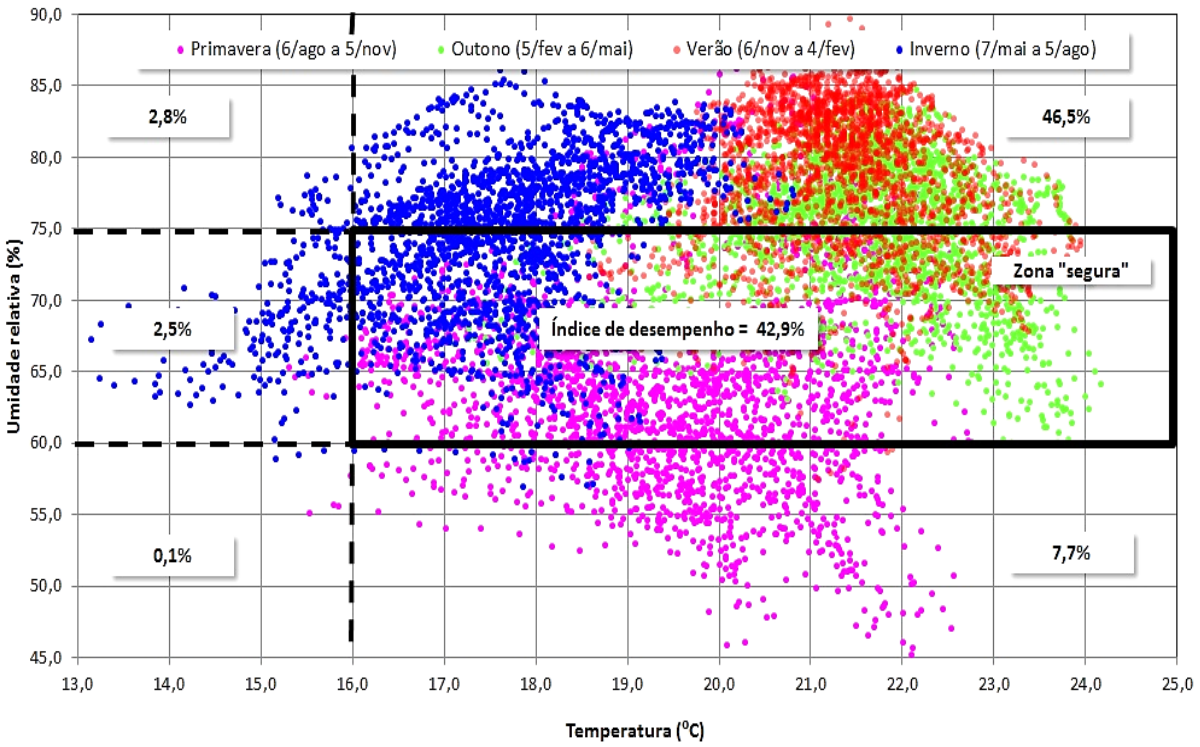


Figura 105 – Capela da Ceia – diagrama de dispersão de T_i *x* UR_i monitoradas, com índices de desempenho em relação à zona de segurança proposta neste trabalho.

5.4.1.2. Isopermas

A Figura 106 apresenta os dados mostrados nas figuras 104 e 105, plotados sobre o diagrama psicrométrico contendo as isopermas definidas conforme a metodologia de Sebera (vide seção A.2 do Apêndice A).

Verifica-se que as taxas de permanência instantâneas alcançadas no período de inverno (pontos em azul) são cerca de duas vezes maiores que as permanências instantâneas propiciada no período de verão, aumentando esta proporção, se considerados os valores extremos, para uma permanência instantânea cerca de seis vezes maior no inverno. Constata-se ainda que os índices de permanência instantâneos do outono são semelhantes os do inverno, assim como os da primavera são próximos dos do verão.

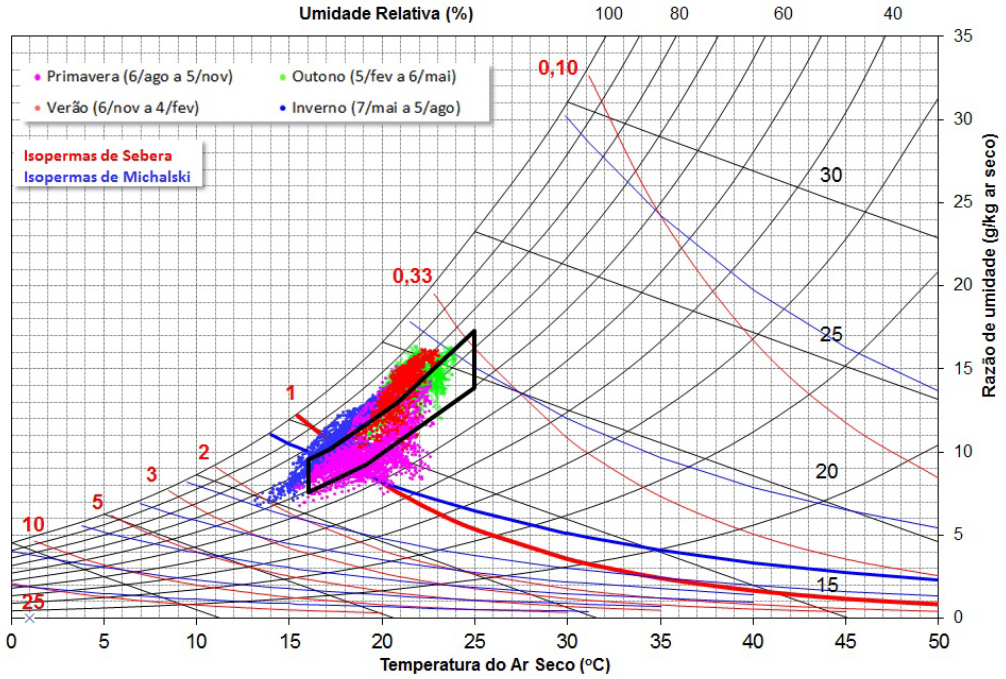


Figura 106 – Capela da Ceia – T_i e UR_i monitoradas, discriminadas por estação do ano, plotadas sobre diagrama psicrométrico contendo isopermas de Sebera e Michalski (E = 25kcal/mol) e a zona de segurança proposta neste trabalho

A Figura 107 compara as taxas de permanência instantânea e ponderada pelo efeito cumulativo do tempo (*Isoperma-T)* calculadas pela metodologia de Sebera, conforme descrito na seção 4.8.1.2, plotadas juntamente com os valores de T_i e UR_i monitorados na Capela da Ceia.

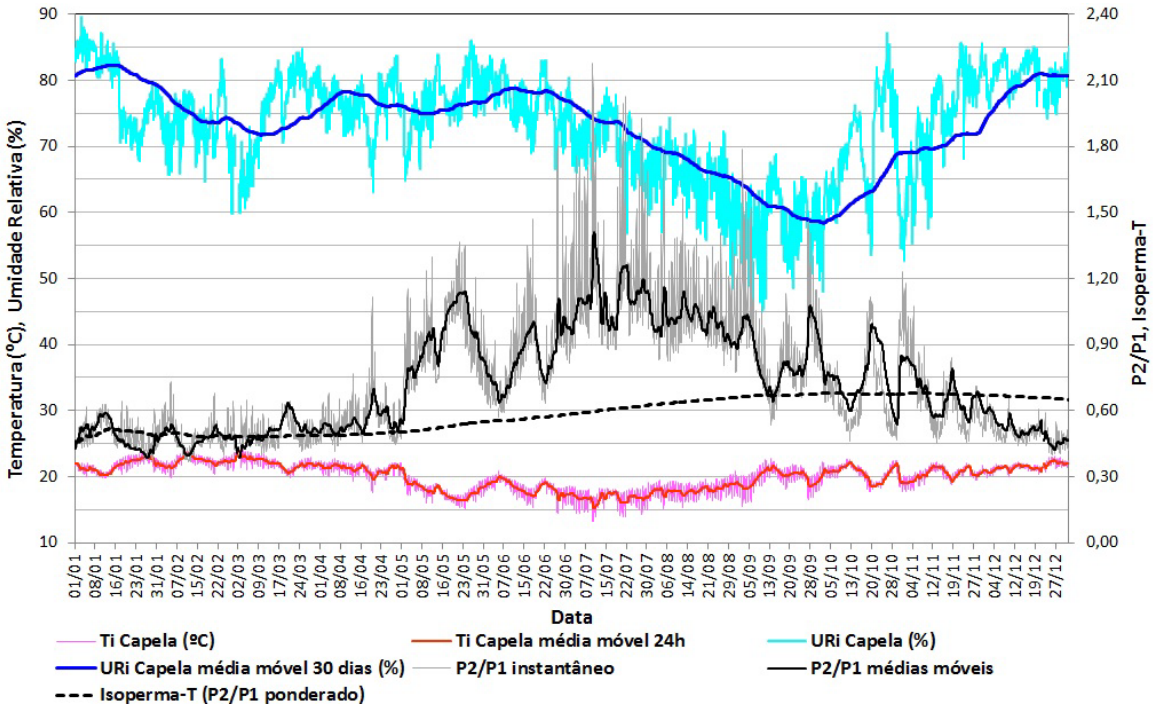


Figura 107 – Capela da Ceia – T_i e UR_i monitoradas *versus* taxas de permanência instantâneas (*P2/P1*) e ponderadas (*Isoperma-T*), calculadas pela metodologia de Sebera (E = 25Kcal/mol)

Confirma-se a análise anterior feita com base na Figura 106 e também que os resultados são condizentes com a teoria discutida no Apêndice A. As taxas de permanência instantânea são inversamente proporcionais à temperatura e à umidade relativa monitoradas na Capela, elevando-se no período de inverno, que é quando ocorre uma queda na média daquelas variáveis.

Entretanto, ao se considerar o efeito cumulativo do tempo, **tomando-se a taxa de permanência ponderada (*Isoperma-T*) como média harmônica de todas as permanências instantâneas anteriores,** conforme discussão apresentada no Apêndice A, verifica-se que essa elevação é mais discreta, bem como a diminuição que ocorre em função da elevação da temperatura e da umidade relativa no verão.

A taxa média anual de permanência ponderada pelo efeito cumulativo do tempo (*Isoperma-T*) para a Capela da Ceia fica em torno de 0,6.

A Figura 108 compara os multiplicadores de expectativa de vida (*LM*, isopermas de Michalski) instantâneos e ponderados pelo efeito cumulativo do tempo (*LM-T*), plotados juntamente com os valores de T_i e UR_i monitorados na Capela da Ceia. A figura mostra também os limites da classificação de risco baseada nos valores de *LM*, proposta por MARTENS (2012), sendo os índices de desempenho em cada categoria, compilados na Tabela 18.

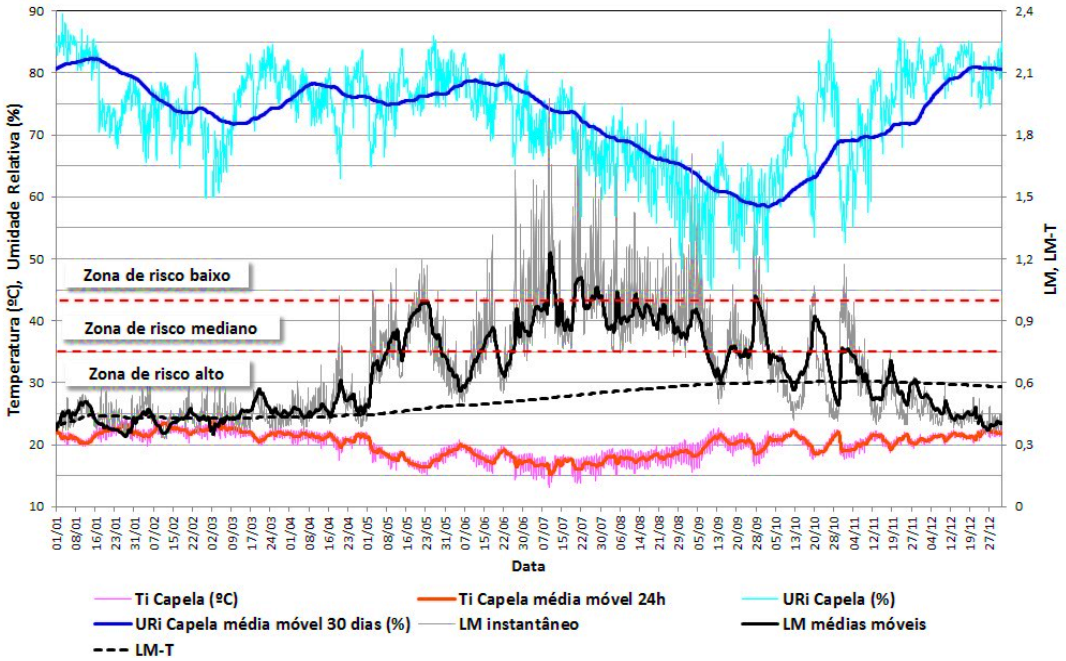


Figura 108 – Capela da Ceia – T_i *e* UR_i monitoradas *versus* taxas de permanência instantâneas (*LM*) e ponderadas (*LM-T*) calculadas pela metodologia de Michalski (E = 25Kcal/mol)

Tabela 18 – Capela da Ceia – índices de desempenho (%) com relação aos limites de *LM* propostos por MARTENS (2012), com base nos dados monitorados.

Métrica / zona	**Risco alto (*LM* ≤ 0,75)**	**Risco mediano (0,75<*LM*≤1)**	**Risco baixo (*LM* > 1)**
LM instantâneo	65,7	24,1	10,2
LM médias móveis	67,0	29,4	3,6
LM-T	100,0	-	-

Comparando as figuras 107 e 108, verifica-se, conforme previsto na discussão apresentada na seção A.2 do Apêndice A, que em virtude das altas umidades relativas observadas no interior da Capela, as taxas de permanência instantâneas (*LM*) calculadas pela metodologia de Michalski resultam menores que as calculadas pela metodologia de Sebera (*P2/P1*). O *LM-T* observado na Capela fica entre 0,45 e 0,6 ao longo do ano.

Considerando-se os limites de risco em termos de *LM* (deterioração química) propostos por MARTENS (2012, p. 108), a Capela seria classificada como de "alto risco", pois o *LM-T* fica abaixo de 0,75 durante todo o ano e tanto o *LM* instantâneo como o *LM* calculado pelas médias móveis ficam abaixo desse limite por mais de 65% das horas do ano.

Cabe entretanto ponderar, conforme discutido no Apêndice A, que Martens não apresenta uma justificativa clara para os critérios-limite estabelecidos para a análise de *LM*. Ele considerou que uma expectativa de vida 25% menor que aquela oferecida por condições ambientais equivalentes a *T*=20ºC e *UR*=50% representaria uma condição de "alto risco", o que ocorre na Capela, na maior parte do ano.

A análise das taxas de permanência apresentadas acima, obtidas para a Capela da Ceia pelos métodos de Sebera e Michalski, indica que a taxa de deterioração química é cerca de duas a seis vezes maior no verão do que no inverno. Cabe ressaltar contudo, conforme se detalha no Apêndice A, que o conceito embutido em ambas as metodologias está embasado no mecanismo de hidrólise da celulose e se aplica mais adequadamente a coleções contendo papel ou tecidos, que podem apresentar, como resultado da deterioração química, fragilização e alterações cromáticas. No caso em estudo, a indicação de risco pelos critérios de Martens não seria relevante em função do formato e comportamento estrutural da madeira nas esculturas.

Na seção 5.4.2 são analisados os impactos, sobre as taxas de permanência e sobre as demais métricas de preservação estudadas neste trabalho, dos regimes de ventilação 1 e 2,

simulados no programa *Energy Plus* ©, visando à melhoria das condições de conservação, descritos anteriormente nas seções 4.6.2.3 e 5.2.2.3.

5.4.1.3. Índice de Preservação (IP) e índice de preservação ponderado pelo efeito cumulativo do tempo (IETP)

A Figura 109 apresenta os valores de $IP_{Padfield}$, IP_{IPI}, $IETP_{Padfield}$ e $IETP_{IPI}$, calculados conforme a metodologia indicada na seção 4.8.3, plotados juntamente com a temperatura e a umidade relativa monitoradas internamente na Capela da Ceia:

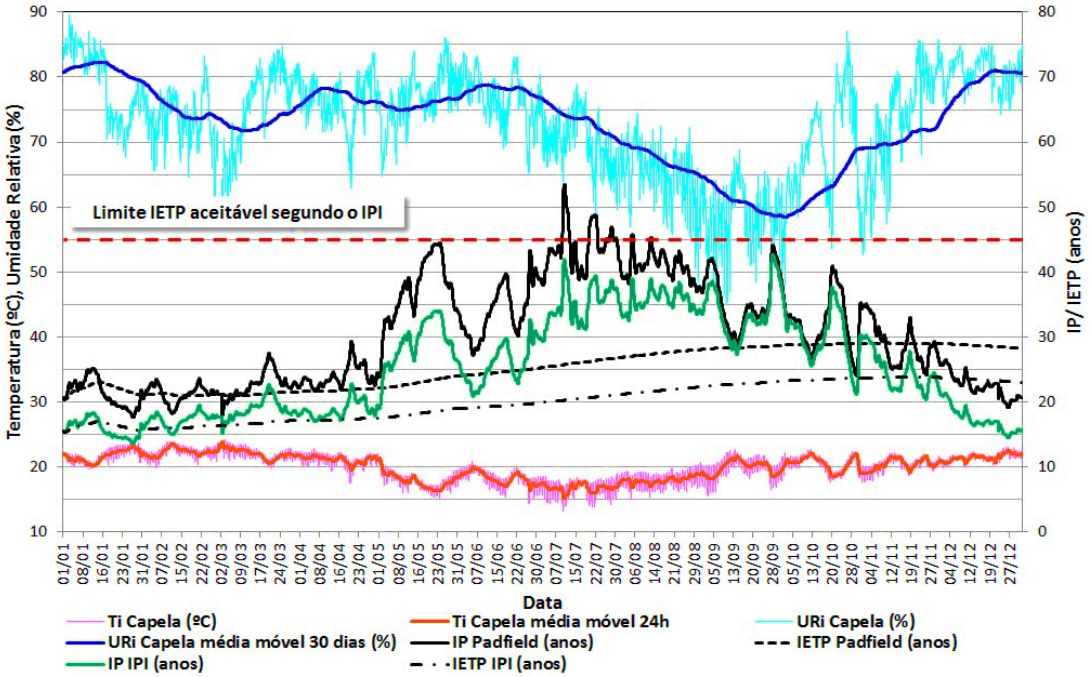


Figura 109 – Capela da Ceia – T_i *e* UR_i monitoradas x $IP_{Padfield}$, IP_{IPI}, $IETP_{Padfield}$.e $IETP_{IPI}$.

Os resultados são consistentes com a teoria apresentada no Apêndice A, e verifica-se que as métricas *IP* e *IETP* são mais sensíveis à variação de *T* que à variação de *UR*. O $IETP_{IPI}$ na Capela da Ceia fica em torno de 20 anos e os valores de IP_{IPI} calculados pelas médias móveis variam entre 15 e 40 anos.

PADFIELD (2004) afirma que as taxas de deterioração (e consequentemente os valores de *IP*) obtidos pelas equações 33 e 34 do Apêndice A são praticamente iguais, ocorrendo desvios maiores para maiores umidades relativas. Os resultados mostrados na Figura 109 confirmam isso. Verifica-se que os índices de preservação calculados pelas duas equações se aproximam quando os valores de *UR* estão próximos de 50%, o que ocorreu na Capela no período de primavera (setembro a novembro). Nos demais períodos do ano, observa-se que o $IP_{Padfield}$ é inferior ao IP_{IPI}. Conforme metodologia apresentada na seção

4.8.3, optou-se pelo IP_{IPI} para fins de comparação com as métricas derivadas das simulações computacionais, na seção 5.4.2.3.

De acordo com os limites estabelecidos pelo *IPI – Image Permancence Institute* (vide Quadro 5 do Apêndice A), o ambiente da Capela seria classificado na zona de risco, pois o *IETP* fica abaixo de 45 anos durante todo o ano.

Entretanto, cabe lembrar, conforme ressalvas e discussões apresentadas no Apêndice A, que, a rigor, o *IP* indica uma estimativa de quanto tempo um material orgânico demoraria para sofrer a mesma deterioração de 2% ao ano, que um **filme de acetato de celulose** sofre em **50 anos**, se mantido a 20ºC / 45%. Portanto, deve-se tomar, na interpretação desses índices para o caso em estudo, a mesma cautela enfatizada na seção anterior quanto à interpretação das isopermas.

OLIVEIRA (2011) registra que a primeira restauração das esculturas do Santuário de Congonhas ocorreu em 1891, tendo sido a policromia original terminada por Ataíde em 1808. Segundo depoimento do restaurador Jair Afonso Inácio (OLIVEIRA, 2011, p. 116), foram realizadas outras duas repinturas das esculturas, antes da intervenção realizada pelo IPHAN em 1957. E, a essa, mais duas se seguiram, em 1973/74 e de 2003 a 2010. Verificam-se, portanto, intervalos de 83, 66 (/2), 16 e 30 anos entre as intervenções, o que resulta em um ciclo médio de cerca de 40 anos entre as re-restaurações das esculturas da Capela.

Julgamos ser necessária uma investigação mais detalhada para determinar até que ponto esse intervalo temporal entre as intervenções está relacionado à vulnerabilidade química dos materiais empregados na policromia. Cabe inclusive investigar a hipótese de ele ser devido a fatores antrópicos, por exemplo, na escolha de técnicas e materiais em cada remoção ou repintura. De qualquer maneira, a melhoria das condições microclimáticas da Capela, através da diminuição da temperatura e umidade relativa, dentro das zonas de segurança anteriormente discutidas, contribuiria para diminuir a taxa de deterioração química, e consequentemente, aumentar o intervalo temporal entre eventuais intervenções de conservação curativa ou restauração nas esculturas.

Cabe lembrar que as métricas de preservação devem sempre ser interpretadas de forma **relativa**, para fins **comparativos**, seja entre diferentes momentos no tempo no mesmo ambiente(p. ex., condições de inverno *versus* condições de verão) ou entre diferentes ambientes, em termos de taxa de deterioração química relacionada às condições ambientais. Sua obtenção também é importante para fins de comparação com edifícios / coleções

mantidos em outros edifícios, sob condições similares. Com base nos resultados obtidos, podemos afirmar, por exemplo, que é altamente desaconselhável utilizar salas com características microclimáticas semelhantes às da Capela da Ceia para abrigar arquivos e coleções com acervos de papel.

5.4.1.4. Conteúdo de umidade nas condições de equilíbrio (EMC) e mudança dimensional (DC)

A Figura 110 mostra a distribuição de *EMC*, *ΔDC* e *DC* obtidos a partir dos dados monitorados na Capela da Ceia:

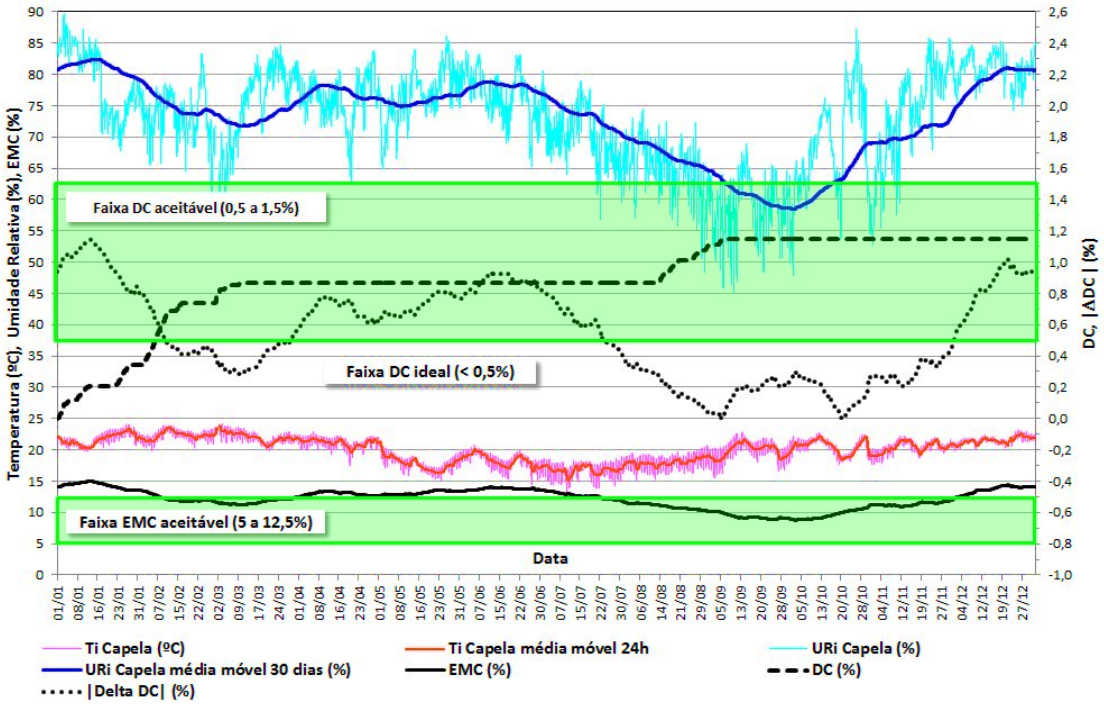


Figura 110 – Capela da Ceia – T_i e UR_i monitoradas x *EMC*, *ΔDC e DC*.

Verifica-se que o *EMC* médio ficou em torno de 10% e que a mudança dimensional *DC* acumulada, tomada como a diferença entre a máxima e a mínima *ΔDC* absolutas, atingiu o patamar de 1,14%, dentro da faixa considerada aceitável, de acordo com o IPI.

Esses resultados indicariam, se interpretados de acordo com a metodologia original proposta pelo IPI, a qual leva em consideração os valores máximo e mínimo absolutos de *EMC* ao longo do período monitorado, em uma condição de risco ao longo de todo o período.

Entretanto, as análises dos ciclos de flutuação de *T* e *UR* apresentadas anteriormente indicam baixa probabilidade de danos físico-mecânicos nas esculturas guardadas na Capela da Ceia. Ademais, ambas as métricas *DC* e *EMC* permaneceram dentro dos limites considerados

aceitáveis pelo IPI durante uma porção significativa do ano: 89,6 e 51,5% respectivamente. Essa evidência confirma os resultados encontrados na análise dos ciclos de flutuação de temperatura e umidade relativa (seção 5.4.1.1.a).

Na seção 5.4.2.4, os resultados de *DC* e *EMC* derivados do monitoramento são comparados a essas e outras métricas derivados das simulações computacionais, e os critérios do IPI para interpretação dessas métricas são analisados.

5.4.1.5. Fator de risco de mofo (MRF)

A Figura 111 mostra a distribuição do *MRF* calculado a partir dos dados monitorados na Capela da Ceia e dos tempos de germinação definidos por AYERST (1969) (Figura 151 do Apêndice A). A figura mostra ainda a evolução do índice *TOW* ao longo do período monitorado. Vale lembrar que o *MRF* expressa o tempo de exposição a esporos ativos dentro do ambiente, como fração do tempo necessário para a germinação.

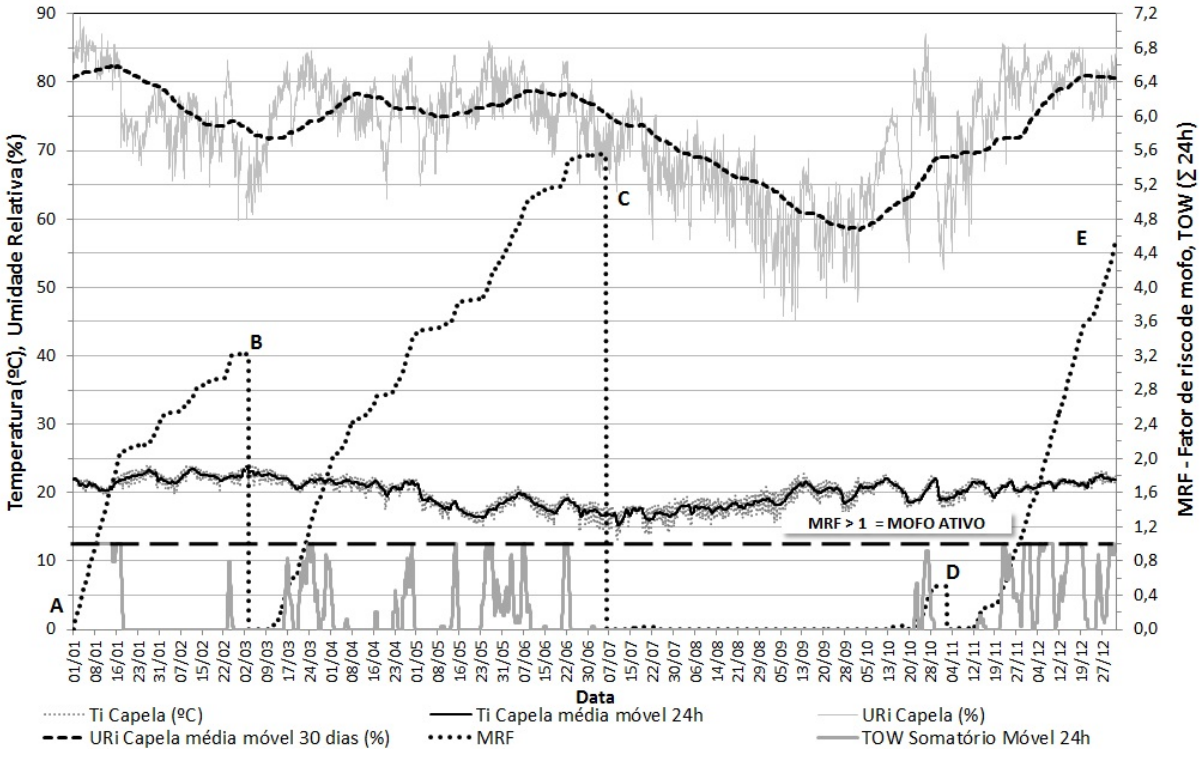


Figura 111 – Capela da Ceia – T_i e UR_i monitoradas x *MRF* e *TOW*.

A Figura 111 mostra que as condições de germinação foram atingidas três vezes durante o período de monitoramento, em março (pico B), no início de julho (pico C) e ao final de dezembro (pico E). Cabe entretanto considerar que o valor de *MRF* = 0 observado no início do ano assume este valor por ter sido arbitrado o dia 1º. de janeiro (ponto A) para o início dos cálculos. Considerando que durante o período de verão a umidade relativa é alta, o

valor correto de *MRF* esperado para o pico B mostrado na Figura 111 seria dado pela soma das frações sob a curva de *MRF* no trecho (AB) com as com a do trecho (DE), totalizando um *MRF* máximo de aproximadamente 7,6 no início de março.

A Figura 111 mostra ainda o índice *TOW* calculado para os dados monitorados na Capela, considerado, em cada intervalo de medição, como a fração total das últimas 24h na qual a *UR* permaneceu acima de 80%. Verifica-se que os índices *MRF* e *TOW* obtidos em geral foram coerentes entre si, incluindo-se os períodos em que *TOW* se aproxima ou se iguala a 1, nos períodos de germinação ativa, em que *MRF* é maior que 1.

A seguir, as métricas de preservação calculadas com base nos dados monitorados apresentadas acima são comparadas com as suas equivalentes, calculadas a partir dos resultados das simulações computacionais, apresentados na seção 5.2.

5.4.2- Métricas derivadas das simulações computacionais

5.4.2.1. Índices de desempenho

a. Ciclos de flutuação de temperatura e umidade relativa

Para fins de comparação com os resultados mostrados na Tabela 16, foram calculados os índices de desempenho da Capela da Ceia, resultantes das simulações computacionais, apresentados na Tabela 19:

Tabela 19 – Capela da Ceia – índices de desempenho resultantes das simulações computacionais, considerando simultaneamente critérios-limite de flutuações de *T* e *UR* indicados nas tabelas 14 e 15. (Método 1: diferença entre médias diárias consecutivas)

Norma / metodologia	**Índice de desempenho (%) (Mét. 1)**		
	Dados monitorados	**Modelo preditivo**	**Energy Plus**
Flutuações diárias em *T* e *UR* (Camuffo-Pagan)	36,5	21,7	12,9
Faixas Prescritas			
ASHRAE classe AA	25,7	20,6	26,4
ASHRAE classe A (1)	58,0	82,4	81,4
ASHRAE classe A (2)	28,5	20,9	27,2
ASHRAE classe B	55,5	83,0	81,9
ASHRAE classe C	52,8	46,7	55,5
ASHRAE classe D	53,3	46,7	55,5
UNI 10829	61,6	94,5	81,0
UNI 10969	86,7	98,9	97,0

Para o cálculo, manteve-se os critérios-limite definidos na seção 5.4.1.1, e considerou-se flutuações diárias de temperatura e umidade relativa calculadas pelo método 1 (diferença

entre médias diárias consecutivas), com base nos resultados das simulações por modelos preditivos (regressão linear múltipla) e por meio do programa *Energy Plus* ©.

Verifica-se que os índices de desempenho resultantes das simulações alcançaram boa correspondência com os índices resultantes do monitoramento, para as classes AA, A2, C e D da ASHRAE.

Algumas hipóteses podem ser levantadas para explicar os desvios nos demais índices: (i) menor amplitude global de variação e flutuações diárias menores nos dados simulados, resultando em índices de desempenho melhores, conforme se pode verificar por inspeção visual da Figura 71; (ii) desvios médios quadráticos resultantes das simulações da mesma ordem de grandeza dos critérios-limite adotados para o cálculo dos índices de desempenho; (vide Tabela 10); (iii) necessidade de recalcular os critérios-limite a serem utilizados para o cálculo de índices de desempenho, com base em histogramas de flutuações diárias específicos dos dados simulados;

Inserindo-se os dados resultantes das simulações computacionais no gráfico da Figura 101, obtém-se a Figura 112, cujos índices de desempenho correspondentes são compilados na Tabela 20:

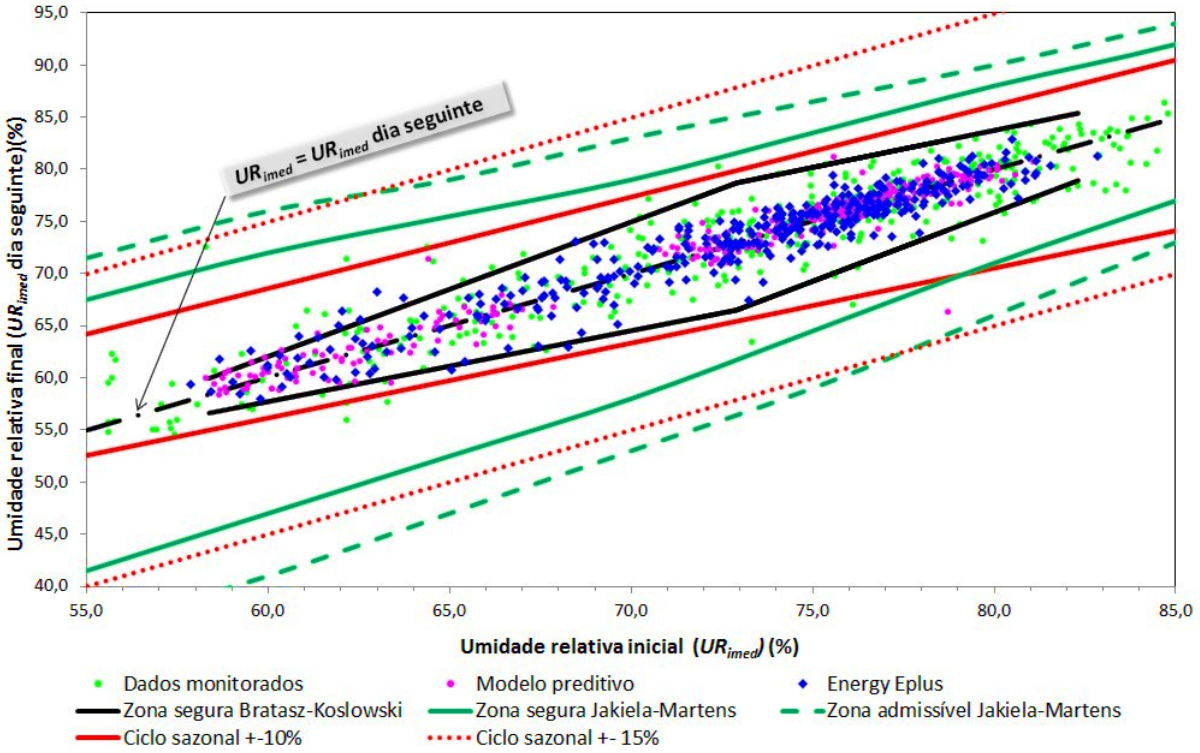


Figura 112 – Capela da Ceia – flutuações diárias admissíveis na *UR* (método 1 – diferença entre médias diárias consecutivas). Comparação entre dados monitorados e simulados.

Tabela 20 – Capela da Ceia – comparação de índices de desempenho anual (%) monitorados e simulados, com relação a critérios-limite de flutuações de *UR*.

Metodologia / Índices de desempenho	Bratasz-Kozłowski	±10% do ciclo sazonal	Limites adotados neste trabalho (60-75%)
Dados horários monitorados	71,7	97,0	45,5
Modelo preditivo	75,2	100,0	41,1
Energy Plus	65,5	100,0	50,9

Comparando as tabelas 8 e 20, verifica-se que os índices de desempenho dos dados simulados apresentaram valores próximos dos índices calculados com base nos dados monitorados, com desvios menores que 10%. Essa evidência indica que as simulações por modelos preditivos e pelo *Energy Plus* © são confiáveis para obtenção desse tipo de métrica de preservação, cabendo ressalvar, contudo, que os desvios quadráticos médios obtidos entre T_i e UR_i simuladas e monitoradas são da mesma ordem de grandeza que os critétios-limite utilizados para definir os índices de desempenho quanto as flutuações dessas variáveis.

b. Zonas de segurança ambiental para coleções diversas e com artefatos de madeira

Inserindo-se os dados de T_i e UR_i simulados na Figura 104 e na Figura 105, obtém-se respectivamente a Tabela 21 e a Figura 113, que comparam os índices de desempenho dos dados monitorados e simulados, com relação às zonas de segurança ambiental discutidas anteriormente.

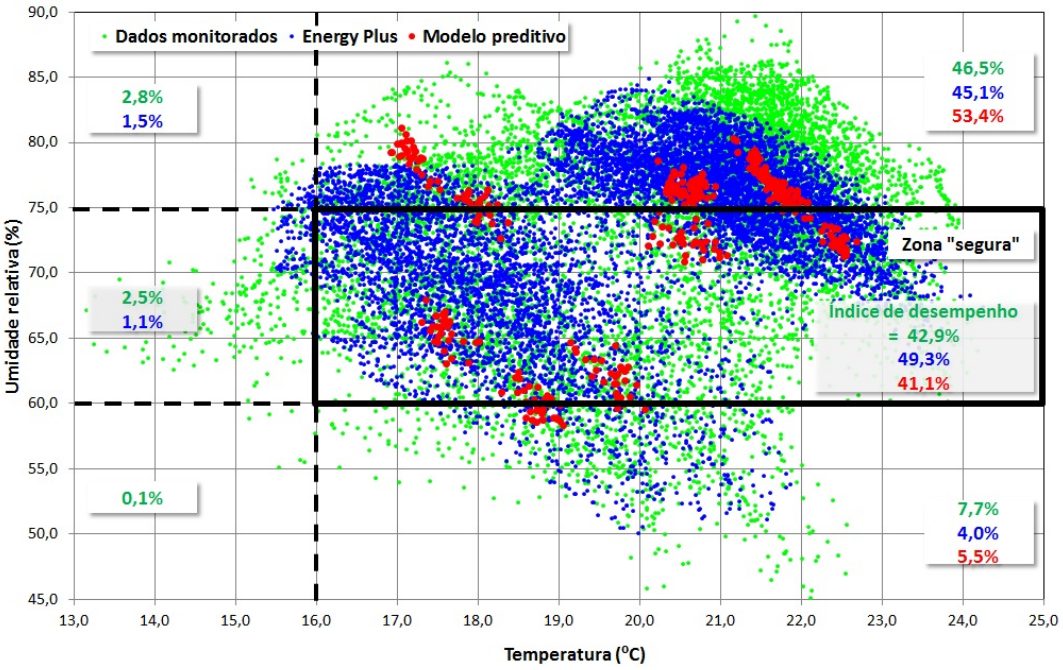


Figura 113 – Capela da Ceia – diagrama de dispersão de T_i *x* UR_i. Comparação entre dados monitorados e simulados.

Tabela 21 – Capela da Ceia – índices de desempenho (%) com relação às zonas de segurança ambiental da Figura 104 - Comparação entre dados monitorados e simulados. (Os valores entre parênteses referem-se às faixas admissíveis estendidas da Tabela 17)

Referência	Dados monitorados	Modelo preditivo	Energy Plus
ASHRAE (2007); MICHALSKI, 2007; MICHALSKI e GRATTAN, 2007	53,2	46,6	54,5
BROWN (2002)	15,0	17,0	9,3
BS 5454 (BSI, 2000)	1,8 (6,0)	3,8 (10,4)	0,9 (5,7)
ERHARDT E MECKLENBURG (1994)	32,4 (81,2)	25,2 (98,4)	26,3 (91,7)
KERSCHNER (1992)	0,3	0,0	0,0
LEHMBRUCK (1974)	9,8	14,0	7,7
MECKLENBURG E TUMOSA (1999)	7,8	5,5	4,0
MECKLENBURG (2007a, 2007b)	1,1 (77,2)	0,0 (98,4)	1,1 (89,6)
MECKLENBURG (2010)	16,4 (46,9)	9,0 (66,6)	9,8 (55,0)
PADFIELD (s.d.a)	18,1	19,5	11,7
PAS 198 (BSI, 2011)	17,6	19,5	11,7
SEBERA (2001)	18,1	19,5	11,7
THOMSON (1986)	7,4 (32,4)	5,5 (25,2)	4,0 (26,3)
UNI 10829 (UNI, 1999)	5,5	1,6	3,1
UNI EN 15757 (UNI, 2010)	72,6	94,2	84,2
Limites propostos com base no monitoramento da Capela da Ceia	**42,9**	**41,1**	**49,3**

Analisando-se os resultados acima verifica-se que os índices de desempenho calculados com base nos dados simulados, com exceção dos índices obtidos para a norma EN 15757 (UNI 2010), apresentaram valores próximos aos índices respectivos dos dados monitorados, com desvios menores que 10%. Essa evidência indica que as simulações por modelos preditivos (regressão linear múltipla) e por meio do programa *Energy Plus* © são confiáveis para obtenção de métricas de preservação do tipo "índices de desempenho".

5.4.2.2. Isopermas

a. Metodologia de Sebera (P2/P1)

A Figura 114 compara as taxas de permanência instantâneas (*P2/P1*) e ponderadas pelo efeito cumulativo do tempo (*isoperma-T*) conforme metodologia descrita na seção 4.8.1.2, plotadas juntamente com os valores de T_i e UR_i obtidos por simulação no programa *Energy Plus* ©. Cabe destacar que a média móvel de UR_i mostrada nas figuras desta seção diferem do ciclo sazonal de 15 dias anteriores e 15 posteriores, proposto na norma EN 15757

(UNI 2010). O efeito cumulativo do tempo sobre as taxas de permanência é função somente das condições anteriores a cada intervalo de tempo no monitoramento.

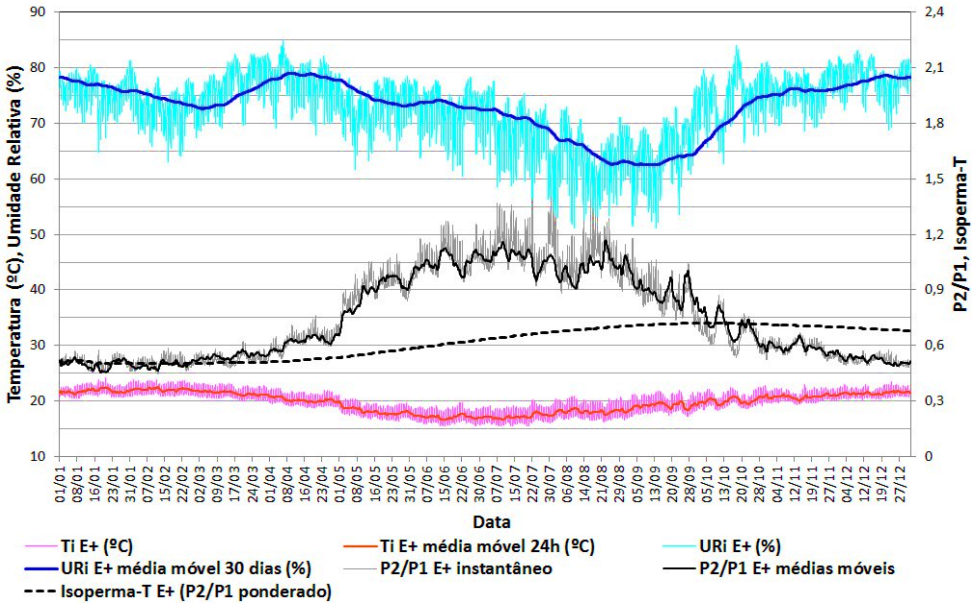


Figura 114 – Capela da Ceia – T_i *e* UR_i simuladas no programa *Energy Plus* © *versus* taxas de permanência instantâneas (*P2/P1*) e ponderadas (*isoperma-T)* resultantes, pela metodologia de Sebera (E = 25Kcal/mol).

A Figura 115 compara as taxas de permanência instantânea (*P2/P1*) e ponderada pelo efeito cumulativo do tempo (*Isoperma-T*) conforme metodologia descrita na seção 4.8.1.2, plotadas juntamente com os valores de T_i e UR_i preditos por regressão linear múltipla para a Capela da Ceia:

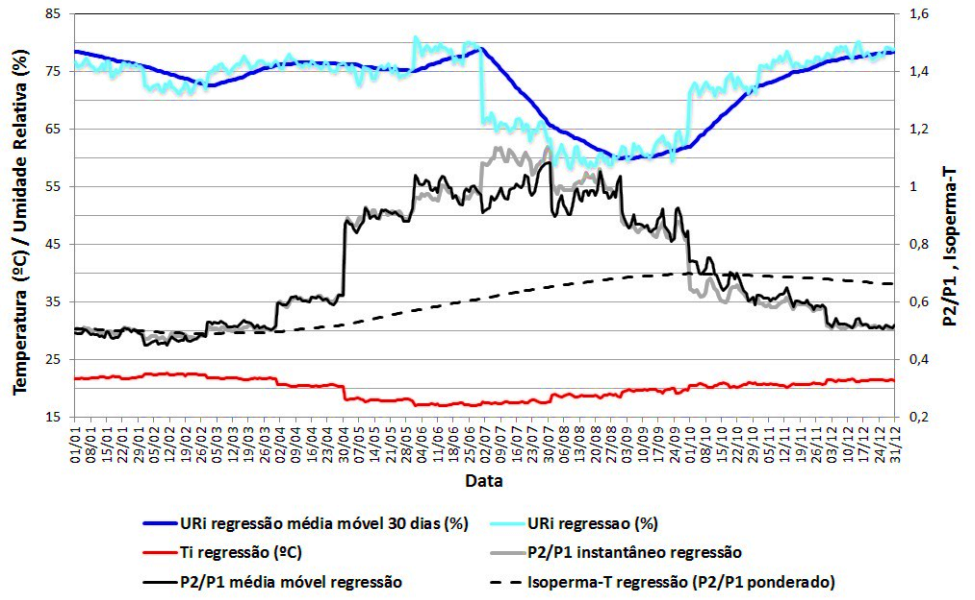


Figura 115 – Capela da Ceia – T_i e UR_i calculadas por regressão linear múltipla *versus* taxas de permanência instantâneas (*P2/P1*) e ponderadas *(Isoperma-T)* resultantes pela metodologia de Sebera (E = 25Kcal/mol).

Cabe destacar que na Figura 115, os dados resultantes do modelo de regressão linear múltipla já representam médias diárias, não sendo necessário calcular uma média móvel das 24h anteriores para a temperatura. Sendo assim, os diagramas de dispersão abaixo incluem médias móveis apenas para os dados simulados no programa *Energy Plus* ©.

A Figura 116 compara as taxas de permanência instantâneas (*P2/P1*) e ponderadas pelo efeito cumulativo do tempo (*isoperma-T*), calculadas pela metodologia de Sebera para a Capela da Ceia, com base em T_{imed} e UR_{imed} monitoradas e simuladas.

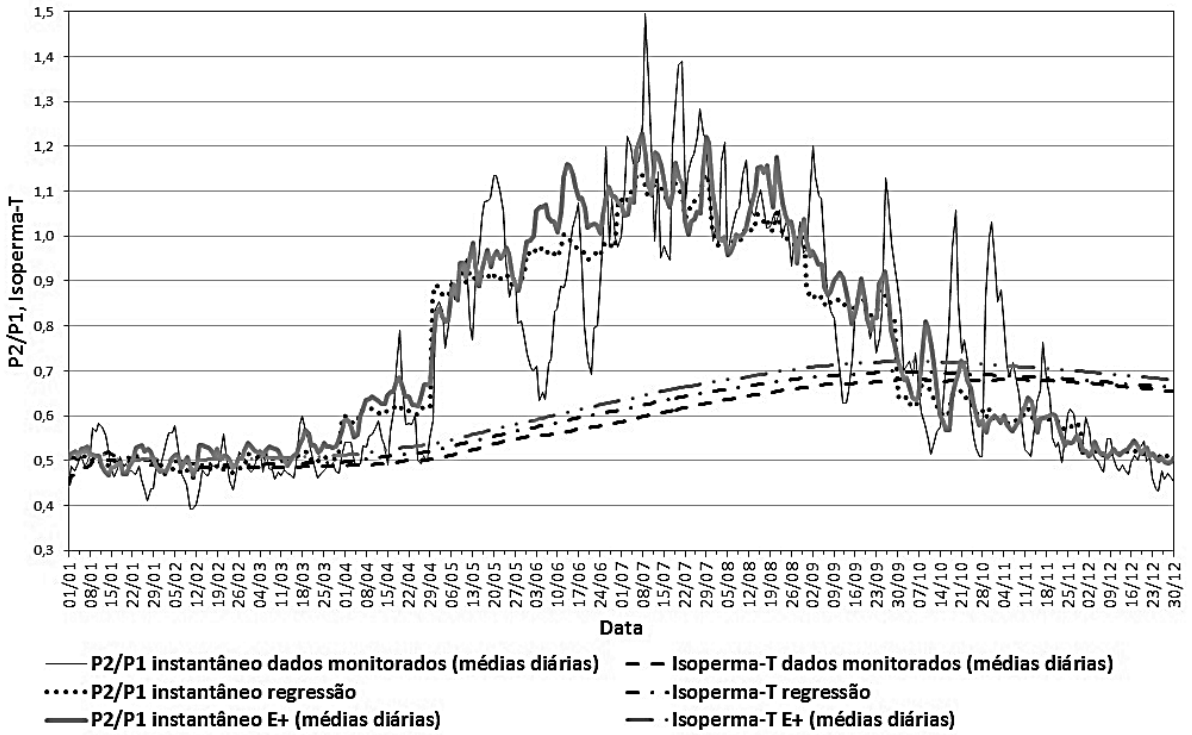


Figura 116 – Capela da Ceia – comparação entre taxas de permanência instantâneas (*P2/P1*) e ponderadas *(isoperma-T)* calculadas pela metodologia de Sebera, com base nos dados monitorados e simulados (*E* = 25Kcal/mol).

Na Figura 116 verifica-se que as taxas de permanência (*P2/P1*) obtidas por meio dos modelos preditivos e da simulação no *Energy Plus* © são consistentes com os valores calculados com base nos dados monitorados. Em virtude dos desvios quadráticos médios obtidos na comparação das variáveis simuladas com as variáveis medidas serem relativamente pequenos (vide Tabela 10), verifica-se que as figuras 114, 115 e 116 apresentam distribuições semelhantes às da Figura 107. Os valores de *Isoperma-T* também ficaram centrados em torno de 0,6 ao longo do ano.

A Figura 117 mostra os diagramas de dispersão das taxas de permanência instantâneas (*P2/P1*) calculadas pela metodologia de Sebera, com base nos dados monitorados e nos resultados das simulações por regressão linear múltipla e no programa *Energy Plus* ©.

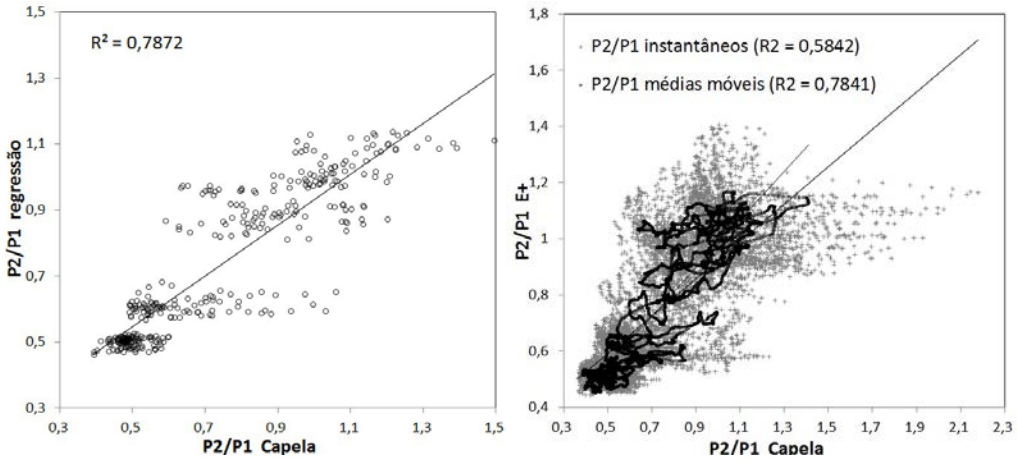


Figura 117 – Capela da Ceia – diagramas de dispersão das taxas de permanência instantâneas *(P2/P1*) calculadas pela metodologia de Sebera, com base nos dados monitorados e nos resultados das simulações por regressão linear múltipla (esquerda) e no programa *Energy Plus* © (direita).

A análise dos resultados acima indica que ambas as ferramentas de simulação - modelo preditivo e programa *Energy Plus* © - foram razoavelmente adequadas para o cálculo das isopermas de Sebera para o caso em estudo, apresentando coeficientes de determinação acima de 0,78.

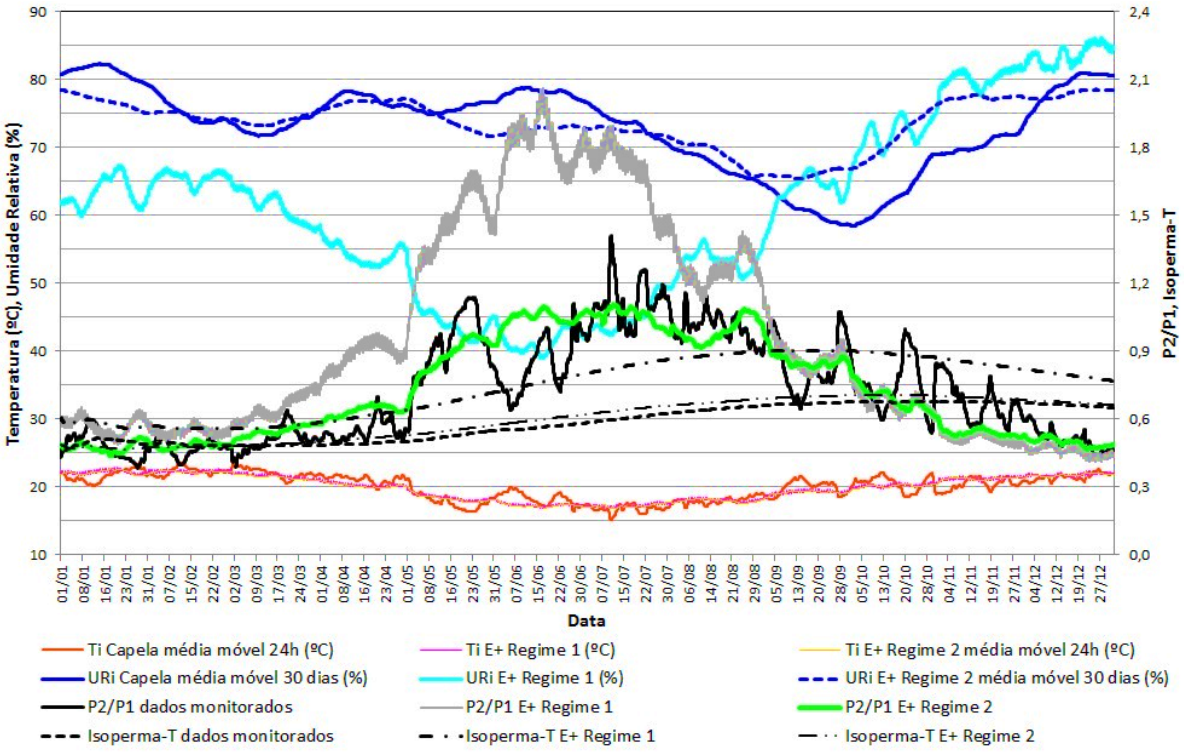


Figura 118 – Capela da Ceia – comparação entre as taxas de permanência instantâneas (*P2/P1*) e ponderadas (*isoperma-T*) calculadas pela metodologia de Sebera, com base nos dados monitorados simulados para regimes de ventilação 1 e 2 (*E* = 25Kcal/mol).

A Figura 118 compara o impacto, sobre as taxas de permanência (*P2/P1*) obtidas pela metodologia de Sebera, dos regimes de ventilação 1 e 2, simulados no *Energy Plus* © visando a melhoria das condições de conservação, descritos anteriormente nas seções 4.6.2.3 e 5.2.2.3.

Confirmando a análise da Figura 74, verifica-se, na Figura 118, que a desumidificação propiciada pelo Regime 1 aumentaria significativamente as taxas de permanência, principalmente no inverno, quando esse aumento seria da ordem de 300%., em termos de permanências instantâneas, e 50%, em termos da *isoperma-T*.

Não obstante esse aumento fosse benéfico do ponto de vista da diminuição dos riscos de deterioração química, poderia, em contrapartida, aumentar os riscos de deterioração físico-mecânica, uma vez que seria atingida uma umidade mínima de 40%, bem abaixo da média móvel monitorada na Capela e do limite mínimo de 60% adotado a partir dos dados monitorados. Cabe também destacar que a UR_i simulada sofreria um aumento no período de primavera-verão, em relação à UR_i monitorada, com consequente diminuição das taxas de permanência.

Por outro lado, o Regime 2 diminuiria os riscos de deterioração físico-mecânica, na medida em que diminui a amplitude de variação da *UR*, mas não acarretaria melhoria nas taxas de permanência, relacionadas à deterioração química.

b. Metodologia de Michalski (LM)

A Figura 119 compara as taxas de permanência instantâneas (*LM*) e ponderadas pelo efeito cumulativo do tempo (*LM-T*) calculadas pela metodologia de Michalski, plotadas juntamente com os valores de T_i e UR_i obtidos por simulação no programa *Energy Plus* © para a Capela da Ceia. Já a Figura 120 apresenta resultados equivalentes, obtidos por meio do modelo preditivo por regressão linear múltipla. Ambas as figuras mostram também os limites da classificação de risco baseada nos valores de *LM*, proposta por MARTENS (2012, p. 108).

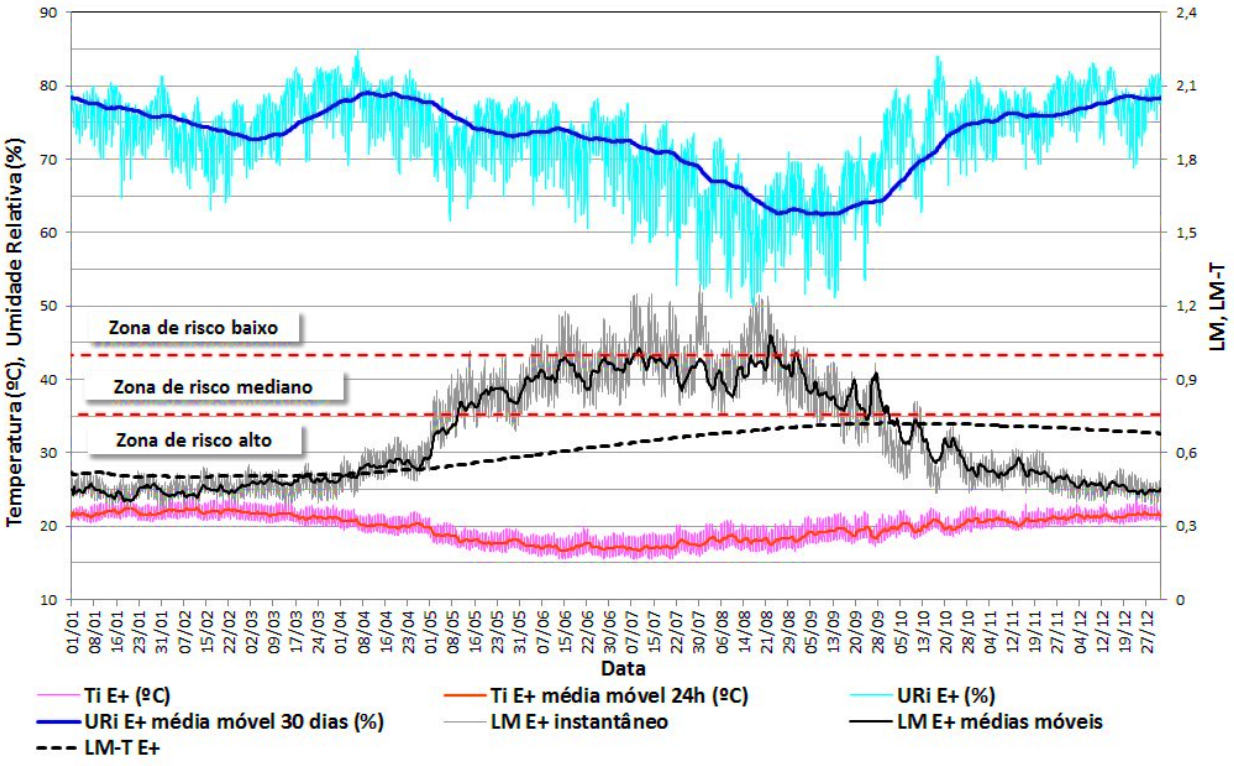


Figura 119 – Capela da Ceia – T_i e UR_i simuladas no programa *Energy Plus* © *versus* taxas de permanência instantâneas (*LM*) e ponderadas *(LM-T)* resultantes pela metodologia de Michalski (E = 25Kcal/mol).

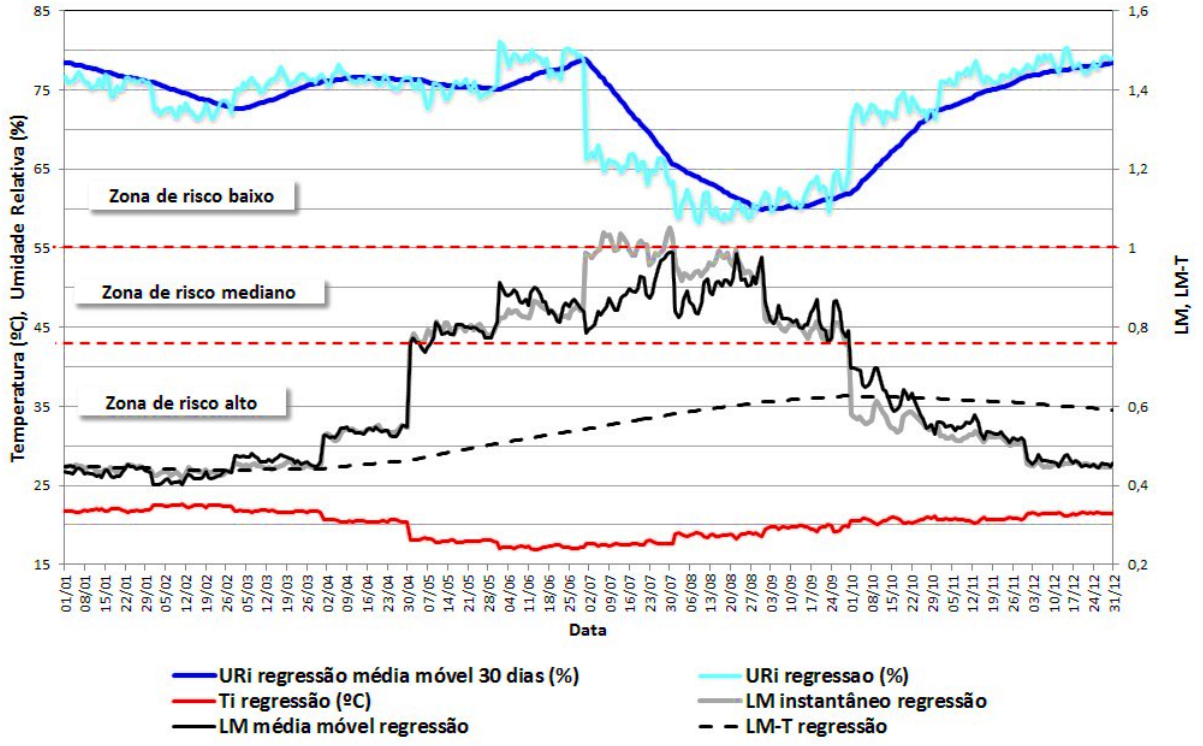


Figura 120 – Capela da Ceia – T_i e UR_i calculadas pelo modelo preditivo por regressão linear múltipla *versus* taxas de permanência instantâneas (*LM*) e ponderadas (*LM-T*) resultantes pela metodologia de Michalski (E = 25Kcal/mol).

Cabe destacar que na Figura 120 os dados resultantes do modelo de regressão linear múltipla já representam médias diárias, não sendo necessário calcular uma média móvel das 24h anteriores para a temperatura.

Verifica-se que as taxas de permanência (*LM*) calculadas pela metodologia de Michalski, mostradas nas figuras 119 e 120 são ligeiramente inferiores às calculadas pela metodologia de Sebera, mostradas nas figuras 114 e 115 respectivamente, e apresentam a mesma distribuição.

A Figura 121 compara as taxas de permanência instantâneas (*LM*) e ponderadas pelo efeito cumulativo do tempo (*LM-T*), calculadas pela metodologia de Michalski para a Capela da Ceia, com base em T_{imed} e UR_{imed} monitoradas e simuladas.

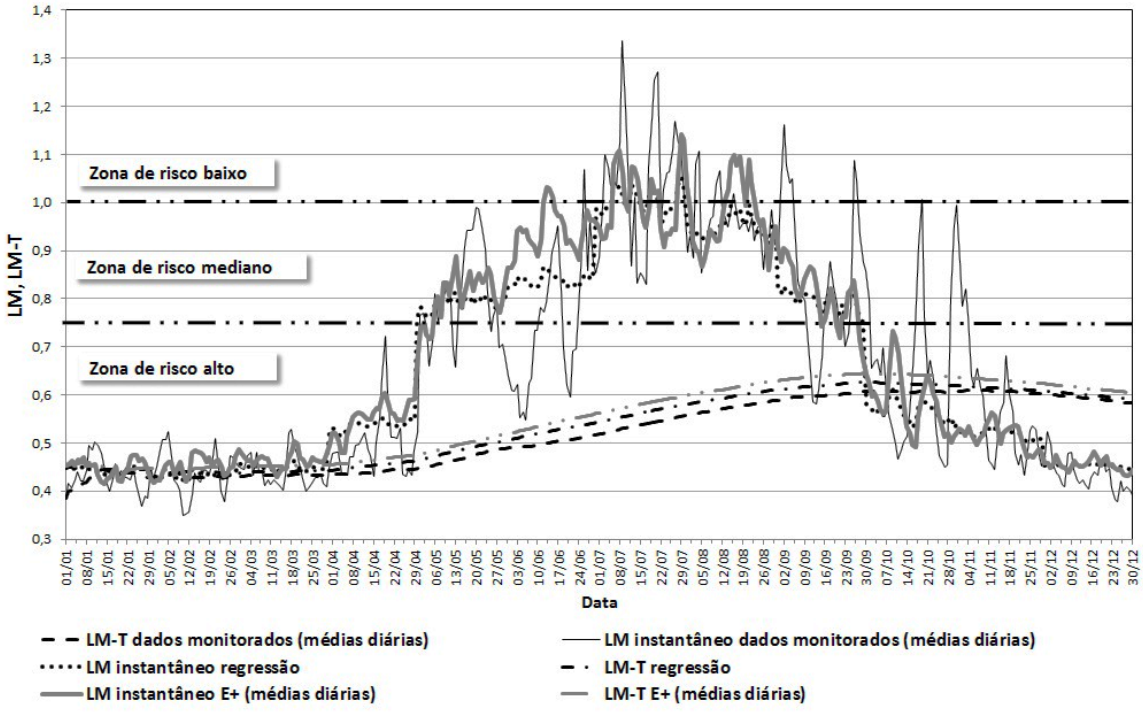


Figura 121 – Capela da Ceia – comparação entre as taxas de permanência instantâneas (*LM*) e ponderadas (*LM-T*), calculadas pela metodologia de Michalski, com base nos dados monitorados e simulados (*E*=25Kcal/mol).

Por inspeção visual da Figura 121, verifica-se que as taxas de permanência (*LM*) calculadas pela metodologia de Michalski, obtidas por meio dos modelos preditivos e da simulação no *Energy Plus* © são coerentes com os valores calculados com base nos dados monitorados. Verifica-se ainda que as distribuições observadas nas figuras 119, 120 e 121 são similares às da Figura 108.

A Figura 122 mostra os diagramas de dispersão das taxas de permanência instantâneas (*LM*) calculadas pela metodologia de Michalski com base nos dados monitorados e simulados por meio dos modelos preditivos e do programa *Energy Plus* ©:

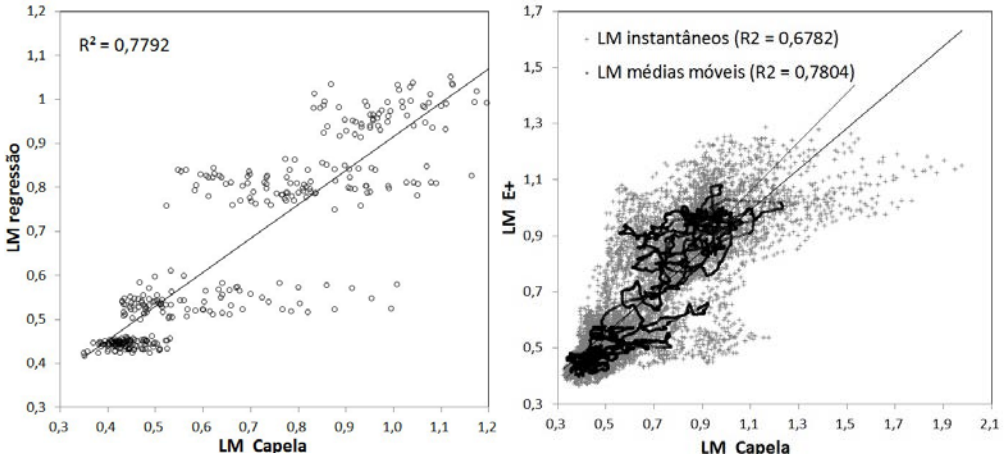


Figura 122 – Capela da Ceia – diagramas de dispersão das taxas de permanência instantâneas (*LM*) calculadas pela metodologia de Michalski, com base nos dados monitorados e nos resultados das simulações por regressão linear múltipla (esquerda) e no programa *Energy Plus* © (direita).

A análise dos resultados acima indica que ambas as ferramentas de simulação (modelo preditivo e *Energy Plus* ©) foram razoavelmente adequadas para o cálculo das isopermas de Michalski para o caso em estudo, apresentando coeficientes de determinação em torno de 0,78.

A Tabela 22 apresenta os índices de desempenho da Capela com relação aos limites de risco em termos de *LM*, propostos por MARTENS (2012, p. 108), mostrados na Figura 121:

Tabela 22 – Capela da Ceia – índices de desempenho (%) com relação aos limites de *LM* propostos por MARTENS (2012), com base nos dados simulados.

Métrica / zona	**Risco alto (*LM* ≤ 0,75)**	**Risco mediano (0,75<*LM*≤1)**	**Risco baixo (*LM* > 1)**
LM instantâneo dados monitorados (médias diárias)	64,7	25,8	9,9
LM instantâneo regressão	58,1	38,1	3,8
LM instantâneo *Energy Plus* (médias diárias)	60,8	31,5	7,7
LM-T dados monitorados (médias diárias)	100,0	-	-
LM-T regressão	100,0	-	-
LM-T Energy Plus (médias diárias)	100,0	-	-

A Figura 123 compara o impacto, sobre as taxas de permanência instantâneas (*LM*) e ponderadas *(LM-T),* obtidas pela metodologia de Michalski, dos regimes de ventilação 1 e 2, simulados no *Energy Plus* © visando a melhoria das condições de conservação, descritos anteriormente nas seções 4.6.2.3 e 5.2.2.3:

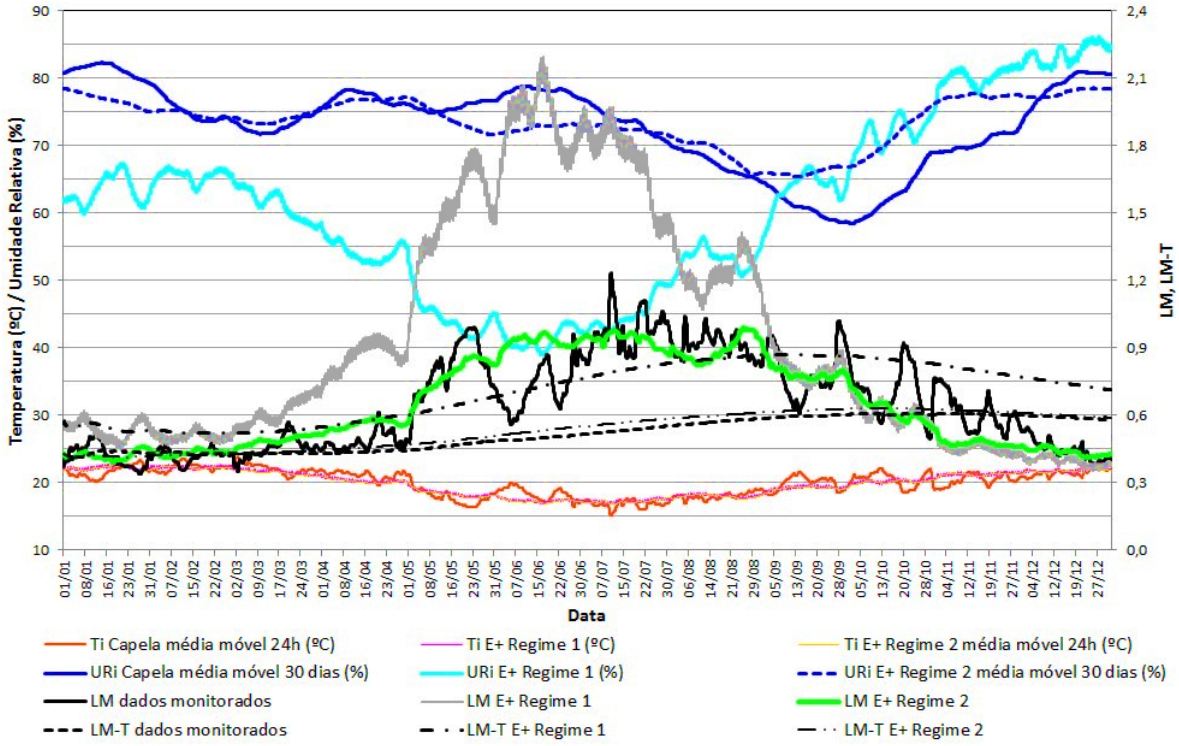


Figura 123 – Capela da Ceia – comparação entre as taxas de permanência instantâneas (*LM*) e ponderadas (*LM-T),* calculadas pela metodologia de Michalski, com base nos dados monitorados e simulados para os regimes de ventilação 1 e 2 (*E* = 25Kcal/mol).

Os dados mostrados na Figura 123 reforçam a análise da Figura 118, apresentando a mesma distribuição de variáveis. O aumento nas taxas de permanência instantâneas calculado pela metodologia de Michalski (*LM*) chegaria a 400% se adotada a vedação das aberturas de ventilação permanente da Capela (Regime 1).

Conclui-se que, para efeitos práticos de análise de resultados de monitoramento ambiental ou de simulações computacionais, os resultados obtidos por meio das isopermas de Sebera não são significativamente diferentes dos resultados obtidos por meio das isopermas de Michalski, podendo-se esperar respostas, senão equivalentes, muito próximas de ambas as metodologias.

5.4.2.3. Índice de Preservação (IP) e índice de preservação ponderado pelo efeito cumulativo do tempo (IETP)

A Figura 124 compara os valores de $\boldsymbol{IP_{IPI}}$ e $\boldsymbol{IETP_{IPI}}$, calculados conforme a metodologia indicada na seção 4.8.3, plotados juntamente com T_i e UR_i, obtidas por simulação no *Energy Plus©:*

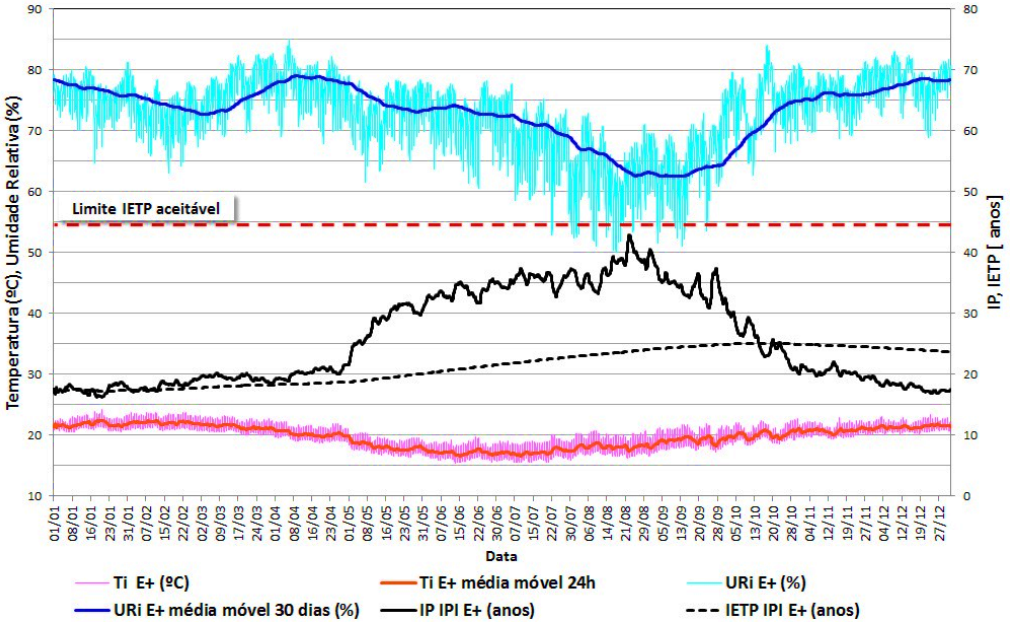


Figura 124 – Capela da Ceia – T_i e UR_i simuladas no *Energy Plus* © x IP_{IPI} e $IETP_{IPI}$.

Já Figura 125 compara os valores de $\boldsymbol{IP_{IPI}}$ e $\boldsymbol{IETP_{IPI}}$, calculados conforme a metodologia indicada na seção 4.8.3, plotados juntamente com T_{imed} e UR_{imed} obtidas por regressão linear múltipla:

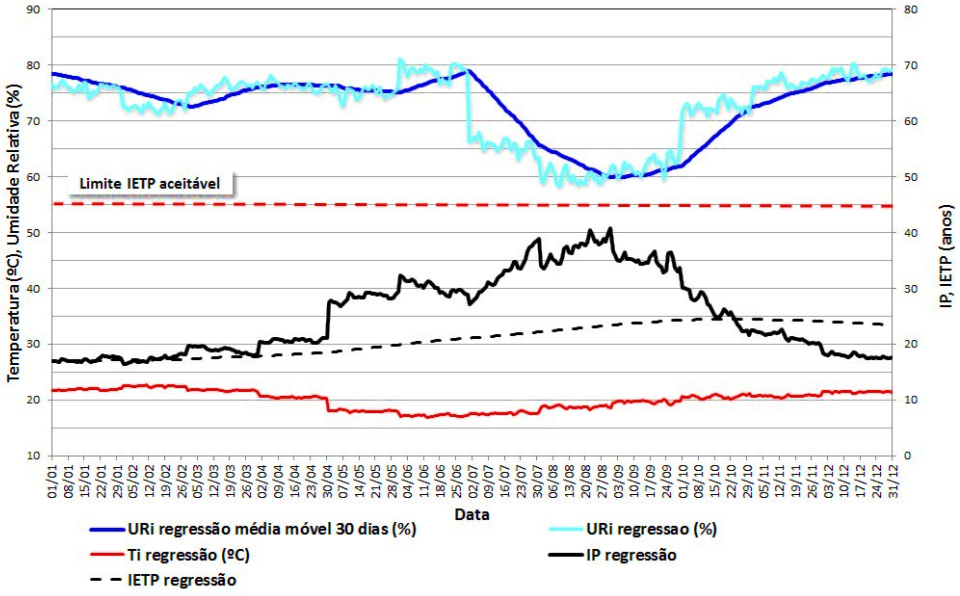


Figura 125 – Capela da Ceia – T_{imed} e UR_{imed} simuladas por regressão linear múltipla x IP_{IPI} e $IETP_{IPI}$.

A Figura 126 compara os valores de $\boldsymbol{IP_{IPI}}$ e $\boldsymbol{IETP_{IPI}}$, calculados com base nos dados monitorados e nos resultados das simulações computacionais. Para o cálculo foram utilizadas as médias diárias de temperatura e médias móveis de 30 dias anteriores para a umidade relativa.

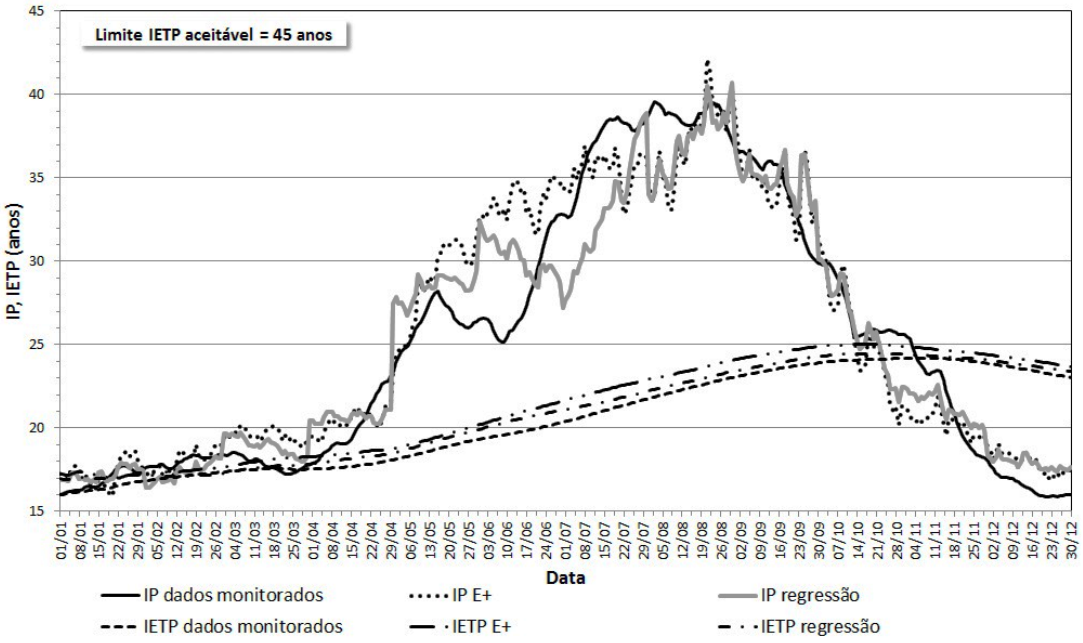


Figura 126 – Capela da Ceia – comparação IP_{IPI} e $IETP_{IPI}$ calculados com base nos dados monitorados e simulados.

A Figura 127 mostra os diagramas de dispersão dos valores de $\boldsymbol{IP_{IPI}}$, calculados com base nos dados monitorados e nos resultados das simulações computacionais:

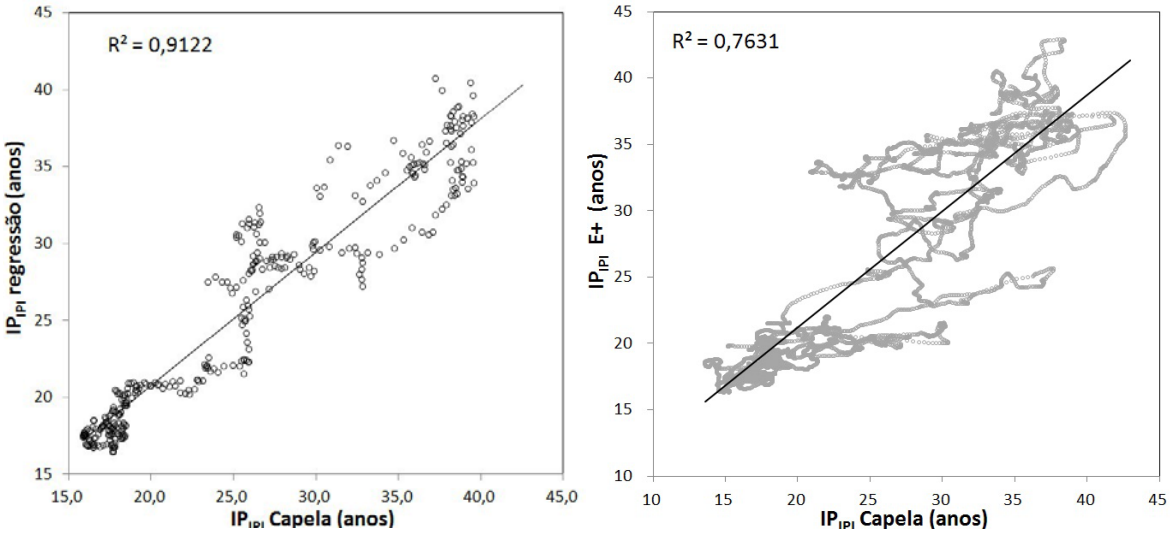


Figura 127 – Capela da Ceia – diagramas de dispersão de IP_{IPI} calculado com base nos dados monitorados e nos resultados das simulações por regressão linear múltipla (esquerda) e no programa *Energy Plus* © (direita).

Comparando-se as figuras 109 e de 124 a 127, verifica-se que os valores de IP_{IPI} e $IETP_{IPI}$ derivados dos resultados das simulações computacionais têm uma boa correspondência com os valores derivados dos dados monitorados, apresentando coeficientes de determinação entre 0,76 e 0,91. Isso indica que as ferramentas de simulação foram adequadas ao cálculo dessas métricas de preservação no caso em estudo.

5.4.2.4. Conteúdo de umidade nas condições de equilíbrio (EMC) e mudança dimensional (DC)

A Figura 128 mostra a distribuição de *EMC*, *ΔDC* e *DC* obtidos a partir dos resultados obtidos na simulação no *Energy Plus* ©:

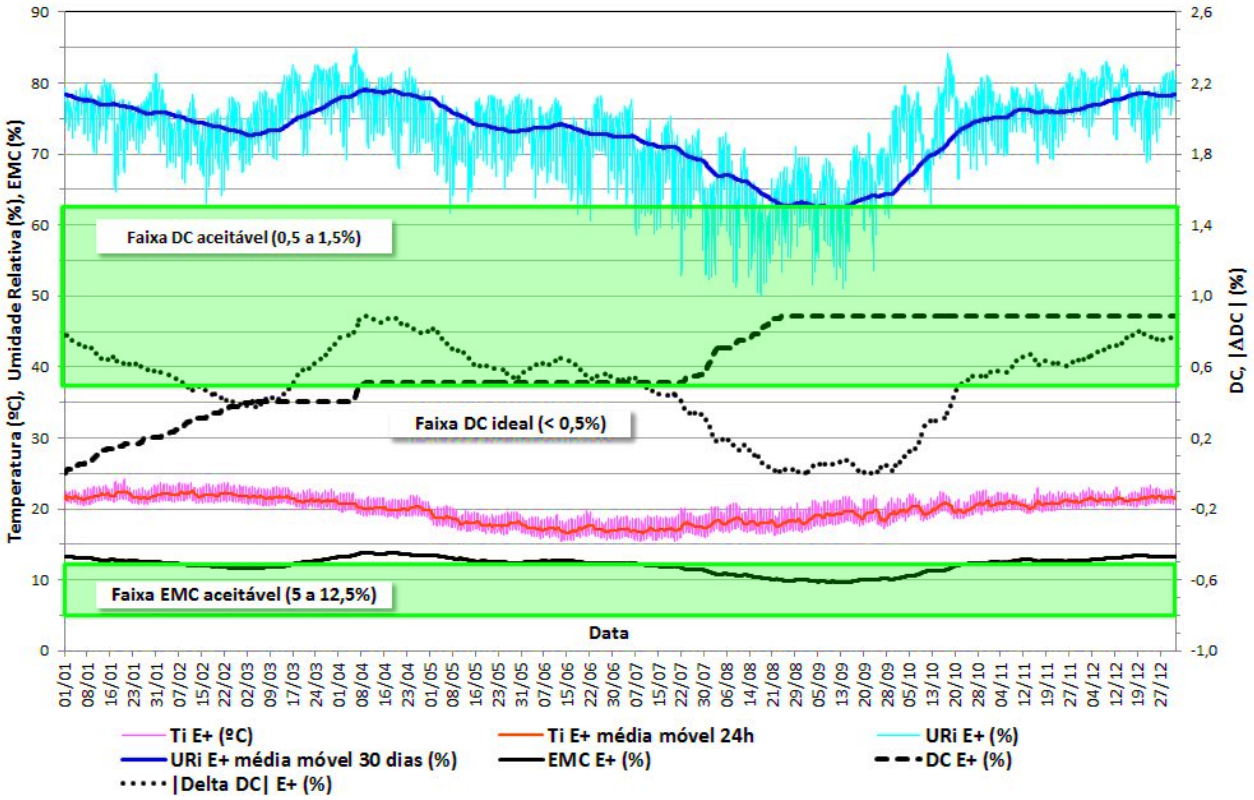


Figura 128 – Capela da Ceia – T_i e UR_i monitoradas *x EMC, ΔDC e DC* derivados dos resultados simulados no *Energy Plus* ©.

Já a Figura 129 mostra a distribuição de *EMC*, *ΔDC* e *DC* obtidos a partir dos resultados obtidos no modelo preditivo por regressão linear múltipla:

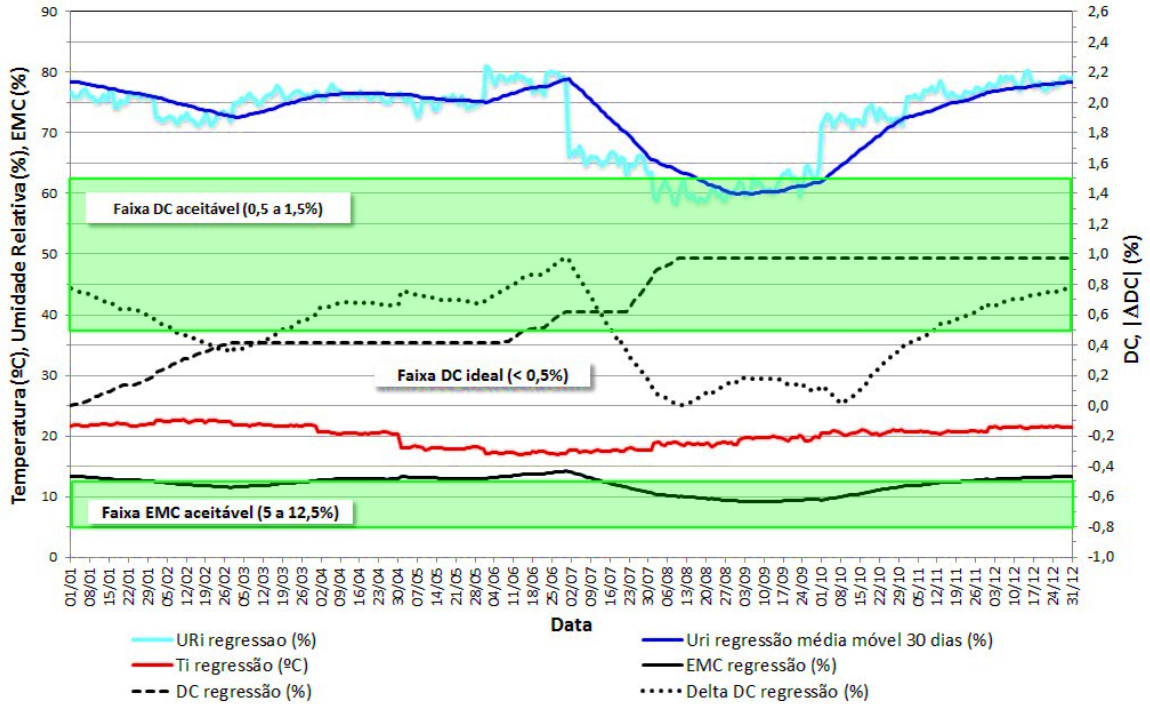


Figura 129 – Capela da Ceia – T_i e UR_i monitoradas *x EMC, ΔDC e DC* derivados dos resultados do modelo preditivo por regressão linear múltipla.

A Figura 130 compara os valores de *EMC*, *ΔDC* e *DC*, calculados com base nos dados monitorados e nos resultados das simulações computacionais.

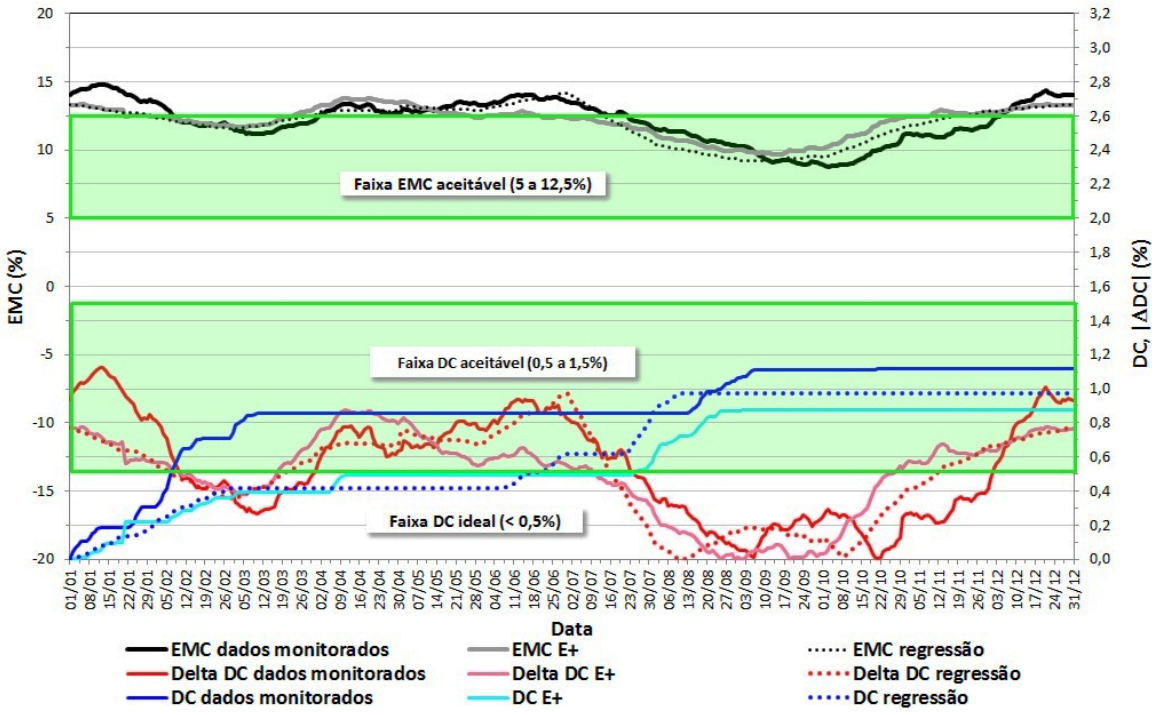


Figura 130 – Capela da Ceia – comparação de *DC*, *ΔDC* e *EMC* calculados com base nos dados monitorados e simulados.

A Figura 131 mostra os diagramas de dispersão dos valores de *EMC* e *ΔDC*, calculados com base nos dados monitorados e nos resultados das simulações computacionais:

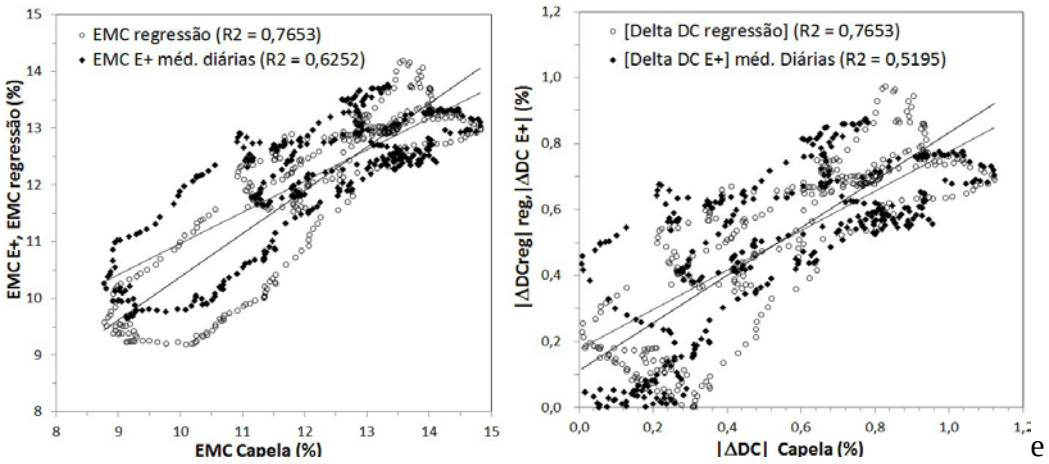


Figura 131 – Capela da Ceia – diagramas de dispersão de *EMC* (esquerda) e *ΔDC* (direita) calculados com base nos dados monitorados e simulados.

A Tabela 23 compila os índices de desempenho com relação aos limites propostos pelo IPI para as métricas DC e *EMC*, calculados com base nos dados monitorados e nos resultados das simulações computacionais:

Tabela 23 – Capela da Ceia – índices de desempenho (%) com relação aos limites de *DC* e *EMC*.

Categoria de risco / Dados	Critérios	Dados monitorados	E+	Modelo preditivo
Categorias originais IPI				
Bom	min*EMC* ≥ 5% E Max*EMC* ≤ 12,5% E DC < 0,5%	0	0	0
Aceitável	min*EMC* ≥ 5% E Max*EMC* ≤ 12,5% E 0,5% ≤ DC ≤ 1,5%	0	0	0
Risco	min*EMC* < 5% OU Max*EMC* > 12,5% OU DC > 1,5%	100,0	100,0	100,0
Categorias revisadas				
DC ideal	DC < 0,5%	10,1	56,6	45,5
DC aceitável	0,5% ≤ DC ≤ 1,5%	89,6	43,8	54,5
EMC aceitável	5% ≤ *EMC* ≤ 12,5%	51,5	55,9	51,5
DC ideal + *EMC* aceitável	DC < 0,5% E 5% ≤ *EMC* ≤ 12,5%	0	26,6	15,9
DC aceitável + *EMC* aceitável	0,5% ≤ DC ≤ 1,5% E 5% ≤ *EMC* ≤ 12,5%	51,5	29,3	35,6

Cabe lembrar que a métrica *DC* é cumulativa, conforme indicado por NISHIMURA (s.d.), e é calculada tomando-se a maior amplitude observada entre os valores máximo e mínimo absolutos de *ΔDC* ao longo do período de monitoramento (eq. 51 do Apêndice A). Para sua interpretação observam-se ainda os valores máximo e mínimo absolutos de *EMC*, registrados ao longo do período de monitoramento, conforme critérios mostrados na Tabela 23 e no Quadro 5 do Apêndice A.

Essa interpretação é coerente com o conceito de umidade “provada” pelos materiais, discutido anteriormente. Contudo, os resultados acima demonstram que as métricas *EMC* e *DC*, se interpretadas de acordo com os critérios propostos pelo IPI, resultariam em indicação de risco durante todo o período de monitoramento, tanto para os dados monitorados quanto para os resultados derivados das simulações computacionais, ainda que ao longo do ano, os valores de *DC* e *EMC* fiquem dentro dos limites aceitáveis. Isso acontece porque os valores de *maxEMC* ocorrem nas primeiras semanas de janeiro, acima da faixa aceitável.

Foram então recalculados os índices de desempenho mostrados na Tabela 23, considerando-se os limites propostos pelo IPI aplicados não apenas aos valores máximo e mínimo absolutos, mas também aos valores dinâmicos, de *DC* e *EMC*, separada e simultaneamente, para cada intervalo de tempo do monitoramento.

Procedendo assim, verifica-se que os valores de *DC* e *EMC* derivados das simulações computacionais apresentam uma boa correspondência com os valores derivados do monitoramento ambiental, indicando a adequação das ferramentas de simulação (modelo preditivo e programa *Energy Plus* ©) para obtenção dessas métricas de preservação, no caso em estudo.

Verificou-se ainda que a interpretação de *DC* e *EMC* segundo os critérios indicados pelo IPI, considerando os valores de pico de *EMC*, produziram indicadores de risco que se contrapõem às análises dos ciclos de flutuação de temperatura e umidade relativa apresentadas anteriormente. A análise dos valores instantâneos de *EMC* calculados a partir das médias móveis de T_i e UR_i, por meio de índices de desempenho, como os apresentados nas categorias revisadas da Tabela 23, mostrou-se mais coerente com os conceitos embutidos nas métricas *DC* e *EMC*, para o caso em estudo.

5.4.2.5. Fator de risco de mofo (MRF)

A Figura 132 compara a distribuição do *MRF* calculado a partir T_i *e* UR_i monitoradas e simuladas no programa *Energy Plus* ©. Não foi efetuada a comparação com os dados resultantes do modelo preditivo por regressão linear múltipla porque eles representam médias diárias, não possibilitando a verificação da ausência de condições de germinação por pelo menos 24h, procedimento que demanda dados horários.

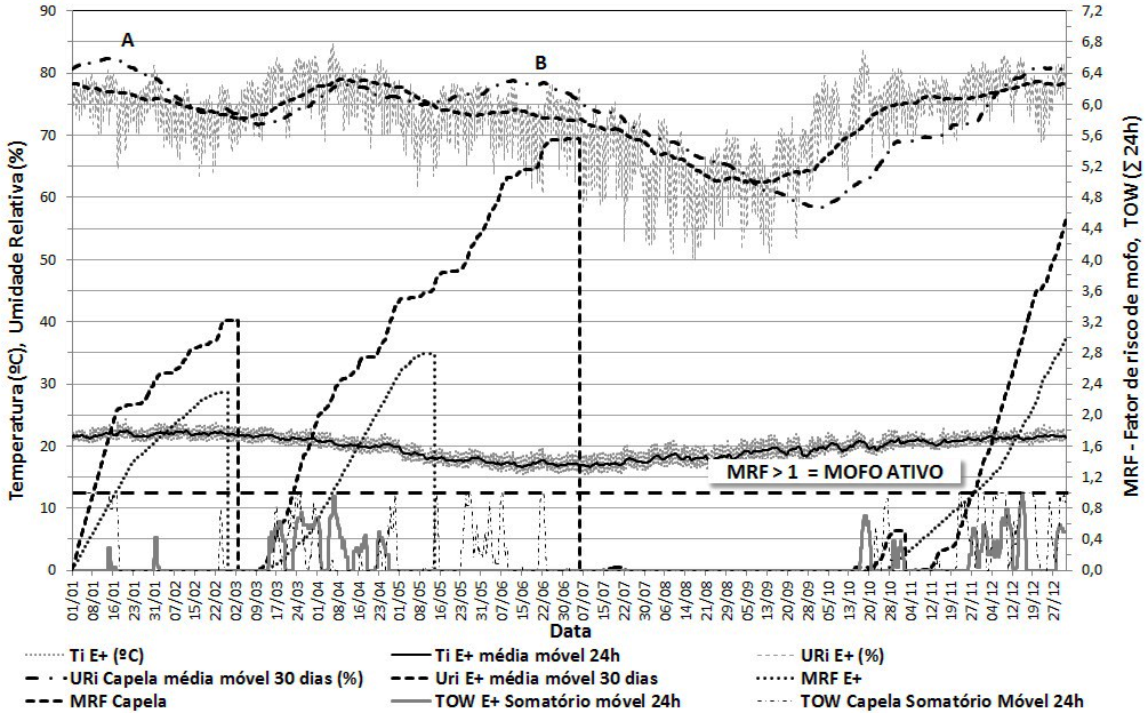


Figura 132 – Capela da Ceia – T_i e UR_i monitoradas x T_i e UR_i simuladas no E*nergy Plus* © x *MRF* e *TOW* calculados com base nos dados monitorados e simulados.

Verifica-se que os valores de *MRF* e *TOW* estimados com base em T_i *e* UR_i simuladas no *Energy Plus* © são inferiores aos valores derivados dos dados monitorados na Capela. Embora os desvios quadráticos médios entre as umidades relativas monitoradas e simuladas (vide Tabela 10) sejam razoavelmente pequenos (vide análise dos DQM e coeficientes de determinação resultantes no item 5.2.2 ou por exemplo, as diferenças entre as médias móveis de *UR* monitorada e simulada nos pontos A e B mostrados na Figura 132), eles foram suficientes para induzir a erros significativos na estimação de *MRF* com base nos dados simulados no *Energy Plus* ©. O DQM entre os *MRF* monitorados e simulados foi 0,49, correspondendo a cerca de 33% do *MRF* máximo monitorado. Já o DQM entre os *TOW* monitorados e simulados foi 0,35, correspondendo a um desvio de 35%, já que a fração máxima desse índice é igual a 1.

Tais evidências indicam que o método de cálculo de *MRF* e *TOW* é muito sensível às flutuações de *UR*, o que pode ser explicado pela proximidade das isopletas de Ayerst (Figura 151 do Apêndice A). Indicam ainda que a simulação com o *Energy Plus* ©, não obstante tenha resultado em desvios quadráticos médios aceitáveis para as vaiáveis simuladas, não se mostrou adequada para a estimação dessas métricas, no caso em estudo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho insere-se no contexto de uma área do saber recentemente reconhecida e em consolidação: a Conservação Preventiva, cujo estado da arte se mescla de forma abrangente ao da Gestão de Riscos. A pesquisa visou contribuir para o progresso do acervo metodológico e conceitual que embasa a prática profissional de conservadores-restauradores e outros profissionais envolvidos com a preservação do Patrimônio Cultural no Brasil. Nesse sentido, esforçou-se para transpor toda uma gama de linguagens, abordagens e métodos, característicos das Ciências Exatas para o campo ampliado da Ciência da Conservação. Cabe destacar que esse esforço envolveu uma extensa revisão e compilação selecionada de literatura das diversas áreas específicas abarcadas pelos temas estudados, resultando testes e adaptações metodológicas e até mesmo o desvendar de procedimentos que não estavam claramente explicados nas fontes originais.

Avaliação crítica da metodologia e resultados

A análise integrada dos ciclos de flutuação de temperatura e umidade relativa indica que a Capela da Ceia não impõe riscos significativos às esculturas nela abrigadas, em termos de **danos físico-mecânicos**. Essa evidência foi também confirmada por meio da análise das métricas *DC* e *EMC*, que permanecem dentro dos limites considerados aceitáveis pelo IPI durante frações significativas do ano: 89,6 e 51,5% respectivamente.

Quanto aos índices de desempenho investigados, foram analisados três métodos distintos para o cálculo das flutuações diárias de temperatura e umidade relativa, verificando-se que o cálculo por meio da amplitude diária foi o que resultou nos limites menos restritivos e compatíveis com os limites propostos pela ASHRAE. Analisando as flutuações de temperatura, verificou-se que a Capela poderia ser classificada nas classes AA, A ou B no sistema de classificação da ASHRAE, o que provavelmente se deve à grande inércia térmica do edifício. Ainda em termos das flutuações de temperatura, a Capela atende razoavelmente os requisitos das normas UNI 10829 e UNI 10969, com algumas ressalvas explicitadas na análise dos resultados.

A análise das flutuações de umidade relativa mostrou que a porosidade e capacidade de tamponamento das superfícies internas e a inércia térmica das envoltórias não permitem grandes amplitudes de variação de *T* e *UR* no interior da Capela. O limite de flutuação

indicado pela metodologia Camuffo-Pagan resultou próximo do limite prescrito para as classes AA e A da ASHRAE. Porém, considerando somente as flutuações de umidade relativa, a Capela poderia ser classificada nessas classes menos de 25% do tempo, sendo mais adequadamente classificada nas classes B, C ou D. As evidências acima demonstram a necessidade de uma interpretação criteriosa dos limites propostos no sistema de classificação da ASHRAE.

Se a interpretação da variação de *DC* e *EMC* ao longo do ano for feita segundo os critérios indicados pelo IPI, considerando **valores de pico de *EMC***, obtem-se indicadores de risco que se opõem à análise acima. A análise dos **valores instantâneos de *EMC* calculados sobre as médias móveis de *T* e *UR*, por meio de índices de desempenho**, mostrou-se mais coerente com os conceitos embutidos nas métricas *DC* e *EMC*, para o caso em estudo. BICHLMAIR et al. (2013) também atestaram a conveniência do uso deste tipo de média nos casos que investigaram.

A metodologia proposta por BRATASZ (s.d.), BRATASZ et al. (2007a) e KOZŁOWSKI (2010) para determinação de critérios-limite de flutuações de umidade relativa, se mostrou bastante interessante para aplicação no caso em estudo, por concatenar limites variáveis de *UR*, com relação ao ciclo sazonal. Os limites de flutuação de *UR* calculados por essa metodologia abrangem os valores monitorados na Capela durante mais de 70% das horas do ano. Segundo os critérios apontados por KOZŁOWSKI (2010), tais limites poderiam ser adotados com base numa variação de ±10% do ciclo sazonal. Nesse caso, o índice de desempenho da Capela passaria a 90,9% das horas do ano. BICHLMAIR et al. (2013, p. 441) ressaltam que o método da norma EN 15757 (UNI, 2010) adaptado por Bratasz e Kozlowski oferece uma avaliação combinada de flutuações temporalmente curtas e longas, mas que ainda não está bem estabelecido a que materiais o método se aplica, bem como se ele é suficiente para avaliar o potencial de danos. O índice de desempenho resultante da aplicação da metodologia Camuffo-Pagan (CAMUFFO e PAGAN, 2004; CAMUFFO et al., 2002, 2004b) ao caso em estudo resultou muito próximo do índice de desempenho obtido com os limites de temperatura e umidade relativa adotados neste trabalho (*T:* 16 a 25ºC / *UR:* 60 a 75%).

Para avaliar os **riscos de deterioração química** foram utilizadas taxas de permanência calculadas segundo a metodologia de Sebera e Michalski, com valores instantâneos e ponderados pelo efeito cumulativo do tempo (no presente trabalho denominados *isoperma-T* e *LM-T*), bem como os índices *IP* e *IETP*. Constatou-se que, para efeitos práticos de análise de

resultados de monitoramento ambiental ou de simulações computacionais, pode-se esperar respostas senão equivalentes, muito próximas das metodologias de cálculo de isopermas de Sebera e de Michalski.

Verificou-se que as taxas de permanência instantâneas alcançadas no período de inverno são de duas a seis vezes maiores que as do período de verão, localizando-se na zona definida por MARTENS (2012) como sendo “de alto risco”, por cerca de 65% das horas do ano. Já de acordo com os limites estabelecidos pelo IPI, a métrica *IETP* abaixo de 45 anos indica a presença de riscos de deterioração química na Capela durante todo o ano.

Conforme se enfatizou na discussão desses resultados, o conceito embutido nas metodologias utilizadas está embasado no mecanismo de hidrólise da celulose do papel e de filmes de acetato de celulose, indicando a necessidade de cautela na aplicação das indicações ao caso em estudo. Uma hipótese a ser investigada com mais detalhes por pesquisas futuras é a relação dos problemas de conservação das esculturas com fatores antrópicos, por exemplo, na escolha de materiais e técnicas empregados nas intervenções. Um aspecto interessante a considerar, nessa discussão, seria a possibilidade de substituição e/ou o impacto de intervenções de restauração ou conservação curativa na camada pictórica das esculturas que resultem no aumento de sua estabilidade química, resistência mecânica, e, consequentemente permanência. Tal consideração, entretanto, além de envolver questões da Química, entraria no mérito de debates teóricos e filosóficos pertinentes ao campo da Conservação-Restauração, que extrapolam os objetivos da presente pesquisa.

Quanto aos **riscos de deterioração biológica**, os resultados obtidos indicaram que há condições para crescimento de mofo na maior parte do ano, entre novembro e julho, devido aos altos níveis de umidade relativa. No período mais seco, de inverno-primavera, esse risco diminui. Essa evidência foi confirmada pelos resultados das simulações computacionais, que resultaram, entretanto, valores estimados de *MRF* menores que os valores calculados com base nos dados monitorados, demonstrando que o método de cálculo de *MRF* e *TOW* é bastante sensível às flutuações de *UR*.

A ventilação natural ou forçada constitui uma estratégia potencial para o gerenciamento ambiental e para a melhoria das condições de conservação de coleções em climas tropicais, cabendo lembrar a importância dos cuidados para evitar infestações biológicas por insetos. A utilização de sistemas ativos de climatização não deve ser

considerada uma solução *a priori* para os problemas de gerenciamento ambiental de coleções. Os resultados do monitoramento ambiental em campo indicaram um significativo potencial de aplicação da ventilação natural ou forçada para desumidificação, no caso em estudo, em torno de 20% das horas do ano. Cabe enfatizar o aspecto sustentável desta estratégia, que pode ser incorporada a outros edifícios que abrigam coleções, por meio de sistemas eficientes do ponto de vista energético, como por exemplo, igrejas.

Quanto aos resultados das simulações computacionais, os desvios médios quadráticos entre os valores monitorados e simulados indicam que tanto o modelo preditivo por regressão linear múltipla quanto a simulação no programa *Energy Plus* © foram bem sucedidos na previsão do regime climático interno. Tal evidência indica que tais ferramentas são adequadas à previsão de regimes climáticos internos, ressalvados os aspectos discutidos na análise dos resultados. A evidência aponta ainda para o potencial de aplicação dessas ferramentas em outros estudos com a mesma finalidade no campo da Ciência da Conservação, como ferramentas diagnósticas preditivas em estudos de gestão de riscos, diagnósticos de problemas e tomadas de decisão quanto a diretrizes de intervenção.

A comparação entre os valores das métricas de preservação derivadas dos dados monitorados com os valores derivados das simulações indicaram que, em geral, tanto o modelo preditivo por regressão linear múltipla quanto o *Energy plus* ©, se mostraram adequados à obtenção das métricas estudadas, exceto em duas situações: (i) previsão dos índices de desempenho pelas metodologias Bratasz-Kozlowski e Camuffo-Pagan, porque os desvios médios quadráticos resultantes são da mesma ordem de grandeza dos limites considerados para o cálculo dos índices; (ii) previsão dos índices *MRF* e *TOW*, porque os desvios médios quadráticos entre valores monitorados e simulados chegaram a 35% dos valores monitorados.

O *Energy Plus* © foi usado para testar dois regimes hipotéticos de ventilação na Capela, o primeiro com supressão da ventilação e o segundo com o seu controle em função da entalpia externa, e insuflação somente nos horários favoráveis à desumidificação. Os resultados demonstram que o primeiro regime aumentaria significativamente, de 50 a 400%, as taxas de permanência, diminuindo os riscos de deterioração química. Porém, esse regime atingiria níveis excessivamente baixos de *UR* no período de transição outono-inverno-primavera e níveis mais altos que os monitorados, no verão. Já o segundo regime de ventilação reduziria significativamente as amplitudes de variação de *T* e *UR*, e

consequentemente os riscos de danos físico-mecânicos às esculturas, sem aumentar, entretanto, as taxas de permanência em relação à deterioração química. Cabe destacar a conveniência, caso um dos regimes fosse implantado, de prevenir-se a entrada de insetos pelas tomadas de ventilação, por meio do uso de telas.

Por meio de simulações fluidodinâmicas do regime de ventilação natural, foi possível verificar que, adotando uma velocidade de referência de 2,2m/s (velocidade media do vento em Ouro Branco), as linhas de corrente no interior da Capela apresentam um padrão complexo, com baixas velocidades (máximas entre 0,1 e 0,2m/s), em virtude da ausência de ventilação cruzada. Essas velocidades máximas ocorrem perto da porta da Capela e os vórtices internos sofrem um discreto deslocamento cíclico, influenciados pela esteira de Von Karman que se forma externamente, à jusante do edifício. Identificaram-se como zonas potencialmente favoráveis à deposição de particulados e micro-organismos sobre as esculturas, o fundo da Capela, próximo à escultura do Cristo, bem como as porções posteriores das paredes e cúpula. À medida que a velocidade externa do vento aumenta – o que é menos frequente - essa zona tende a deslocar-se para a porção central da Capela.

Os resultados dos ensaios em túnel de vento se mostraram coerentes com o embasamento teórico-metodológico apresentado e com estudos similares encontrados na literatura específica, citados na análise apresentada. As evidências encontradas nas medições de coeficientes de pressão, de perfis de velocidade do vento, aplicação da técnica *PIV* e a comparação com métodos analíticos permitem considerar que as simulações fluidodinâmicas produziram resultados confiáveis.

Perspectivas de desenvolvimento da pesquisa a médio e longo prazo

Como indicações para a continuidade dessa linha de pesquisa no âmbito do LACICOR e sugestões para trabalhos futuros, cabe elencar:

(i) Desenvolvimento de um sistema integrado para gerenciamento ambiental de coleções incluindo sensores de temperatura e umidade relativa com transmissão *wireless*, permitindo acesso local e remoto aos dados processados, com derivação das métricas de preservação investigadas neste trabalho;

(ii) Correções e complementos à metodologia adotada no presente trabalho, incluindo: uso de técnicas de termografia, medição de fluxo de calor e difusão de umidade (BERNARDI,

2008, cap. 5), bem como aumento do número de sensores internos aos estudos de caso, possibilitando aquisição de dados mais abrangentes, com vistas a uma melhor descrição das condições de contorno nas simulações;

(iii) Ampliação do recorte conceitual adotado para incluir o estudo de métricas de preservação envolvendo a **incidência de radiação** sobre as coleções;

(iv) Aplicação da metodologia aos dados já levantados nos estudos de caso elencados inicialmente para a pesquisa: Museu do Diamante, em Diamantina; Museu da Cidade, em Governador Valadares e Casa da Memória do Vale do São Francisco, em Januária;

(v) Simulações fluidodinâmicas com redução do domínio considerado, ao nível das esculturas da Capela, utilizando os resultados das simulações realizadas neste trabalho e modelos tridimensionais gerados a partir da nuvem de pontos resultante do levantamento arquitetônico; Validação dos resultados em túnel de vento utilizando a técnica de *PIV*;

(vi) Simulações fluidodinâmicas com ampliação do domínio considerado, visando estudo da problemática de deposição de finos da mineração sobre o sítio do Santuário de Congonhas, considerado em sua escala urbana;

(vii) Estudo detalhado da probabilidade de penetração de gotículas de chuva pelas aberturas de ventilação permanente da Capela; monitoramento de fissurações nas esculturas e estudo de sua relação com as flutuações ambientais;

(viii) Comparação entre *EMC* e crescimento de mofo estimados pelos diferentes modelos estudados no Apêndice A;

(ix) Implementação das correções propostas por STRANG e GRATTAN (2009) ao desenho de isopermas sobre a carta psicrométrica;

(x) Elaboração de recomendações para dar suporte a decisões e estratégias de conservação preventiva de coleções nas diferentes zonas bioclimáticas de Minas Gerais, por meio de medições in loco representativas de condições de verão e inverno, bem como por meio de simulações computacionais, incluindo os dados já levantados em Diamantina, Governador Valadares e Januária, citados acima. O simulador de dados climáticos comentado na seção B.5 do Apêndice B pode ser usado em conjunto com o modelo preditivo investigado neste trabalho para espacialização de variáveis ambientais;

(xi) Aprofundamento de temas que foram abordados liminarmente na presente pesquisa, como conforto ambiental dos usuários e eficiência energética das edificações. Uma sequência interessante para a presente pesquisa seria um estudo do consumo e desempenho energético em museus brasileiros, incluindo considerações quanto ao uso de ventilação natural, sistemas ativos de climatização, inércia térmica dos edifícios e classificação no sistema de ranqueamento da ASHRAE nos casos investigados;

(xii) Discussão dos paradigmas envolvidos na conservação em função de alterações de usos e sistemas de climatização originais dos edifícios que abrigam coleções (PARK, 1999; TOLEDO, 2007), inclusive sob a perspectiva histórica;

(xiii) Simulações computacionais e validação laboratorial de: diferentes cenários de riscos, com cálculo das respectivas magnitudes; efeito de tamponamento de materiais de construção; efeito de mudanças climáticas sobre as condições de conservação; propagação de incêndios em dutos de ventilação (ALLARD et al., 1998, p. 186); propagação de contaminantes atmosféricos no interior dos edifícios; microclimas ao nível do mobiliário e embalagens.

Conclusões

Dentre os mecanismos de deterioração dependentes das condições microclimáticas da Capela da Ceia, investigados no presente trabalho por meio do estudo de métricas de preservação e simulações computacionais, verificou-se que os que apresentam o menor potencial de risco são os mecanismos de deterioração **físico-mecânicos**, relacionados às oscilações microclimáticas no interior da Capela. As metodologias de análise microclimática investigadas indicam que os riscos de **deterioração biológica** por microorganismos, são significativos, principalmente durante o verão, devido a elevação da temperatura e umidade relativa no interior da Capela. Verificou-se ainda a possibilidade de deposição de particulados sobre as esculturas, em função das baixas velocidades de circulação do ar interno. Embora as metodologias utilizadas apontem a presença de riscos de **deterioração química**, consideramos, com base na avaliação crítica apresentada, que a princípio tais riscos não são relevantes para a preservação das esculturas abrigadas na Capela, cabendo investigar com mais detalhes se eles podem estar relacionados a fatores antrópicos. Essas constatações são compatíveis com o histórico de condições de conservação e intervenções de conservação

curativa e restauração das esculturas registrado na literatura (ELIAS, 2000; OLIVEIRA, 2011).

De qualquer maneira, melhorias no gerenciamento ambiental de forma a manter as variáveis microclimáticas dentro das zonas de segurança discutidas neste trabalho, colaborariam para aumentar o intervalo entre eventuais intervenções de restauração ou conservação curativa nas esculturas. Outrossim, as evidências nos permitem afirmar que é altamente desaconselhável manter arquivos com acervos em papel em edifícios e ambientes com características microclimáticas semelhantes às da Capela da Ceia.

Apesar da demanda de uma carga significativa de conhecimentos e capacitação técnica específica, bem como de recursos computacionais consideráveis, em termos de máquinas e programas, que caracterizam as ferramentas de simulação computacional estudadas nesse trabalho como ferramentas de pesquisa acadêmica e desenvolvimento tecnológico, os resultados apontam para um grande potencial de aplicabilidade das simulações computacionais e métricas de preservação investigadas como ferramentas diagnósticas conceituais auxiliares ao gerenciamento ambiental de coleções, visando a sua conservação preventiva. Elas se inserem no âmbito transdisciplinar situado entre as várias áreas de conhecimento envolvidas.

Cabe ressaltar a praticidade do uso das métricas de preservação, na atividade cotidiana do conservador-restaurador envolvido com o gerenciamento ambiental de coleções. Suas especificidades são discutidas em detalhe no Apêndice A, podendo destacar-se dentre as vantagens de seu uso: (i) a integração de mecanismos de deterioração dinâmicos e complexos em índices simplificados; (ii) a facilidade de compreensão e comunicação de avaliações quantitativas padronizadas e reprodutíveis das condições ambientais; (iii) a comparação qualitativa de condições de conservação entre ambientes distintos ou de situações distintas em um mesmo ambiente (p. ex. ao longo do ano).

REFERÊNCIAS CITADAS

ABAHRI, K. et al. Contribution to analytical and numerical study of combined heat and moisture transfers in porous building materials. *Building and Environment,* v. 46, n. 7, p. 1354-1360, 2011. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132311000060 (Acesso em 24/09/2012).

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5422: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1985.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, l997.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. Anteprojeto disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/normalizacao/Termica_parte2_SET2004.pdf (Acesso em 16/08/2011)

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. Anteprojeto disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/normalizacao/Termica_parte3_SET2004.pdf (Acesso em 16/08/2011)

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9241-11 - requisitos ergonômicos para trabalho de escritórios com computadores. Parte 11 – orientações sobre usabilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2011a. Disponível em: www.inf.ufsc.br/~cybis/pg2003/iso9241-11F2.pdf (Acesso em 03/11/2013).

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10821: Esquadrias externas para edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2011b.

ADAM, R.S. Princípios do Ecoedifício. São Paulo: Aquariana, 2001, 160p. ISBN 8572170693.

ADELSTEIN, P. Z. et al. Moisture relationships of photographic film. Journal of the American Institute for Conservation, Washington, v. 36, p. 193-206, 1997.

AFONSO, M.I.A.S.P. Simulação higrotérmica de edifícios: aplicação do EMPD no cálculo da humidade interior. (Dissertação de mestrado). Porto: Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, 2011. Disponível em: http://hdl.handle.net/10216/61377 (Acesso em 23/03/2013).

AGRAWAL, O.P. “Appropriate” Indian technology for the conservation of museum collections. In: STANIFORTH, S. (ed.) Historical perspectives on preventive conservation. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2013, p. 42-49.

AINSWORTH, M. W. From connoisseurship to technical history: the evolution of the interdisciplinary study of art. Conservation – The Getty Conservation Institute Newsletter, Los Angeles, v. 20, n. 1, p. 4-10, 2005.

AKUTSU, M. e VITTORINO, F. Critérios para a definição de níveis de desempenho térmico de edificações. In: 2º. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 1992, Florianópolis: ANTAC, 1993. p. 69-74.

AKUTSU, M. S. et al. Conforto térmico. In: IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DE SÃO PAULO. Divisão de Engenharia Civil. Critérios mínimos de desempenho de habitações térreas de interesse social – texto para discussão. São Paulo: IPT, 1998, Cap. 4. p. 35-47,

AKUTSU, M. S. et al. Desempenho térmico de edificações habitacionais e escolares: manual de procedimento para avaliação. São Paulo: IPT, 1987. 74p. (Publicação IPT n. 1732)

ALBERO, S. et al. CFD modeling for the conservation of the Gilded Vault Hall in the Domus Aurea. Journal of Cultural Heritage, v. 5, n. 2, p. 197-203, 2004. ISSN 1296-2074. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207404000275 (Acesso em 23/09/2012).

ALCÁNTARA, R. Standards in preventive conservation. meanings and applications. Roma: ICCROM, 2002. Disponível em: http://www.iccrom.org/pdf/ICCROM_04_StandardsPreventiveConser_en.pdf (Acesso em 31/08/2012).

ALLARD, F. et al. Natural ventilation in buildings: a design handbook. Londres: James & James, 1998.

ALLEN, E. Cómo funciona un edificio : principios elementales. Barcelona: Gustavo Gili, 2000, 7a. ed.. 258 p. ISBN 8425210895.

ALLOCCA, C. et al. Design analysis of single-sided natural ventilation. Energy and Buildings, v. 35, n. 8, p. 785-795, 2003. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778802002396 (Acesso em 23/05/2013).

ALMEIDA, I. T. A poluição atmosférica por material particulado na mineração a céu aberto. (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo, 1999. Disponível em:

ALMUSAED, A. Biophilic and bioclimatic architecture : analytical therapy for the next generation of passive sustainable architecture. Londres; Nova Iorque: Springer, 2011. xxix, 422 p. ISBN 9781849965330

AL-RABGHI, O. M. e HITTLE, D. C. Energy simulation in buildings: overview and BLAST example. Energy Conversion and Management, v. 42, n. 13, p. 1623-1635, 2001. ISSN 0196-8904. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890400001503 (Acesso em 03/10/2012).

ALTERIO, S. e BARBARO, S. Microclimate management for the preservation of cultural heritage. Conservation Science in Cultural Heritage: Historical Technical Journal, v. 10, n. 1, p. 71-100, 2010. ISSN 1974-4951. Disponível em: http://www.doaj.org/doaj?func=abstract&id=841965 (Acesso em 01/10/2012).

ALUCCI, M.P. et al. Implantação de conjuntos habitacionais – recomendações para adequação climática e acústica. São Paulo: IPT, 1986.

ALVES, R. et al. Interdisciplinaridade: um conceito em construção. Episteme, Porto Alegre, n. 19, p. 139-148, 2004. Disponível em: http://www.ilea.ufrgs.br/episteme/portal/pdf/numero19/episteme19_artigo_ alves_brasileiro_brito.pdf (Acesso em 13/09/2012).

AMARAL, A.A. História e memória de Januária. (Documento eletrônico), Vitruvius. Minha Cidade 09.097, ago. 2008. Disponível em: http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/ minhacidade/ 09.097/ 1882 (Acesso em 21/08/2011)

AMORIM, C.N.D. e BRAGA, D.K. Métodos e técnicas para conforto ambiental e reabilitação do ambiente construído. In: ROMERO, M.A.B. (org.). Reabilitação ambiental sustentável arquitetônica e urbanística: registro do curso de especialização a distância. Brasília, DF: FAU/UNB, 2009, p. 618-673. ISBN 9788560762019.

ANDRADE, B. Museus sustentáveis: estudo de caso da Casa da Descoberta na Universidade Federal Fluminense. In: 2º. Seminário Internacional Museografia e Arquitetura de Museus. Rio de Janeiro, 16 a 19 de novembro de 2010. Disponível em: http://arquimuseus.arq.br/anais-seminario_2010/eixo_iii/P3_Artigo_ Barbara_Andrade.html (Acesso em 23/02/2013).

ANTUNES, L.M.V. Para uma nova arquitectura dos edifícios de arquivo em Portugal. (Dissertação de mestrado). Lisboa: Universidade de Lisboa, Faculdade de Letras, 2011. Disponível em: http://repositorio.ul.pt/handle/10451/3371 (Acesso em 25/05/2013).

APSLEY, D. Introduction to CFD. (Documento eletrônico). University of Manchester, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, 2012. Disponível em: http://personalpages.manchester.ac.uk/staff/ david.d.apsley/lectures/comphydr/index.htm (Acesso em 19/09/2012).

ARGENTINA. Instituto Argentino de Normallzación. Norma IRAM 11603 – Acondicionamiento térmico de edificios. Classificación bioambiental de la República Argentina. Buenos Aires, IRAM, 1996. Disponível em: http://pt.scribd.com/doc/58167249/IRAM-11603 (Acesso em 15/08/2011).

ARTIGAS, D. J. A comparison of the efficacy and costs of different approaches to climate management in historic buildings and museums. (Dissertação de mestrado). University of Pennsylvania, Graduate Program in Historic Preservation, 2007., 207 p. Disponível em: http://keepsafe.ca/fileadmin/pdfs/thesis%20clmt%20 contrl%20costs.pdf (Acesso em 03/09/2012).

ARUP. Building Physics. (Documento eletrônico). (s.d.) Disponível em: http://hk2d.group.shef.ac.uk/ downloads/AED-building-physics.pdf (Acesso em 15/05/2013).

ARUP. Museums and art galleries survival strategies. (Documento eletrônico). Museums, Libraries and Archives Council, Renaissance North West, 2010. Disponível em: http://www.arup.com/News/2010_11_November/ 03_Nov_2010_ Museums_Art_Galleries_ Survival_Strategies (Acesso em 30/05/2013).

ASCIONE, F. e MINICHIELLO, F. Microclimatic control in the museum environment: Air diffusion performance. International Journal of Refrigeration, v. 33, n. 4, p. 806-814, 2010. ISSN 0140-7007. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700709003120 (Acesso em 30/09/2012).

ASCIONE, F. et al. Energy saving strategies in air-conditioning for museums. Applied Thermal Engineering, v. 29, n. 4, p. 676-686, 2009. ISSN 1359-4311. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/ science/article/pii/S1359431108001737 (Acesso em 03/09/2012).

ASME – AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME V&V 20-2009. Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer. Nova Iorque: ASME, 2009. Disponível em: http://gnssn.iaea.org/RTWS/general/Shared%20Documents/Waste%20Management/Apr %202012%20WG%20on%20developing%20DPCSC%20guidance%20document/IP15%20ASMEVV20-009.pdf

ASFOUR, O. S. e GADI, M. B. A comparison between CFD and network models for predicting wind-driven ventilation in buildings. Building and Environment, v. 42, n. 12, p. 4079-4085, 2007. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306004380 (Acesso em 22/09/2012).

ASHLEY-SMITH, J. Risk assessment for object conservation. Oxford; Boston: Butterworth-Heinemann, 1999. 358 p. ISBN 0750628537.

ASHLEY-SMITH, J. Sustainability and precaution. In: STANIFORTH, S. (ed.) Historical perspectives on preventive conservation. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2013, p. 354-360.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. Standard 62-1999 – Ventilation for acceptable indoor air quality. Atlanta: ASHRAE, 1999.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. Standard 55-2004 – Thermal comfort conditions for human occupancy. Atlanta: ASHRAE, 2004.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. 2007 ASHRAE handbook: HVAC applications – SI edition. Atlanta: ASHRAE, 2007.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. 2009 ASHRAE handbook: fundamentals – SI edition. Atlanta: ASHRAE, 2009.

ASSIS, E. S. e BASTOS, R. V. Análise das condições de conservação do acervo da Biblioteca da Escola de Arquitetura da UFMG. In: 9º. Encontro Nacional e 5º. Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto. São Paulo: ANTAC/UFMG, 2007. v. 1. p. 142-151.

ASSIS, E. S. e FERREIRA, C. C. Comparação entre modelos empíricos e computacionais para a estimativa de ventilação em ambientes interiores. In: Seminário Internacional NUTAU 2006: Inovações Tecnológicas e Sustentabilidade, 2006, São Paulo. NUTAU 2006: Inovações Tecnológicas e Sustentabilidade (CD-ROM). São Paulo: FAU-USP;FUPAM; Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo, 2006. v. 1. p. 1-10.

ASSIS, W. L. O sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva têmporo-espacial. (Tese de doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2010.

ASTRUP, T. et al. Moisture transport in wood – an experimental and numerical study. In: Proceedings of the 7th Nordic Symposium on Building Physics, Reykjavík, 2005. Disponível em: http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik/pdf/art_045.pdf (Acesso em 01/10/2012).

AULT, J. R. Environmental requirements for museums. (Dissertação de Mestrado) University of Wisconsin--Madison, 2000. Disponível em: http://minds.wisconsin.edu/bitstream/handle/1793/7642/THESIS.pdf (Acesso em 23/08/2011)

AVRAMI, E. Sustainability and the built environment: forging a role for heritage conservation. Conservation Perspectives, v 26, n. 1, p. 4-9, 2011.

AVRAMIDIS, S. Evaluation of “three-variable” models for the prediction of equilibrium moisture content in wood. Wood Science and Technology, v. 23, n. 3, p. 251-257, 1989. ISSN 0043-7719. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/BF00367738 (Acesso em 27/02/2013)

AWBI, H. B. Design considerations for naturally ventilated buildings. Renewable Energy, v. 5, n. 5–8, p. 1081-1090, 1994. ISSN 0960-1481. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/096014819490135X (Acesso em 01/10/2012).

AWBI, H. B. Ventilation of buildings. 2nd. Londres: Taylor & Francis, 2005, 522 p. ISBN 0415270553.

AWBI, H. B. Ventilation systems - design and performance. Londres: Taylor & Francis, 2008. 445 p. ISBN 9780419217008

AWBI, H.B. Basic concepts for natural ventilation of buildings. (Documento eletrônico). 2010. Disponível em: http://www.cibse.org/content/Groups/Building_Simulation_Group/NMMV10/01 Hazim Awbi (University of Reading) - 20 Basic Concepts for Natural Ventilation of Buildings.pdf (Acesso em 22/03/2013).

AXLEY, J. Multizone airflow modeling in buildings: history and theory. HVAC & R Research, v. 13, n. 6, p. 907-928, 2007. ISSN 10789669.

AYERST, G. The effects of moisture and temperature on growth and spore germination in some fungi. Journal of Stored Products Research, v. 5, n. 2, p. 127-141, 1969. ISSN 0022-474X. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022474X69900551 (Acesso em 05/07/2012).

AYRES, J. M. et al. Energy conservation and climate control in museums: A cost simulation under various outdoor climates. International Journal of Museum Management and Curatorship, v. 8, n. 3, p. 299-312, 1989. ISSN 0260-4779. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1080/09647778909515173 (Acesso em 14/09/2012).

BAGGIO, P. et al. Microclimate analysis of the Scrovegni Chapel in Padua: measurements and simulations. Studies in Conservation, v. 49, n. 3, p. 161-176, 2004. ISSN 00393630. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/25487690 (Acesso em 03/10/2012).

BAHIA, S.B. (org.) Modelo para elaboração de código de obras e edificações. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS / PROCEL / IBAM / DUMA, 1997, 151p., il.

BAIRD, G. The architectural expression of environmental control systems. Londres: Spon Press, 2001. ISBN 0419244301.

BAKER, J. e LUGANO, F. A passive approach to practical climate control. Postprints, WAG sessions of the AIC Annual Meeting, 1999. Disponível em: http://www.wag-aic.org/1999/WAG_99_baker.pdf (Acesso em 09/09/2012).

BAKER, N. V. Passive and low energy building design for tropical island climates. Commonwealth Secretariat, 1987. ISBN 9850923123

BAKER, N. e STEEMERS, K. Energy and environment in architecture : a technical design guide. Nova Iorque: E&FN Spon, 2000. 224 p. ISBN 0419227709.

BAKER, P. In situ u-value measurements in traditional buildings–preliminary results. Edimburgo: Historic Scotland, 2008. http://www.historic-scotland.gov.uk/es/largertext/paul_baker_thermal_performance_of_ traditional_ masonry_walls.pdf (Acesso em 03/09/2012).

BAKER, P. U-values and traditional buildings–In situ measurements and their comparisons to calculated values. Edimburgo: Historic Scotland, 2011. (Historic Scotland Technical paper, 10). Disponível em: http://www.historic-scotland.gov.uk/hstp102011-u-values-and-traditional-buildings.pdf (Acesso em 23/02/2013).

BAKKER, André. Computational fluid dynamics. Dartmouth College, s.d. Disponível em: http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/ (Acesso em 20/04/2008).

BALOCCO, C. Thermal and velocity field analysis inside an historical building The Hall of Two Hundred case study. Proceedings of the COMSOL Users Conference, Milano, 2006. Disponível em: http://www.comsol.eu/papers/1698/download/Balocco.pdf (Acesso em 06/03/2013).

BALOCCO, C. Daily natural heat convection in a historical hall. Journal of Cultural Heritage, v. 8, n. 4, p. 370-376, 2007a. ISSN 1296-2074. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii /S1296207407001033 (Acesso em 23/09/2012).

BALOCCO, C. Investigation on natural ventilation techniques in historical buildings. A Case Study in Palermo. Proceedings of COMSOL Conference, Grenoble, 2007b. Disponível em http://cds.comsol.com/ access/dl/papers/2562/Balocco.pdf (Acesso em 20/04/2008).

BALOCCO, C. Analysis of ancient natural ventilation systems inside the Pitti Palace in Florence. In: Proceedings of the COMSOL Conference, 2008, Hannover. Disponível em: http://www.comsol.com/ papers/4869/ (Acesso em 27/09/2012).

BALOCCO, C. e GRAZZINI, G. Plant refurbishment in historical buildings turned into museum. Energy and Buildings, v. 39, n. 6, p. 693-701, 2007. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806002453 (Acesso em 03/09/2012).

BALOCCO, C. et al. I sistemi di ventilazione naturale negli edifici storici. Palazzo Pitti a Firenze e palazzo Marchese a Palermo. Florença: Alinea, 2009. ISBN 9788860553744. Disponível em: http://books.google.com.br/books?id=ZEjFLW1wcegC (Acesso em 27/09/2012).

BAMBARU, D. Los diez mandamientos del arquitecto de museos. Museum, Paris, v. 16 n. 4, p. 201-203, 1989.

BANHAM, R. The architecture of the well-tempered environment. Londres, : Architectural Press., 1969. 295 p. ISBN 0851390730.

BANKS, P. N. What makes records deteriorate : Practical guide to HVAC for museums and historic renovation. ASHRAE Journal, v. 41, n. 4, pp. 71-76, 1999.

BARBIRATO, G. M. et al. Clima e Cidade – a abordagem climática como subsídio para estudos urbanos. Maceió:UFAL, 2007. ISBN 8571773599.

BARBOSA, M. J.. Uma metodologia para especificar e avaliar o desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1997, 274 p.

BARBOSA, M.J. et al. Aperfeiçoamento e desenvolvimento de novos métodos de avaliação de desempenho para subsidiar a elaboração e revisão de normas técnicas. In: ROMAN, H. e BONIN, L.C. (eds.) Normalização e certificação na construção habitacional. Porto Alegre: ANTAC, 2003, cap. 8. Disponível em: http://www.habitare.org.br/pdf/publicacoes/arquivos/ 119.pdf (Acesso em 16/08/2011)

BARBOSA, M.J. et al. Disposição dos equipamentos para medição da temperatura do ar em edificações. Ambiente Construído, v. 7, n. 3, p. 89-108, 2008a.

BARBOSA, M.J. et al. Uso de barreiras de radiação para minimizar o erro no registro das temperaturas do ar em edificações. Ambiente Construído, v. 8, n. 4, p. 117-136, 2008b.

BARBOZA, K. M. Gestão de riscos para acervos museológicos. 2011. 158 f. (Dissertação de mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Belas Artes, 2010.

BARTAK, M. et al. Experimental and numerical study of local mean age of air. In: Proceedings of the 7th International Building Performance Simulation Association Conference. IBPSA, 2001. ISBN 85-901939-3-4 Disponível em: http://eprints.cdlr.strath.ac.uk/5932 (Acesso em 22/03/2012).

BASTOS, L. E. G et al. Estratégias de ventilação natural em edificações de interesse social e a norma ABNT 15.220: Zoneamento bioclimático *versus* potencial eólico brasileiro. In: 9º. Encontro Nacional e 5º. Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto. São Paulo, ANTAC/UFMG, 2007. v. 1. p. 172 – 180.

BATTERHAM, I. e WIGNELL, J. The mitigating effects of packaging on temperature and humidity fluctuations. Contributions to the 5th AICCM Book, Paper and Photographic Materials Symposium. Editors: Prue McKay and Alana Treasure. Canberra, ACT: AICCM (Inc.), 2008. Disponível em: http://www.naa.gov.au/Images/Batterham-Wignell_tcm16-35749.pdf (Acesso em 11/09/2012).

BATTLE McCARTHY Consulting Engineers. Wind towers: detail in building. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1999, 96p.

BAUER, M. et al. Green building: guidebook for sustainable architecture. Heidelberg; Nova Iorque: Springer, 2010. 208 p. ISBN 9783642006340.

BECK, I. Caderno tecnico: planejamento e prioridades. Rio de Janeiro: Arquivo Nacional, 1997 24p (Conservação Preventiva em Bibliotecas e Arquivos)

BELLIA, L. et al. A comparison of HVAC systems for artwork conservation. International Journal of Refrigeration, v. 30, n. 8, p. 1439-1451, 2007. ISSN 0140-7007. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700707000503 (Acesso em 14/09/2012).

BERNARDI, A. Microclimate inside cultural heritage buildings. Pádua: Il Prato, 2008.

BICHLMAIR S. et al. The moving fluctuation range – a new analytical method for evaluation of climate fluctuations in historic buildings. In: ASHLEY-SMITH, J. et al. (eds.) Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Londres, Achetype publications, 2013, p. 439-449. Disponível em: http://www.doernerinstitut.de/downloads/Climate_for_ Collections.pdf (Acesso em 29/08/2013).

BIRDSALL, B. et al. DOE-2 basics version 2.1 E. Lawrence Berkeley Laboratory, 1994. Disponível em: http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=10156981 (Acesso em 01/10/2012).

BITTENCOURT, L. e CÂNDIDO, C.. Introdução à ventilação natural. 2a. ed. rev. e ampl. Maceió: EDUFAL, 2006. 163 p.

BLADES, N. e RICE, K. Conservation heating and energy efficiency at the National Trust: theory and practice. In: Developments in Climate Control of Historic Buildings. Proceedings from the International Conference "Climatization of Historic Buildings, State of the Art", December 2, 2010, Linderhof Palace. Disponível em: http://www.forschungsallianz-kulturerbe.de/download/3-8167-8637-5-developments-in-climate-control-of-historic-buildings.pdf (Acesso em 11/09/2012).

BLADES, N et al. Guidelines on pollution control in museum buildings. Londres: Resource - The Council for Museums, Archives and Libraries, 2000. Disponível em: http://discovery.ucl.ac.uk/2443/1/2443.pdf (Acesso em 31/08/2012).

BLADES, N. et al. Modelling of climate change effects on historic buildings. In: Drdracky, MEA, (ed.) (Proceedings) Safeguarded Cultural Heritage - Understanding & Viability for the Enlarged Europe, Prague, May 31st - June 3rd, 2006. Disponível em: http://www.bartlett.ucl.ac.uk/graduate/csh/attachments/noahs_ark_poster.pdf (Acesso em 01/10/2012).

BLAIR, D. Benchmarking of energy consumption in UK historic buildings. (Dissertação de mestrado). Edimburgo: Heriot-Watt University, School of the Built Environment, 2011. Disponível em: https://web.sbe.hw.ac.uk/currentstudents/dissertations/files/2011/1324396924-Blair,D-Blair D - Dissertation.pdf (Acesso em 11/09/2012).

BLOCK, S. S. Humidity requirements for mold growth. Applied Microbiology, v. 1, n. 6, p. 287-93, 1953. ISSN 0003-6919.

BLOCKEN, B. e GUALTIERI, C. Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics. Environmental Modelling & Software, v. 33, n. 0, p. 1-22, 2012. ISSN 1364-8152. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815212000370 (Acesso em 24/09/2012).

BOGO, A.J. Considerações críticas sobre o zoneamento bioclimático brasileiro visando o desempenho térmico de habitações de interesse social: o caso de santa Catarina. In: SEMINÁRIO MATO-GROSSENSE DE HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL, 2005. Cuiabá: CEFETMT/EdUFMT, 2005, p. 329-337.

BOGO, A.J. Limitações quanto aos parâmetros de desempenho térmico e estratégias bioclimáticas recomendadas pela norma brasileira de desempenho térmico de habitações de interesse social. In: Seminário Internacional NUTAU, 7º, 2008. São Paulo: NUTAU/FAU/USP, 2008. Disponível em: http://www.usp.br/nutau/CD/30.pdf (Acesso em 19/08/2011).

BOOMBERG, M.T. e SHIRTLIFFE, C.J. Hygrothermal characteristics of materials and components used in building enclosures. In: TRECHSEL, H. R. e BOMBERG, M. (eds.) Moisture control in buildings: the key factor in mold prevention. West Conshohocken: ASTM International, 2a ed., 2009, cap2. ISBN 9780803170049

BOURDIEU, P. Le champ scientifique. Actes de la Recherche en Sciences Sociales, n. 2/3, p. 88-104, 1976. Disponível em: http://uaiinformatica.net/luciana/campo_cientifico_bourdieu.pdf (Acesso em 05/10/2012).

BOTHA, P. The use of 10 m wind speed measurements in the assessment of wind farm developments. Proc. First International Meeting on Wind Turbine Noise, Berlin, 2005. Disponível em: http://www.wolfgang-neumann-gmm.de/upload/Botha.pdf (Acesso em 22/03/2013).

BOTTIGLIONI, S. Indoor climate - specifications and standards. In: TOMBAZIS, A. et al. Museums- Energy Efficiency and Sustainability in Retrofitted and New Museum Buildings Handbook. University College Dublin, Ireland, 2004, p. 58-69. Disponível em: http://eprints.sparaochbevara.se/489/1/Handbook_ sustainable_Museums.pdf (Acesso em 23/08/2011)

BOU SAID, E. Contribution a la modelisation des effets differes du bois et du beton sous conditions climatiques variables. Application aux structures mixtes bois-beton. (Tese de doutorado). Institut National des Sciences Apliquees de Lyon, 2003.

BRADLEY, S. Appropriate standards for conservation. IAQ – Indor Air Quality Meeting 2000. Disponível em: http://iaq.dk/iap/iaq2000/2000_02.htm (Acesso em 27/08/2012).

BRÄNNBACKA, J. Lecture notes for the course Introduction to Computational Fluid Dynamics. (s.d.) (Documento Eletrônico) Disponível em: http://users.abo.fi/jbrannba/CFD2006/ (Acesso em 23/08/2011).

BRASIL. INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL Museu do Diamante. Belo Horizonte: – 13ª SR-MG, s.d.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais climatológicas (1961-1990). Brasília: INMET, 1992. 84 p.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CULTURA. PROGRAMA MONUMENTA. Sítios históricos e conjuntos urbanos de monumentos nacionais: sudeste e sul. Brasília : Ministério da Cultura, Programa Monumenta, 2005a. 392 p. (Programa Monumenta, v. II) (cadernos técnicos 4). Disponível em: http://www.monumenta.gov.br/upload/Sitios Historicos_Vol 2_1168630405.pdf (Acesso em 20/08/2011).

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Eficiência energética em habitações de interesse social. Brasília: Ministério das Cidades, 2005b. 113 p. (Cadernos mcidades; 9)

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Procel: 20 anos. Coordenação Lígia Maria Martins Cabral. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS/PROCEL/Centro de Memória da Eletricidade no Brasil, 2006.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. RTQ-C. Requisitos técnicos da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos. (Apêndice Da Portaria n 372 de 17 de setembro de 2010). Brasília: ELETROBRÁS/PROCEL Edifica/LabEEE-UFSC. 2010. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/projetos/etiquetagem/comercial/downloads (Acesso em 22/08/2011)

BRATASZ, L. Acceptable and non-acceptable microclimate variability: the case of wood. Basic Environmental Mechanisms Affecting Cultural Heritage. Understanding Deterioration Mechanisms for Conservation Purposes. COST Action D, v. 42, p. 49-58 (s.d.) Disponível em: http://www.cyf-kr.edu.pl/~ncbratas/aboutus/COSTActionD422010Bratasz.pdf (Acesso em 23/02/2013).

BRATASZ, L. Allowable microclimatic variations for painted wood. Studies in Conservation, v. 58, n. 2, p. 65-79, **2013a**. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1179/2047058412Y.0000000061 (Acesso em 23/04/2013).

BRATASZ, L. Allowable microclimatic variations in museums and historic buildings: reviewing the guidelines. In: ASHLEY-SMITH, J. et al. (eds.) Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Londres, Achetype publications, **2013b**, p. 11-19. Disponível em: http://www.doernerinstitut.de/downloads/Climate_for_Collections.pdf (Acesso em 29/08/2013).

BRATASZ, L e RACHWAŁ, B. Computer modelling of dimensional response and stress fields in wooden artworks. Establishing standards for allowable microclimatic variations for polychrome wood. Oslo, 2010. Disponível em: http://www.cyf-kr.edu.pl/~ncbratas/oslo/BrataszRachwalOslo2010.pdf (Acesso em 22/02/2013).

BRATASZ, L et al. Laser sensors for continuous in-situ monitoring of the dimensional response of wooden objects. Studies in Conservation, v. 50, n. 4, p. 307-315, 2005. Disponível em: http://www.ingentaconnect.com/content/maney/sic/2005/00000050/00000004/art00007 (Acesso em 06/03/2013)

BRATASZ, L. et al. Target microclimate for preservation derived from past indoor conditions. In: PADFIELD, t. e BORCHESEN, K. (eds.) Contributions to the Museum Microclimates Conference. Copenhagen: The National Museum of Denmark, 2007a, p. 129-134. Disponível em: http://www.natmus.dk/graphics/konferencer_mm/microclimates/pdf/bratasz.pdf (Acesso em 23/02/2013)

BRATASZ, L. et al. Impact of indoor heating on painted wood - monitoring the altarpiece in the Church of Santa Maria Maddalena in Rocca Pietore, Italy. Studies in Conservation, v. 52, n. 3, p. 199-210, 2007b. Disponível em: http://www.ingentaconnect.com/content/maney/sic/2007/00000052/00000003/art00004 (Acesso em 06/03/2013)

BRATASZ, L. et al. Allowable microclimatic variations for painted wood: numerical modelling and direct tracing of the fatigue damage. In: Preprints of ICOM-CC 16th Triennial Conference, Lisboa, 19-23 setembro 2011, p.1-7. Disponível em: http://bh1.fpc.pt/winlib/winlibimg.aspx?skey=65EDCB07B29B450B8AF37FCE0D304BCA&doc=12969&img=3488&save=true (Acesso em 23/02/2013).

BRIMBLECOMBE P. e GROSSI C. M. Climate change critical to cultural heritage. In: Proceedings of the International Heritage, Weathering and Conservation Conference (HWC-2006), 21-24 junho de 2006, Madri: Taylor & Francis / Balkema. ISBN 0415412722, p. 387-393. Disponível em: http://noahsark.isac.cnr.it/publications/Publication_1.pdf (Acesso em 03/09/2012).

BRIMBLECOMBE, P. Changes in cumulative processes of deterioration. International colloquium on Climate Change and its Impact on Preservation Management of Archaeological Sites. Atenas, 2 e 3 de abril de 2012. Disponível em: https://sites.google.com/site/climatechangeandmonumentsihc/ (Acesso em 03/09/2012).

BROKERHOF, A.W. Collection Risk Management – The Next Frontier. CMA Cultural Property Protection. Ottawa, 2006.

BROKERHOF, A W. Applying the outcome of climate research in collection risk management – or a challenge to our research efforts. In: Museum Microclimates. National Museum of Denmark. 2007a, p..115-121.

BROKERHOF, A. W. et al. Advancing research in risk management applications to cultural property. Roma: ICCROM. ICCROM newsletter, Roma, n. 33, p. 10-11, 2007b.

BROSTROM, et al. Evaluation of different approaches of microclimate control in cultural heritage buildings. In: ASHLEY-SMITH, J. et al. (eds.) Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Londres, Achetype publications, 2013, p. 105-116. Disponível em: http://www.doernerinstitut.de/downloads/Climate_for_ Collections.pdf (Acesso em 29/08/2013).

BROWN, G. Z. e DEKAY, Mark. Sol, vento & luz : estratégias para o projeto de arquitetura. Porto Alegre: Bookman, 2004. 415p

BROWN, J.P. e ROSE, W. Humidity and moisture in historic buildings: the origins of building and object Conservation. APT Bulletin, v. 27, n. 3 (Museums in Historic Buildings), p. 12-23, 1996. Disponível em http://www.jstor.org/stable/1504411 (Acesso em 11/09/2012).

BROWN, S. et al. Guidelines for environmental control in cultural institutions. Heritage Collections Council, Canberra, Austrália, 2002. Disponível em: http://www.collectionsaustralia.net/ sector_info_item/13 (Acesso em 23/08/2011)

BSI – BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 5454-2000: Recommendations for the storage and exhibition of archival documents. Londres: BSI, 2000.

BSI – BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 5925-1991: Code of practise for ventilation principles and designing for natural ventilation. Londres: BSI, 1991.

BSI – BRITISH STANDARDS INSTITUTION. PAS 198-2011: specifications for managing environmental conditions for cultural collections. (Draft version 2.0 for public comments 05/31/2011). Londres: BSI Standards, 2011. Disponível em: http://www.cibse.org/content/PAS198draft%202%2002011-05-31FORPUBLIC COMMENT.pdf (Acesso em 31/08/2012).

BULLOCK C.E. et al., The Sistine Chapel - HVAC design for special-use buildings. ASHRAE Journal, v. 38, n. 4, 1996, p. 42-54. Disponível em: http://ashraerp.com/files/Sistine_Chapel.pdf (Acesso em 03/10/2012).

BUORO, A.B. et al. Conforto ambiental e patrimônio histórico - estudo de caso da capela do hospital das clínicas, São Paulo. In: 9º. Encontro Nacional e 5º. Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto. São Paulo, ANTAC/UFMG, 2007. v. 1. p. 270-279.

CAMUFFO, D. Microclimate for cultural heritage. Nova Iorque: Elsevier, 1998, 415 p. ISBN 0444829253.

CAMUFFO, D. The Friendly Heating Project and the conservation of the cultural heritage preserved in churches. In: Developments in climate control of historic buildings. In: Proceedings from the International Conference "Climatization of Historic Buildings, State of the Art", December 2, 2010, Linderhof Palace. Disponível em: http://www.forschungsallianz-kulturerbe.de/download/3-8167-8637-5-developments-in-climate-control-of-historic-buildings.pdf (Acesso em 03/09/2012).

CAMUFFO, D. e DELLA VALLE, A. Church heating: a balance between conservation and thermal comfort. Getty Conservation Institute. Experts Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies, Abril de 2007, Tenerife: Getty Conservation Institute, 2007. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/our_projects/science/climate/paper_camuffo.pdf (Acesso em 03/09/2012).

CAMUFFO, D. e PAGAN, E. Impact of daily and seasonal temperature and relative humidity. cycles on wooden artworks. (Documento eletrônico). 6th Indoor Air Quality 2004 Meeting (IAQ2004). Padova, 10-12 Novembro 2004. Disponível em: http://www.isac.cnr.it/iaq2004/powerpoint/camuffo2.ppt (Acesso em 15/09/2012).

CAMUFFO, D. et al. The conservation of artworks and hot air heating systems in churches: are they compatible? The case of Rocca Pietore, Italian Alps. International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, v. 44, n. 3, p. 209-216, 1999. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/1506706. (Acesso em: 17/08/2011).

CAMUFFO, D et al. Showcases: a really effective mean for protecting artworks? Thermochimica Acta, v. 365, p. 65 - 77, 2000. Disponível em: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040603100006146 (Acesso em 13/09/2012).

CAMUFFO, D. et al. Environmental monitoring in four European museums. Atmospheric Environment, v. 35, n. 1, p. 127-140, 2001.

CAMUFFO, D. et al. The microclimate inside the Pollaiolo and Botticelli rooms in the Uffizi Gallery, Florence. Journal of Cultural Heritage, v. 3, n. 2, p. 155-161, 2002. ISSN 1296-2074. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207402011718 (Acesso em 21/11/2012).

CAMUFFO, D. et al. The impact of heating, lighting and people in re-using historical buildings: a case study. Journal of Cultural Heritage, v. 5, n. 4, p. 409-416, 2004a. ISSN 1296-2074. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207404000822 (Acesso em 11/09/2012).

CAMUFFO, D. et al. The impact of heating, lighting and people in re-using historical buildings: a case study. Journal of Cultural Heritage, v. 5, n. 4, p. 409-416, 2004b. ISSN 1296-2074. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207404000822 (Acesso em 21/11/2012).

CARDINALE, N. et al. Thermal properties of the vernacular buildings envelopes: the case of the "Sassi di Matera" and "Trulli di Alberobello". International Journal of Energy & Environment, v. 2, n. 4, p. 605-613, 2011. ISSN 20762895. Disponível em: http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=75119916 (Acesso em 23/02/2013).

CAREY, P. S. e ETHERIDGE, D.W. Direct wind tunnel modelling of natural ventilation for design purposes. Building Services Engineering Research and Technology, Vol 20, No 3, 1999, p. 131-142. doi: 10.1177/014362449902000305.

CARLL, C. e WIEDENHOEFT, A.C. Moisture-related properties of wood and the effects of moisture on wood and wood products. In: Moisture control in buildings: the key factor in mold prevention, cap. 4. West Conshohocken: ASTM International, 2009: p. 54-79: ISBN: 9780803170049: 0803170041. Disponível em: http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/36673 (Acesso em 23/02/2013).

CARMELIET, J. et al. Hysteresis and moisture buffering of wood. In: Proceedings of the 7th Nordic Symposium on Building Physics, Reykjavík, 2005. Disponível em: http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik/pdf/art_032.pdf (Acesso em 01/10/2012).

CAROTENUTO, A. e DELL'ISOLA, M. An experimental verification of saturated salt solution-based humidity fixed points. International Journal of Thermophysics. v. 17. n. 6, 1996. Disponível em: http://www.springerlink.com/content/r032738m0g0010u0/ (Acesso em 15/08/2011)

CARRAZZONI, M.E. Guia dos bens tombados. Rio de Janeiro: Expressão e Cultura, c1980. 517p. ISBN 8520800572.

CARROON, J. Sustainable preservation: greening existing buildings. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.

CARROON, J. et al. APT Bulletin, Springfield, v. 37, n. 4, p. 35-40, 2006. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/40004146 (Acesso em 22/09/2012).

CARROON, J. et al. Conservation writ large - a discussion about sustainability and heritage. Conservation Perspectives, v. 26, n. 1, p. 18-23, 2011.

CARVALHO, C.S.R. O espaço como elemento de preservação dos acervos com suporte em papel. Comunicação Técnica. Centro de Memória da Academia Brasileira de Letras. Rio de Janeiro. 1998. Disponível em: http://www.casaruibarbosa.gov.br/dados/DOC/artigos/a-j/FCRB_ClaudiaCarvalho_OEspaco_como_elemento_representacao_dosacervos_com_suporte_em_papel.pdf (Acesso em 12/09/2012).

CARVALHO, C.S.R. et al. House of Rui Barbosa Museum: a preventive conservation plan based on an environmental control strategy. In: Proceedings of ICOM-CC 13th Triennial Conference, Rio de Janeiro, 22-27 Setembro de 2002, p.86-89. ICOM Committee for conservation. Londres: James & James, 2002 Disponível em: http://www.casaruibarbosa.gov.br/dados/DOC/artigos/a-j/FCRB_ClaudiaCarvalho_Houseo_of_RuiBarbosaMuseum_A_preventive_conservation_plan_based_on_an_evironmental_control_strategy.pdf (Acesso em 12/09/2012).

CARVALHO, C.V. et al. Fluxovento: um simulador gráfico interativo para o estudo de ventilação em ambientes construídos. In: 8º. Encontro Nacional e 4º. Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Maceió. São Paulo: ANTAC, 2005a, p. 350-359.

CARVALHO, S.K.P. et al. Uso de uma metodologia de predição para avaliação do potencial de utilização de ventilação em ambiente de museus: análise comparativa entre Rio Negro-PR e Belo Horizonte - MG. In: I Forum Brasileiro de Patrimônio Cultural, 2004, Belo Horizonte - MG. Anais. Belo Horizonte: UFMG, 2004. v. 1. p. 160-161.

CARVALHO, S.K.P. Conservação preventiva: análise de condições ambientais em espaços museológicos por meio de um método de previsão. (Dissertação de mestrado). Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Departamento de tecnologia, 2005b. Disponível em: http://files.dirppg.ct.utfpr.edu.br/ppgte/dissertacoes/2005/ppgte_dissertacao_176_2005.pdf (Acesso em 06/10/2012).

CARVALHO, V. O dilema dos profetas. Patrimônio em risco. Congonhas sustentável? Revista ecológico. Fevereiro de 2013, p. 30-39. Disponível em: http://defender.org.br/2013/03/02/congonhas-mg-o-dilema-dos-profetas/ (Acesso em 23/02/2013).

CARVALHO, V. F. Modelagem e zoneamento do ambiente térmico para avaliar o desempenho de frangos de corte criados em galpões climatizados. (Dissertação de mestrado). Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2006, 77 p. Disponível em: http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?_action=&co_obra=29487 (Acesso em 06/10/2012).

CARVALHO, V. F. et al. Zoneamento do potencial de uso de sistemas de resfriamento evaporativo no sudeste brasileiro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental, v. 13, n. 3, p. 358-366, 2009. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v13n3/v13n03a20.pdf (Acesso em 06/10/2012).

CASSAR, M. Case design and climate control: A typological analysis. Museum, Paris, n.146, p.104-107, 1985.

CASSAR, M. Museums environment energy. Londres: HMSO, 1994. ISBN 0112905196.

CASSAR, M. Environmental management. Londres: Routledge, 1995. ISBN 0415105595.

CASSAR, M. Climate change and the historic environment. University College London, Centre for Sustainable Heritage, 2005. ISBN 0954483065 Disponível em: http://discovery.ucl.ac.uk/2082/1/2082.pdf (Acesso em 05/09/2012).

CASSAR, M. Energy reduction and the conservation of cultural heritage: a review of past, present and forthcoming initiatives. International Preservation News, n. 55, p. 6-9, 2011a. Disponível em: http://discovery.ucl.ac.uk/ 1340068/3/1340068.pdf (Acesso em 01/10/2012).

CASSAR, M. Impact of climate change on cultural heritage - From international policy to action. Conservation Perspectives, v. 26, n. 1, p. 10-11, 2011b.

CASSAR, M. e HUTCHINGS, J. Relative humidity and temperature pattern book. A guide to understanding and using data on the museum environment. Londres: Museums & Galleries Commission, 2000, 40 p. Disponível em: http://www.bartlett.ucl.ac.uk/graduate/csh/attachments/RH_pattern_book.pdf (Acesso em22/11/2012).

CASSAR, M. e TAYLOR, J. A cross-disciplinary approach to the use of archives as evidence of past indoor environments in historic buildings. Journal of the society of archivists, v. 25, n. 2, p. 157-172, 2004. ISSN 0037-9816.

CASSAR, M. e YOUNG, A. Indoor climate and tourism effects - a UK perspective. Advanced Research Initiation Assisting and Developing Networks in Europe Workshop, ARIADNE 7, 2001. Disponível em http://www.arcchip.cz/w07/w07_young.pdf. (Acesso em 20/04/2008).

CAVICCHIOLI, A. et al. Automatic devices for monitoring environmentally induced auto-oxidative degradation of artistic materials in conservation sites. Sensors and Actuators B: Chemical, v. 131, n. 2, p. 462-469, 2008.

CAVICCHIOLI, A. et al. Piezoelectric dosimeters: a tool for assessing microenvironments in conservation areas. CMA4CH 2010: Application of Multivariate Analysis and Chemometry to Cultural Heritage and Environment. Disponível em: http://w3.uniroma1.it/CMA4CH/10/~abstracts/A-Cavicchioli_Ora(yre43hd321).pdf (Acesso em 28/09/2013).

CELESTINO, S.M.C. Princípios de secagem de alimentos. Planaltina, DF : Embrapa. Cerrados, 2010, 51 p. (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111). Disponível em: http://bbeletronica. cpac.embrapa.br/ 2010/doc/doc_276.pdf (Acesso em 21/08/2012).

CHANG, J.D. e FALK, B. Experimental and computer simulation approach to investigating the environmental performance of a rare books archive. E-preservation online, v. 6, 2009, p. 180-185. Disponível em: http://www.morana-rtd.com/e-preservationscience/2009/Chang-01-06-2008.pdf (Acesso em 22/03/2012).

CHASSAGNE, P. et al. Three dimensional creep model for wood under variable humidity-numerical analyses at different material scales. Mechanics of Time-Dependent Materials, v. 9, n. 4, p. 1-21, 2005. ISSN 1385-2000. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1007/s11043-005-9001-y (Acesso em 30/09/2012).

CHASSAGNE, P. et al. The contribution of numerical simulation for the diagnosis of the conservation of art objects: Application to Antonio Santucci's armillary sphere of the 16th century. Journal of Cultural Heritage, v. 8, n. 3, p. 215-222, 2007. ISSN 1296-2074. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S1296207407000660 (Acesso em 30/09/2012).

CHEN, Q. Using computational tools to factor wind into architectural environment design. Energy and Buildings, v. 36, n. 12, p. 1197-1209, 2004. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804000519 (Acesso em 22/09/2012).

CHEN, Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. Building and Environment, v. 44, n. 4, p. 848-858, 2009. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132308001510 (Acesso em 22/09/2012).

CHENG, L Y. A teoria de sistema nebuloso e as informações subjetivas de conforto ambiental. In: 5º. Encontro Nacional e 2º. Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Fortaleza. São Paulo: ANTAC, 1999.

CHILE. Ministerio de vivienda y urbanismo. División técnica de estudio y fomento habitacional. Manual de Aplicación Reglamentación Térmica - Ordenanza General de Urbanismo y Construcciónes. Santiago, 2006.4

CHRISTENSEN, J.E. et al. Hygrothermal performance optimisation of a museum storage building. In: Proceedings of 11th International Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings,Clearwater Beach, 5-9 dezembro 2010. Disponível em: http://www.ornl.org/sci/buildings/2010/B11%20papers/10_Christensen.pdf (Acesso em 05/10/2012).

CHRISTENSEN, J. E. e JANSSEN, H. Passive hygrothermal control of a museum storage building. In: Proceedings of the 12th International Building Performance Simulation Association Conference, BS 2011, Sydney, 2011, p.1848-1854. Disponível em: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2011/P_1597.pdf (Acesso em 05/10/2012).

CHUN, S. Air speed measurement standards using wind tunnels. In: COLEMAN, J. C. (ed.) Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research, InTech, 2011. ISBN: 978-953-307-623-2. Disponível em: http://www.intechopen.com/books/wind-tunnels-and-experimental-fluid-dynamics-research/air-speed measure ment-standards-using-wind-tunnels (Acesso em 22/01/2013).

CHUSID, J. M. Teaching sustainability to preservation students. APT Bulletin, Springfield, v. 41, n. 1, p. 43-49, 2010. ISSN 08488525. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/25652703 (Acesso em 05/09/2012).

CLARKE, J. A. Energy simulation in building design (2nd Edition). Londres: Butterworth-Heinneman, 2001.

CLARKE, J. A., et al. Development of a technique for the prediction/alleviation of conditions leading to mould growth in houses. Scottish Homes Research Contract 68017 - Final Report.. Edimburgo: Scottish Homes, 1996. Disponível em: http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/96/mould_rep_0596.pdf (Acesso em 30/08/2012).

CLARKE, J. A. et al. A technique for the prediction of the conditions leading to mould growth in buildings. Building and Environment, v. 34, n. 4, p. 515-521, 1999. ISSN 0360-1323.

CLARKE, J. A., et al. Development of a simulation tool for mould growth prediction in buildings. In: Proceedings of the 5th International Building Performance Simulation Association Conference, BS 1997, v.2, 1997, p.343-349. Disponível em: http://www.ibpsa.org/\proceedings\BS1997\BS97_P189.pdf (Acesso em 29/08/2012).

COELHO, B. R. V. Estado atual da conservação do patrimônio escultórico no Brasil. Ge-conservación, n. 2, p. 7-19, 2011. Disponível em: http://www.ge-iic.com/ojs/index.php/revista/article/view/38 (Acesso em 29/08/2013).

COLE, R. et al. Singapore's new National Library. Arup Journal, 2006. (Documento eletrônico) Disponível em: http://www.arup.com/_assets/_download/download626.pdf (Acesso em 21/05/2013).

CONRAD, E. The realistic preservation environment. Presented at NARA 14th Annual Preservation Conference: Alternative archival facilities, 1999. Disponível em: http://www.archives.gov/preservation/storage/realistic-preservation-environment.html (Acesso em 07/09/2012).

CONRAD, E. Humidistatic heating. The Collections Caretaker E-newsletter. April, 21, 2011. Northern States Conservation Center, St. Paul. Disponível em: http://www.collectioncare.org/pubs/Apr212011.html (Acesso em 09/09/2012).

CORBELLA, O. e YANNAS, S. Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos - conforto ambiental. Rio de Janeiro: Revan, 2003. 287 p. ISBN 8571062684

CORCIEGA, R. ARCH 366: Environmental building design. Sustainable building design case study: Jean marie Tijibaou Cultural Center, New Caledonia. Renzo Piano Buiding Workshop. (Documento eletrônico), s.d., 13p. Disponível em: http://www.scribd.com/doc/122753130/Jean-Marie-Tjibaou-Cultural-Center (Acesso em 15/05/2013).

CORGNATI, S. P. et al. A methodology for microclimatic quality evaluation in museums: Application to a temporary exhibit. Building and Environment, v. 44, n. 6, p. 1253-1260, 2009. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013230800231X (Acesso em 01/10/2012).

CORGNATI, S. P. e FILIPPI, M. Assessment of thermo-hygrometric quality in museums: Method and in-field application to the "Duccio di Buoninsegna" exhibition at Santa Maria della Scala (Siena, Italy). Journal of Cultural Heritage, v. 11, n. 3, p. 345-349, 2010. ISSN 1296-2074. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207410000270 (Acesso em 03/09/2012).

CORGNATI, S. P. e PERINO, M. CFD application to optimise the ventilation strategy of Senate Room at Palazzo Madama in Turin (Italy). (Artigo aceito para publicação, no prelo). Journal of Cultural Heritage (2012), ISSN 1296-2074. doi:10.1016/j.culher.2012.02.007, Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207412000398 (Acesso em 30/09/2012).

CORRÊA, M. C. L. Avaliação dos parâmetros de controle ambiental em museus: um estudo de caso sobre o uso de insuflamento de ar na Reserva Técnica do Museu Universitário Profesor Oswaldo Rodrigues Cabral. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. 148p.

COSTA, E.C. Física aplicada à construção: conforto térmico. São Paulo: Edgard Blucher, 1999, 4ª ed.

COSTANZO, S. et al. Preservation of the artistic heritage within the seat of the Chancellorship of the University of Palermo: A proposal on a methodology regarding an environmental investigation according to Italian Standards. Building and Environment, v. 41, n. 12, p. 1847-1859, 2006. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013230500243X (Acesso em 18/11/2012).

COSTANZO, S. et al. Ventilation problems in heritage buildings. In: Proceedings of. 2nd IASME/WSEAS International Conference on Energy and Environment (EE'07), Portoroz, Eslovênia. 2007. Disponível em: http://www.wseas.us/e-library/conferences/2007portoroz/papers/555-247.pdf (Acesso em 30/05/2013).

CÓSTOLA, D. Ventilação por ação do vento no edifício: procedimentos para quantificação. (Dissertação de mestrado). São Paulo: Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, 2006, 214p. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-26102010-144530/publico/dissertacao_final_low.pdf (Acesso em 15/10/2012).

CÓSTOLA, D. On the inter-model comparison exercises of whole building HAM simulation using the BESTEST building. In: SIMBUILD 2012, International Building Performance Simulation Association, 2012. Disponível em: http://www.ibpsa.us/simbuild2012/Papers/SB12_TS07a_1_Costola.pdf (Acesso em 20/09/2012).

CÓSTOLA, D. et al. Similaridade e escala em ensaios de ventilação em túnel de vento. In: 9º. Encontro Nacional e 5º. Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto. São Paulo: ANTAC/UFMG, 2007. v. 1. p. 451-460.

CÓSTOLA, D. et al. Caracterização de janelas no cálculo de vazão por meio do coeficiente de descarga. In: 10º. Encontro Nacional e 6º. Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Natal. São Paulo: ANTAC, 2009a, p. 829-836.

CÓSTOLA, D. et al. Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. Building and Environment, v. 44, n. 10, p. 2027-2036, 2009b. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132309000444 (Acesso em 10/08/2013).

CÓSTOLA, D. et al. Validação de simulações combinadas usando programas de simulação de energia do edifício e programas de transferência de calor, ar e umidade em componentes construtivos. In: 11º. Encontro Nacional e 7º. Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Búzios. São Paulo: ANTAC, 2011. Disponível em: http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/publications/11_encac_costola.pdf (Acesso em 20/09/2012).

CRAWLEY, D. B. et al. Energy plus: energy simulation program. ASHRAE Journal, v. 42, n. 4, p. 49-56, 2000. ISSN 0001-2491. Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/bibliography/ ashrae_journal_0400.pdf (Acesso em 01/10/2012).

CRAWLEY, D. B. et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. Energy and Buildings, v. 33, n. 4, p. 319-331, 2001. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778800001146 (Acesso em 01/10/2012).

CRUZ, A. J. Ciência e Conservação: alguns problemas de uma relação frequentemente conflituosa, mas necessária. In: VIEIRA, E. e SOUZA, G.V. (eds.) Actas do I Encontro Luso-Brasileiro de Conservação e Restauro. Porto: CITAR/UCP, 2011. p.19-24. Disponível em: http://artes.ucp.pt/citar/actasrestauro/01_ciencia e conservacao.pdf (Acesso em 01/10/2012).

CSTB - CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT. Conditions tropicales humides (vent-soleil-chaleur-humidité). (Página de internet). 2012. Disponível em: http://www.cstb.fr/nantes/fr/nos-champs-dactions/climatologie/conditions-tropicales-humides.html (Acesso em 15/05/2013).

CUNHA, E.G. (org.) Elementos de arquitetura de climatização natural: método projetual buscando a eficiência energética nas edificações. 2. ed. Porto Alegre: +4, 2006. 188 p.

CZAJKOWSKI, J. D. et al. Regionalizacion bioclimatica de Argentina mediante el uso de tecnicas multivariadas y SIG. Sexto Encuentro de Geógrafos de América Latina. Universidad de Buenos Aires, 1997. Disponível em http://observatoriogeograficoamericalatina. org.mx/egal6/ Nuevastecnologias/Sig/59.pdf (Acesso em 15/08/2011).

D'AGOSTINO, V. Condizioni microclimatiche e di qualità dell'aria negli ambienti museali. (Tese de doutorado). Nápoles, Università degli Studi di Napoli Federico II, 2006. Disponível em: http://www.fedoa.unina.it/1071 (Acesso em 20/11/2012).

DARDES, K. e DRUZIK, J. Managing the environment: an update on preventive conservation. Conservation: the Getty Conservation Institute Newsletter, Los Angeles, v. 15, n. 2, p. 4-9, 2000. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/publications/ newsletters/15_2/ (Acesso em 13/08/2011).

DASCALAKI, E. et al. Predicting single sided natural ventilation rates in buildings. Solar Energy, v. 55, n. 5, p. 327-341, 1995. ISSN 0038-092X. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X 9500057X (Acesso em 23/05/2013).

DATE, A. W. Introduction to computational fluid dynamics. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2005, 377 p. ISBN 9780521853262. Disponível em: http://www.loc.gov/catdir/toc/ecip0512/2005012195.html (Acesso em 24/09/2012).

DAVEY, P. Engineering for a finite planet: sustainable solutions by Buro Happold. Basel, Boston: Birkhäuser, 2009. 151 p. ISBN 9783764372200.

DAVIES, M. e RAWLINS, I. The war-time storage in Wales of pictures from the National Gallery, London. In: STANIFORTH, S. (ed.) Historical perspectives on preventive conservation. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2013. p. 139-154.

DEAVES, D.M. e HARRIS, R.J. A mathematical model of the structure of strong winds. Report 76. Londres: Construction Industry Research and Information Association, 1978.

DE BARTOLO, P. e RIMANIO, I. Phoenix public architecture part 1. (página de internet). s.d. Disponível em: http://dbrds.wordpress.com/2011/02/16/phoenix-public-architecture-part-1/ (Acesso em 23/02/2013).

DEFRAEYE, T. e CARMELIET, J. A methodology to assess the influence of local wind conditions and building orientation on the convective heat transfer at building surfaces. Environmental Modelling & Software, v. 25, n. 12, p. 1813-1824, 2010. ISSN 1364-8152. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815210001908 (Acesso em 09/11/2012)

DE LA FUENTE, D. et al. City scale assessment model for air pollution effects on the cultural heritage. Atmospheric Environment, v. 45, n. 6, p. 1242-1250, 2011. ISSN 1352-2310. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231010010368 (Acesso em 04/11/2012).

DE LA TORRE, M. Assessing the values of cultural heritage : research report. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2002. 120 p. Disponível em: http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/values_cultural_heritage (Acesso em 23/02/2013).

DE WIT, M. S. Uncertainty in wind pressure coefficients for low-rise buildings. Heron. v. 44, p. 45-59, 1999. Delft University of Technology. ISSN 0046-7316. Disponível em: http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:9715ed70-b624-4b88-9cb2-19ed6ce16431/DeWit_1999.pdf (Acesso em 21/01/2013).

DE WIT, M. S. Uncertainty in building simulation. In: MALKAWI, A. e AUGENBROE, G. Advanced building simulation. Nova Iorque: Spon Press, 2003, p. 25-59.

DEWITT, D. P. et al. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2008. xix, 643 p.

DELGADO, J. M. P. Q. et al. Exterior condensations on façades: numerical simulation of the undercooling phenomenon. Journal of Building Performance Simulation, p. 1-9, 2011. ISSN 1940-1493. Disponível em: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19401493.2011.560685 (Acesso em 24/09/2012).

DE ROJAS, C. e CAMARERO, C. Visitors' experience, mood and satisfaction in a heritage context: Evidence from an interpretation center. Tourism Management, v. 29, n. 3, p. 525-537, 2008. ISSN 0261-5177. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261517707001471. (Acesso em 03/09/2012).

DE SANTOLI, L. e MARIOTTI, M. Natural ventilation strategies for passive climate control in the archaeological area of the Tempio di Ercole Vincitore in Tivoli. In: Proceedings of 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings - IAQVEC 2007, 28 - 31 October 2007, Sendai, Japan. Disponível em: http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive\IAQVEC2007\Santoli.pdf (Acesso em 27/09/2012).

DE SANTOLI, L. e MARIOTTI, M. Study to protect Michelangelo's David from indoor air pollutants. (Documento eletrônico). 6th Indoor Air Quality 2004 Meeting (IAQ2004). Padova, 10-12 Novembro 2004. Disponível em: http://www.isac.cnr.it/iaq2004/abstract/mariotti.pdf (Acesso em 03/10/2012).

DE SANTIOLI et al. A curtain of air for the statue of David. Fluent News, v. 15, n. 2, p. 22-23, 2006.

DE SANTIOLI et al. Long term prediction of marble erosion and risk analysis for the conservation of the statue of David of Michelangelo. In: Museum Microclimates Edited by:Tim Padfield and Karen Borchersen. The National Museum of Denmark, 2007, p. 22. Documento eletrönico extendido disponível em: http://w3.uniroma1.it/impnuc2/Publications/Ref_63[CARUSO%20G].pdf (Acesso em 01/10/2012).

DE SANTIOLI et al. Long term prediction of marble erosion and risk analysis for the conservation of the statue of David of Michelangelo. In: 9th Indoor Air quality meeting IAQ2010, Chalon-sur-Saône, 21 a 23 de abril de 2010. Disponível em: http://iaq.dk/iap/iaq2010/iaq2010_mariotti.pdf (Acesso em 03/10/2012).

DE SILVA, M. e HENDERSON, J. Sustainability in conservation practice. Journal of the Institute of Conservation, v. 34, n. 1, p. 5-15, 2011. ISSN 1945-5224. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1080/19455224.2011.566013. (Acesso em 03/09/2012).

DE TAPOL. Benoit. Une méthode d'évaluation des pratiques de conservation préventive dans un service d'archives. Fiches pratiques. Direction des Archives de France. Centre Interrégional de Conservation du Livre 2002.

DE TAPOL, Benoit. Herramientas para el diagnóstico de conservación. Disponível em: <http://www.patrimoniohistorico.org.ar/articulos/83-herramientas-para-el-diagnostico-de-conservacion.html> Acesso em 24 de novembro de 2011.

DINIZ, W.P.P. Preservação e acesso - vitrine com controle de umidade para material fóssil: um estudo de caso em clima quente e úmido. 127 f., enc. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Belas Artes, 2006.

DINIZ, W.P.P. e SOUZA, L.A.C. Conforto ambiental para coleções e pessoas. Cadernos de arquitetura e urbanismo, v. 9, n. 10, p. 91-105, 2002.

DIONISI-VICI, P. et al. Mechanical response of wooden boards subjected to humidity step variations: climatic chamber measurements and fitted mathematical models. Journal of Cultural Heritage, v. 7, n. 1, p. 37-48, 2006. ISSN 1296-2074. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207405001160 (Acesso em 30/09/2012)

DIONISI-VICI, P. et. Al. An analytical method for the determination of the climatic distance between different microclimates for the conservation of wooden cultural heritage objects. Studies in Conservation, v. 56, n. 1, p. 41-57, 2011. ISSN 0039-3630. Disponível em: http://ottimari.agr.unifi.it/~uzielli/Alcune_Pubblicazioni/2011%20Climatic%20distance%20Studies%20in%20Conservation.pdf (Acesso em 23/02/2013).

DOLS, W. S. e WALTON, G. N. CONTAM 2.0 User Manual. Gaithersburg: NIST - National Institute of Standards and Technology, 2002. Disponível em: http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build02/PDF/b02178.pdf (Acesso em 20/09/2012).

DRIVAS, P. E. A. Experimental characterization of ventilation systems in buildings. current research, v. 6, n. 7, p. 609-613, 1972.

DROIN-JOSSERAND, A. et al. Modelling the absorption and desorption of moisture by wood in an atmosphere of constant and programmed relative humidity. Wood Science and Technology, v. 22, n. 4, p. 299-310, 1988. ISSN 0043-7719. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/BF00353320 (Acesso em 01/10/2012).

DROIN-JOSSERAND, A. et al. Modelling the process of moisture absorption in three dimensions by wood samples of various shapes: cubic, parallelepipedic. Wood Science and Technology, v. 23, n. 3, p. 259-271, 1989. ISSN 0043-7719. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/BF00367739 (Acesso em 01/10/2012).

DUBOIS, F. et al. Modeling of the viscoelastic mechano-sorptive behavior in wood. (Artigo aceito para publicação, no prelo). Mechanics of Time-Dependent Materials, (s.d.) ISSN 1385-2000. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/s11043-012-9171-3 (Acesso em 30/09/2012).

DUTHINH, D. e SIMIU, E. The Use of wind tunnel measurements in building design. In: COLMAN, J.C. e BOLDES, U. (eds.) Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research. In Tech, 2011. DOI: 10.5772/730. Disponível em: http://www.intechopen.com/books/wind-tunnels-and-experimental-fluid-dynamics-research (Acesso em 22/03/2013).

EDWARDS, B. W. Sustainability as a driving force in contemporary library design. Library Trends, v. 60, n. 1, p. 190-214, 2011. ISSN 1559-0682. Disponível em: http://muse.jhu.edu/journals/library_trends/v060/60.1.edwards.pdf (Acesso em 23/02/2013).

EICKER, U. Low energy cooling for sustainable buildings. Oxford: Wiley-Blackwell, 2009. ISBN 9780470697443

ELEOTÉRIO, J. R.; et al. Programa para estimativa da umidade de Equilíbrio da madeira. Ver. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 8, n.1, p.13-22, 1998.

ELIAS, L.M.A.. Diagnóstico de conservação do conjunto escultórico da Capela da Ceia dos Passos do Santuário Senhor Bom Jesus de Matosinhos, Congonhas, Minas Gerais, Brasil. Dissertação (mestrado). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Belas Artes, 2002, 154p.

ENGLISH HERITAGE. Climate change and the historic environment. Londres: English Heritage, 2008a. Disponível em: http://www.english-heritage.org.uk/publications/climate-change-and-the-historic-environment/ (Acesso em 03/09/2012).

ENGLISH HERITAGE. Energy Conservation in traditional buildings. Londres, English Heritage, 2008b. Disponível em: http://www.climatechangeandyourhome.org.uk/live/content_pdfs/94.pdf (Acesso em 07/05/2013).

ERHARDT, D. e MECKLENBURG, M. Relative humidity re-examined. Preventive conservation practice, theory and research, IIC Preprints of the contributions to the Ottawa congress, 12-16 September 1994, p. 32-38.

ERHARDT, D. e MECKLENBURG, M. et al. The determination of allowable RH fluctuations, WAAC Newsletter, Nova Iorque, v. 17, n. 1, p. 19-23, 1995.

ERHARDT, D. et al. New versus old wood: Differences and similarities in physical, mechanical, and chemical properties. ICOM committee for conservation, 11th triennial meeting in Edinburgh, Scotland, 1-6 September 1996: Preprints, 1996. James & James (Science Publishers) Ltd. p.903-910.

ERHARDT, D. et al. Applying science to the question of museum climate. In: Museum Microclimates. National Museum of Denmark, 2007. Disponível em: http://www.conservationphysics.org /mm/erhardt/erhardt.pdf (Acesso em 23/02/2013).

ERHORN, H. e KLUTTIG, H.E. Concerted Action Energy Performance of Buildings - Procedures (CT4). (Publicação pan-européia). EPBD-CA, 2010. Disponível em http://www.epbd-ca.org/Medias/Pdf/CT_Reports_14-04-2011/CT4_Procedures.pdf (Acesso em 16/08/2011).

ESCOBAR, P. S. Optimización de procedimientos técnico-científicos aplicados a la restauración del Patrimonio Cultural. (Tese de doutorado). Valencia, Universitat Politècnica de València, 2013. Disponível em: http://riunet.upv.es/handle/10251/31206 (Acesso em 29/08/2013).

ETHERIDGE, D. W. Natural ventilation of buildings: theory, measurement and design. Chichester, West Sussex: Wiley, 2012. xxv, 428 p. ISBN 9780470660355.

EUA – ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA – DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA – SERVIÇO FLORESTAL - LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS (FOREST PRODUCTS LABORATORY). Wood handbook: wood as an engineering material. General technical report FPL GTR-190. Madison: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010, Centennial Edition.

EUA – ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA – DEPARTAMENTO DE ENERGIA – ESCRITÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ENERGIA RENOVÁVEL. EnergyPlus input output reference. Washington: DOE/EERE, 2012. (Documento eletrônico). Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/inputoutputreference.pdf (Acesso em 23/02/2013).

EVANS, J. M. From meteorological data to bioclimatic design - 30 years of the Mahoney Tables. Brisbane: PLEA 99 Conference Proceedings, 1999.

EVANS, J.M. The comfort triangles. A new tool for bioclimatic design. (Tese de doutorado). Delft: Delft University of Technology, 2007.

EVOLA, G. e POPOV, V. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. Energy and Buildings, v. 38, n. 5, p. 491-501, 2006. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778805001702 (Acesso em 22/09/2012).

FARRENY, R. et al. The metabolism of cultural services. Energy and water flows in museums. Energy and Buildings, v. 47, n. 0, p. 98-106, 2012. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811006487 (Acesso em 07/05/2013).

FATHY, H et al. Natural energy and vernacular architecture : principles and examples with reference to hot arid climates. Chicago: Published for the United Nations University by the University of Chicago Press, 1986. xxiii, 172 p. ISBN 0226239179

FERNANDES, J.T. Código de obras e edificações do DF: inserção de conceitos bioclimáticos, conforto térmico e eficiência energética. (Dissertação de mestrado). Brasília, Programa de pós graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, 2009, 249p.

FERREIRA, C. C. et. al. Análise das condições microclimáticas da Biblioteca Central da UFMG para a conservação de seu acervo. In: 3o. Seminário Internacional Museografia e Arquitetura de Museus - conservação e técnicas sensoriais. Rio de Janeiro: PROARQ/FAU-UFRJ, 2012.

FEUSTEL, H. E. COMIS - An international multizone air-flow and contaminant transport model. Energy and Buildings, v. 30, n. 1, p. 3-18, 1999. ISSN 378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778898000437 (Acesso em 20/09/2012).

FIDLER, J. et al. Uncomfortable truths. Conservation Perspectives, v. 26, n. 1, p. 15-17, 2011.

FISCHER, M.N. Heat recovery, energy storage and active solar systems. In: TOMBAZIS, A. et al. Museums - Energy Efficiency and Sustainability in Retrofitted and New Museum Buildings Handbook. University College Dublin, Ireland, 2004, p. 89-92. Disponível em: http://eprints.sparaochbevara.se/489/1/Handbook_sustainable_Museums.pdf (Acesso em 23/08/2011).

FLOURENTZOU, F. et al. Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients. Energy and Buildings, v. 27, n. 3, p. 283-292, 1998. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778897000431 (Acesso em 22/09/2012).

FRANTZ, S. Preserving art and the environment through sustainable museum buildings. (Dissertação de mestrado). Berkeley: John F. Kennedy University, School of Education and Liberal Arts, 2007, 153 p. Disponível em: http://biblioteca.universia.net/html_bura/ficha/params/title/preserving-art-and-the-environment - through-sustainable-museum-buildings/id/50326491.html (Acesso em 03/09/2012).

FRONER, Y. Os domínios da memória: um estudo sobre a construção do pensamento preservacionista nos campi da Museologia, Arqueologia e Ciência da Conservação. 2001. 478 f. Tese (Doutorado em História Econômica) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

FRONER, Y. e ROSADO, A. Princípios históricos e filosóficos da Conservação Preventiva. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Belas Artes, Laboratório de Ciência da Conservação, 2008. Projeto: Conservação preventiva: avaliação e diagnóstico de coleções. Programa de Cooperação Técnica: IPHAN/UFMG. (Tópicos em conservação preventiva - caderno 2). Disponível em: http://www.patrimoniocultural.org/demu/cursos/ (Acesso em 06/07/2009)

GABAS, G .C. C. Análise crítica dos critérios de seleção de respiradores para particulados em ambientes de mineração. 2008. (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 2008.

GARRECHT, H. et al. 3D microscopy for monitoring dynamic environmental impacts on painted wood. Establishing standards for allowable microclimatic variations for polychrome wood. Oslo, 2010. Disponível em: http://www.cyf-kr.edu.pl/~ncbratas/oslo/GarrechtOslo2010.pdf (Acesso em 22/02/2013).

GCI - GETTY CONSERVATION INSTITUTE. The Conservation Assessment: a proposed model for evaluating museum environmental management needs. EUA: Getty Conservation Institute, 1999.

GCI - GETTY CONSERVATION INSTITUTE. Conservation Perspectives. Conservation - The Getty Conservation Institute Newsletter, Los Angeles, v. 20, n. 2, 2005. Número especial sobre Ciência da Conservação. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/newsletters/20_2/ (Acesso em 03/09/2012).

GCI - GETTY CONSERVATION INSTITUTE. Experts' Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies – Edited transcript. Experts Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies, Abril de 2007, Tenerife: Getty Conservation Institute, 2007. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/our_projects/science/climate/roundtable_transcript.pdf (Acesso em 03/09/2012).

GHIAUS, C. e ALLARD, F. (eds.) Natural ventilation in the urban environment: assessment and design. Londres: Earthscan, 2005, 241 p. ISBN 1844071294.

GHISI, E. et al. Normalização em conforto ambiental: desempenho térmico, lumínico e acústico de edificações. In: ROMAN, H. e BONIN, L.C. (eds.) Normalização e certificação na construção habitacional. Porto Alegre: ANTAC, 2003, cap. 2. Disponível em: http://www.habitare.org.br/pdf/publicacoes/arquivos/113.pdf (Acesso em 16/08/2011).

GIAVARINI, C. Domus Aurea: the conservation project. Journal of Cultural Heritage, v. 2, n. 3, p. 217-228, 2001. ISSN 1296-2074. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207401011220 (Acesso em 23/09/2012).

GIBSON, A. M.; HOCKING, A. D. Advances in the predictive modelling of fungal growth in food. Trends in Food Science & Technology, v. 8, n. 11, p. 353-358, 1997. ISSN 0924-2244.

GIVONI, B. Man, climate and architecture. 2nd. ed. Londres: Applied Science Publishers, 1976. (Architectural science series).

GIVONI, B. Conservation and the use of integrated-passive energy systems in architecture. Energy and Buildings, v. 3, n. 3, p. 213-227, 1981. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378778881900074 (Acesso em 03/09/2012).

GIVONI, B. Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems. Energy and Buildings, v. 17, n. 3, p. 177-199, 1991. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037877889190106D (Acesso em 03/09/2012).

GIVONI, B. Comfort climate analysis and building design guidelines. Energy and buildings, v. 18, nº 1, p. 11-23, 1992.

GIVONI, B. Passive low energy cooling of buildings. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1994, 263p.

GIVONI, B. Climate considerations in building and urban design. Nova Iorque, Londres: Van Nostrand Reinhold, 1998. ISBN 0442009917.

GLASTRUP, J. The relevance of the NOAEL concept and related parameters in defining pollution thresholds for cultural heritage collections.). 6th Indoor Air Quality 2004 Meeting (IAQ2004). Padova, 10-12 Novembro 2004. Disponível em: http://www.isac.cnr.it/iaq2004/ (Acesso em 23/02/2013).

GONÇALVES, W.B. Estudo de índices de conforto térmico avaliados com base em população universitária na Região Metropolitana de Belo Horizonte. (Dissertação de mestrado). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, 2000, 241p.

GONÇALVES, W. B. et al. Problematica da adaptação edificio/museu: um estudo de caso. Belo Horizonte: EAUFMG, 1992.

GONÇALVES, W. B. et al. Estudo de zoneamento bioclimático para o estado de Minas Gerais com base nas Tabelas de Mahoney - considerações sobre a metodologia e resultados preliminares. In: 7º. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 3ª. Conferência Latino-Americana sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações, Curitiba. São Paulo: ANTAC/PUC-PR, 2003, p. 241-248.

GONÇALVES, W.B. et al. Estudo de zoneamento bioclimático para o Estado de Minas Gerais - considerações sobre o método e resultados preliminares. In: Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2005, Belo Horizonte. Belo Horizonte: Jota, Fábio G e Jota, Patrícia R. S (eds.), 2005. v. 1. p. 177-182.

GORMAN, T.M. Relationship between moisture changes and dimensional change in wood. Journal of Materials Education, v. 20(5, 6), 1998, p.335-340.

GOULART, S. Thermal inertia and night ventilation techniques for residential buildings in southern Brazil. (Tese de doutorado). Londres: Architectural Association School of Architecture, 2004, 196p.

GOULDING, J. et al. Energy in architecture: the european passive solar handbook. BT Batsford for the Commission of the European Communities, Directorate General XII for Science, Research and Development, 1992. ISBN 0713469188.

GRALA DA CUNHA et al. Natural heater project. In: AIVC 28th Conference and PALENC 2nd Conference: Building Low Energy Cooling and Ventilation Technologies in the 21st Century, 27-29 September 2007, Crete island, Greece. Disponível em: http://www.inive.org/Ibase_Search/search-detail-airbase-001.asp?ID=100845 (Acesso em 11/09/2012).

GRIFFITH, B. e CHEN, Q. Framework for coupling room air models to heat balance model load and energy calculations (RP-1222). HVAC&R Research, v. 10, n. 2, p. 91-111, 2004. ISSN 10789669. Disponível em: http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=12860528&lang=pt-br&site=ehost-live (Acesso em 20/09/2012).

GRINZATO, E. et al. Monitoring of ancient buildings by the thermal method. Journal of Cultural Heritage, v. 3, n. 1, p. 21-29, 2002. ISSN 1296-2074. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207402011597 (Acesso em 22/03/2012).

GRZYWACZ, C. M. Monitoring for gaseous pollutants in museum environments. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2006, 176 p. ISBN 0892368519. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/monitoring.pdf (Acesso em 19/04/2013).

GUICHEN, G. D. Conservazione preventiva nei musei : il controllo dell'illuminazione, il controllo del clima. Roma: ICCROM : Istituto centrale del restauro, 1983. 43 p.

GUICHEN, G. D. Climat dans le musée: mesure, fiches techniques = Climate in museums : measurement, technical cards. 2. éd., rev. et augm. Roma: ICCROM, 1984. 77 p.

GUICHEN, G. D. El clima en los museos: medición, fichas técnicas. Roma, Lima: ICCROM ; Proyecto Regional de Patrimonio Cultural y Desarrollo PNUD/UNESCO, 1987. 48 p.

GUICHEN, G. D. et al. Climate control in museums: a self-help study course to be done in 15 days with the help of a course assistant. 2nd. Roma: ICCROM, 1998.

GUICHEN, G. D. Medio siglo de conservación preventiva. Entrevista realizada por el Comité Científico Técnico del GEIIC (Marisa Gómez y Benoît de Tapol) en agosto de 2009. Revista Ge-conservación, Número 0, 2009. Disponível em: http://ge-iic.com/revista/download.php?f=3 (acesso em 04/08/2010)

GUTHS, S. Aspectos técnicos e econômicos no condicionamento térmico para preservação de acervos. ARC - Revista Brasileira de Arqueometria Restauração Conservação, Edição Especial, Nº 1, março de 2006. Resumos do III Simpósio de Técnicas Avançadas em Conservação de Bens Culturais - Olinda **2006a**. Olinda: AERPA, 2006. Disponível em: http://www.restaurabr.org/siterestaurabr/volumesarc/arc01pdf/111_SauloGuths-certo.pdf (Acesso em 22/08/2011)

GUTHS, S. Degradação de acervos: parâmetros ambientais e métodos de controle. São Paulo: SENAI, **2006b**. Disponível em: http://www.lmpt.ufsc.br/~saulo/Conservacao/Apostila%20Saulo%20-%20SENAI%20V4.pdf (Acesso em 13/09/2012).

GUTHS, S. Monitoramento e controle térmico para preservação de acervos. (s.d.) (Documento eletrônico). Disponível em: http://www.lmpt.ufsc.br/~saulo/Conservacao/Consideracoes sobre Conservacao e Controle.pdf (Acesso em 12/09/2012).

GYSELS, K. et al. Indoor environment and conservation in the Royal Museum of Fine Arts, Antwerp, Belgium. Journal of Cultural Heritage, v. 5, n. 2, p. 221-230, 2004. ISSN 1296-2074. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207404000330 (Acesso em 22/02/2013)

HAGHIGHAT, F. e MEGRI, A. C. Zonal modeling for simulating indoor environment of buildings: review, recent developments, and applications. HVAC & R Research, v. 13, n. 6, p. 887-904, 2007. ISSN 10789669.

HARRIS, A. et al. Remodelagem dos grupos climáticos dos "Quadros de Mahoney" utilizando a Teoria dos Sistemas Nebulosos. In: Seminário Internacional NUTAU 2000 – tecnologia & desenvolvimento; congresso ibero-americano de energia solar, 5. Anais. São Paulo, agosto/ setembro, 2000. (CD-172).

HARRIS, A. Metodologias baseadas na teoria dos sistemas nebulosos (fuzzy systems theory) para o tratamento das informações subjetivas do projeto arquitetônico. (Tese de doutorado) São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999, 160p.

HEIJMANS, N. e WOUTERS, P. Impact of the uncertainties on wind pressures on the prediction of thermal comfort performances. Principles of Hybrid Ventilation, IEA ECBCS Annex, v. 35, 2002. Disponível em: http://www.hybvent.civil.aau.dk/puplications/Technical%20Reports/TR23%20WindCp.pdf (Acesso em 23/02/2013).

HENRY, M. C. From the outside in: preventive conservation, sustainability, and environmental management. Conservation: the Getty Conservation Institute newsletter, Los Angeles, v. 22 n. 1, p. 4-9, 2007a. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/publications/newsletters/22_1/feature. html. (Acesso em 01/09/2012).

HENRY, M.C. The heritage building envelope as a passive and active climate moderator: Opportunities and issues in reducing dependency on air-conditioning. Experts Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies. Tenerife: Getty Conservation Institute, 2007b. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/our_projects/science/climate/paper_henry.pdf (Acesso em 05/09/2012).

HENRY, M.C. Climate change: balancing environmental needs of society & collections. Climate Change and Museum Collections, International Institute for Conservation Congress, Londres, setembro de 2008. Disponível em: http://www.iiconservation.org/node/36 (Acesso em 04/09/2012).

HENSEN, J. L. M. Towards more effective use of building performance simulation in design. In: LEEUWEN, J.P. e TIMMERMANS, H.J.P. (Eds.). Proceedings of the 7th International Conference on Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning, 2-5 July 2004, Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2004. Disponível em: http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/publications/04_ddss_effictive_use.pdf (Acesso em 30/09/2012).

HERTZ, J. B. Ecotecnicas em arquitetura: como projetar nos trópicos úmidos do Brasil. São Paulo: Pioneira, 1998. 125 p. ISBN 8522101248

HIMMELSTEIN, P. e APPELBAUM, B. Going green in museums: a conservator's view. In: Proceedings of Gray Areas to Green Areas: Developing Sustainable Practices in Preservation Environments Symposium. The Kilgarlin Center for Preservation of the Cultural Record, School of Information, The University of Texas at Austin, 2007. Disponível em: http://www.ischool.utexas.edu/kilgarlin/gaga/proceedings.html (Acesso em 03/09/2012).

HIRASHIMA, S. Q. S. Calibração do índice de conforto térmico temperatura fisiológica equivalente (PET) para espaços abertos do município de Belo Horizonte, MG. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura, 2010.

HOLLÓS, A.C. e PEDERSOLI JR. J.L. Gerenciamento de riscos: uma abordagem interdisciplinar. Ponto de Acesso, Salvador, v. 3, n. 1, p. 72-81, 2009.

HOLM, A. et al. The hygrothermal behaviour of rooms: combining thermal building simulation and hygrothermal envelope calculation. In: Proceedings of the 8th International Building Performance Simulation Association Conference, BS 2003, Eindhoven, IBPSA, 2003. Disponível em: http://www.ibpsa.org/ \proceedings\BS2003\BS03_0499_506.pdf (Acesso em 28/09/2012).

HON, D. N. S. e SHIRAISHI, N. Wood and cellulosic chemistry. 2nd. Nova Iorque: Marcel Dekker, 2001. viii, 914 p. ISBN 0824700244

HONG, S.H. et al. Monitoring and modelling the storage environment at The National Archives, UK. In: Proceedings of ICOM-CC 16th Triennial Conference. Lisboa, 19-23 setembro de 2011. Disponível em: http://www.nationalarchives.gov.uk/documents/information-management/building-environment-simulation-project.pdf (Acesso em 23/02/2013).

HOWARD, T. e CLARK, P. Correction and downscaling of NWP wind speed forecasts. Meteorological Applications, v. 14, n. 2, p. 105-116, 2007. ISSN 1469-8080.

HUIJBREGTS, Z. et al. A proposed method to assess the damage risk of future climate change to museum objects in historic buildings. Building and Environment, v. 55, n. 0, p. 43-56, 2012. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132312000170 (Acesso em 03/09/2012).

HUKKA, A.; VIITANEN, H. A. A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology, v. 33, n. 6, p. 475-485, 1999. ISSN 0043-7719.

HUMPHREYS, M. Outdoor temperatures and comfort indoors. Building Research & Information, v. 6, n. 2, p. 92, 1978.

HUSSEIN, A. S. e EL-SHISHINY, H. Influences of wind flow over heritage sites: A case study of the wind environment over the Giza Plateau in Egypt. Environmental Modelling & Software, v. 24, n. 3, p. 389-410, 2009. ISSN 1364-8152. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815208001497 (Acesso em 24/09/2012).

HUYSSEN, A. Escapando da amnésia: o museu como cultura de massa. Revista do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, Rio de Janeiro, n. 23, 1994.

ICCROM - INTERNATIONAL CENTRE FOR THE STUDY OF THE PRESERVATION AND RESTORATION OF CULTURAL PROPERTY. A user-friendly assessment tool for museum storage. ICCROM-UNESCO Partnership for the Preventive Conservation of Endangered Museum Collections in Developing Countries. UNESCO Document Catalog Number 186245, 2008, 11p.

ICCROM - INTERNATIONAL CENTRE FOR THE STUDY OF THE PRESERVATION AND RESTORATION OF CULTURAL PROPERTY. Manual de gestión de riesgo de colecciones. ICCROM-UNESCO Partnership for the Preventive Conservation of Endangered Museum Collections in Developing Countries. UNESCO Document Catalog Number 186240, 2009, 97p.

IFLA - International Federation of Library Associations and Institutions. Library & archives facing the challenges of sustainable development. International Preservaion News. Paris, v. 44, 2008. ISSN 0890–4960.

IMPEY, O. e MACGREGOR A. the origins of museums; the cabinet of curiosities in sixteenth- and seventeenth-century Europe. In: STANIFORTH, S. (ed.) Historical perspectives on preventive conservation. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2013, p. 78-82.

IPI - IMAGE PERMANENCE INSTITUTE. Step-by-step workbook: achieving a preservation environment for collections. Rochester, Nova Iorque: Rochester Institute of Technology, 2005. Disponível em: http://www.imagepermanenceinstitute.org/shtml_sub/cnbworkbook.pdf (Acesso em 22/08/2012).

IPI - IMAGE PERMANENCE INSTITUTE. Seminar reference workbook for sustainable preservation practices for managing storage environments. Version 1.0. Rochester, Nova Iorque: Rochester Institute of Technology, 2010. Disponível em: http://ipisustainability.org/pdfs/sustainability_workbook_texas.pdf (Acesso em 07/09/2012).

IPI - IMAGE PERMANENCE INSTITUTE. Preservation metrics. Nova Iorque: Rochester Institute of Technology, 2013. Disponível em: https://www.imagepermanenceinstitute.org/environmental/research/preservation-metrics (Acesso em 25/04/2013).

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DE SÃO PAULO. Divisão de Edificaçoes. Conforto higrotérmico: avaliação de desempenho de habitações térreas unifamiliares. São Paulo, 1981. (mimeog.)

ISAKSSON, T. et al. Critical conditions for onset of mould growth under varying climate conditions. Building and Environment, v. 45, n. 7, p. 1712-1721, 2010. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132310000351 (Acesso em 23/02/2013).

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Standard 7730, Ergonomics of the thermal environment—analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva: International Organization for Standardization; 2005.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Standard 13790, Thermal performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling. Genebra: International Standardization Organization, 2004.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Standard 14044, Environmental management life cycle assessment. Genebra: International Standardization Organization, 2006.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Standard 10456, Building materials and products -- Hygrothermal properties -- Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. Genebra, International Standardization Organization, 2007. Disponível em: http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architettu/docenti-st/Fabio-Pero/materiali-/corso-tecn1/_mat-_ISO_FDIS-10456--dati-materiali.pdf (Acesso em 23/02/2013).

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Standard 31000, Risk management - Principles and guidelines on implementation. Genebra: International Standardization Organization, 2009.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Standard 9223, Corrosion of metals and alloys -- Corrosivity of atmospheres -- Classification, determination and estimation. Genebra: International Standardization Organization, 2012.

ITO, T. Lessons of the Sendai mediatheque. Japan Architect, v. 41, p. 7, 2001.

IZARD, Jean-Louis e GUYOT, Alain. Arquitectura bioclimática. Barcelona, Gustavo Gili, 1980.

JACKSON, M. Green home-rating systems: a preservation perspective. APT Bulletin. v. 41, n. 1, p. 13-18, 2010. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/25652698 (Acesso em 07/09/2012).

JAKIEŁA, S. et al. Numerical modelling of moisture movement and related stress field in lime wood subjected to changing climate conditions. Wood Science and Technology, v. 42, n. 1, p. 21-37, 2008. ISSN 0043-7719. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/s00226-007-0138-5 (Acesso em 03/09/2012).

JANSSEN, H.; CHRISTENSEN, J. E. Hygrothermal optimisation of museum storage spaces. Energy and Buildings, v. 56, n. 0, p. 169-178, 2013. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812004471 (Acesso em 15/04/2013).

JANSSEN, H. e SCHEFFLER, G.A. Numerical modelling of dynamic effects in porous media flow. In: Proceedings of 11th International Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings Conference: Clearwater Beach 5-9 December 2010. Disponível em: http://www.ornl.gov/sci/ buildings/2010/B11%20papers/11_Janssen.pdf (Acesso em 24/09/2012).

JANSSENS, A. et al. From EMPD to CFD-overview of different approaches for heat, air and moisture modelling in IEA Annex 41. Proceedings of the IEA ECBCS Annex 41 Closing Seminar, Copenhagen, 2008. Disponível em: http://orbit.dtu.dk/services/downloadRegister/3292312/ST1A%20-%20Nordic%20paper%20 Annex%2041%20Copenhagen%20AJ.pdf (Acesso em 23/02/2013).

JEONG, J.H. e LEE, K.H. The physical environment in museums and its effects on visitors' satisfaction. Building and Environment, v. 41, n. 7, p. 963-969, 2006. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132305001460 (Acesso em 22/08/2012).

JIANG, Y. et al. Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 91, p. 331-353, 2003. Disponível em: https://engineering.purdue.edu/~yanchen/paper/2003-1.pdf (Acesso em: 17/08/2011).

JIANG, Y. et al. Validation of CFD simulations for natural ventilation. International Journal of Ventilation, v. 2, n. 4, p. 359-369, 2004. ISSN 1473-3315. Disponível em: https://engineering.purdue.edu/~yanchen/paper/ 2004-2.pdf (Acesso em 30/09/2012).

JOHANSSON, E. et al. Characterisation of corrosivity in indoor atmospheres with different metals and evaluation techniques. British corrosion journal, v. 33, n. 1, p. 59-66, 1998.

JOHANSSON, P. Critical moisture conditions for mould growth on building materials. Rapport TVBH-3051. (tese de licenciatura). Lund: Lund University, 2012. Disponível em: http://www.byfy.lth.se/fileadmin/byfy/files/ TVBH-3000pdf/ TVBH-3051PJweb.pdf (Acesso em 03/09/2012).

JOHANSSON, S. et al. Estimation of mould growth levels on rendered façades based on surface relative humidity and surface temperature measurements. Building and Environment, v. 45, n. 5, p. 1153-1160, 2010. ISSN 0360-1323.

JOHNSON, M.-H. et al. Performance evaluation of network airflow models for natural ventilation. HVAC & R Research, v. 18, n. 3, p. 349-365, 2012. ISSN 10789669.

KAEFERHAUS, J. Historic buildings as museums: Sustainability and energy saving in museums, depots, churches and historic buildings. In: Developments in Climate Control of Historic Buildings. Proceedings from the International Conference "Climatization of Historic Buildings, State of the Art", December 2, 2010, Linderhof Palace. Disponível em: http://www.forschungsallianz-kulturerbe.de/download/3-8167-8637-5-developments-in-climate-control-of-historic-buildings.pdf (Acesso em 11/09/2012).

KARAGIOZIS, A. e GU, L. The EMPD model. IEA Annex 41 working meeting, Glasgow, 2004. Disponível em: http://www.kuleuven.be/bwf/projects/annex41/protected/data/ORNL%20Oct%202004%20Paper%20A41-T1-US-04-5.pdf (Acesso em 23/02/2013).

KARAGIOZIS, A. e SALONVAARA, M. Hygrothermal system-performance of a whole building. Building and Environment, v. 36, n. 6, p. 779-787, 2001. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132300000639 (Acesso em 24/09/2012).

KAROGLOU, M. et al. Capillary rise kinetics of some building materials. Journal of Colloid and Interface Science, v. 284, n. 1, p. 260-264, 2005. ISSN 0021-9797. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/ article/pii/S0021979704009968 (Acesso em 24/09/2012).

KAROGLOU, M. et al. A powerful simulator for moisture transfer in buildings. Building and Environment, v. 42, n. 2, p. 902-912, 2007. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/ article/pii/S0360132305004415 (Acesso em 24/09/2012).

KATES, R. et al. Sustainability science. KSG working paper n. 00-018, 2000. Disponível em: http://ssrn.com/abstract=257359 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.257359 (Acesso em 01/09/2012).

KEENE, S. Audits of care: a framework for collections condition surveys. In: KNELL, S. (ed). Care of Collections. Londres: Routledge, 1984, p. 60-82.

KERSCHNER, R. A practical approach to environmental requirements for collections in historic buildings. Journal of the American Institute for Conservation, Washington, v. 31, n. 1, p. 65-76 ,1992. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/3179613 (Acesso em 23/02/2013).

KERSCHNER, R. Providing safe and practical environments for cultural property in historic buildings… and beyond. In: From Gray Areas to Green Areas - Developing Sustainable Practices in Preservation Environments, 2007 Symposium Proceedings. The Kilgarlin Center for Preservation of the Cultural Record, School of Information, The University of Texas at Austin, 2008. Disponível em: http://www.ischool.utexas.edu/kilgarlin/gaga/proceedings.html (Acesso em 11/09/2012).

KHALIL, E. E. Preserving the tombs of the pharaohs. ASHRAE Journal, v. 48, n. 12, p. 34, 2006. ISSN 00012491. Disponível em: http://www.freepatentsonline.com/article/ASHRAE-Journal/156136294.html (Acesso em 28/09/2012).

KHALIL, E. E. CFD applications for the preservation of the tombs of the Valley of Kings, Luxor. Proceedings of the 11th International Building Performance Simulation Association Conference, BS 2009, Glasgow. IBPSA, 2009. p.1865-1871. Disponível em: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_1865_1871.pdf (Acesso em 24/09/2012).

KHALIL, E. E. Computational techniques applied to design ventilation system for the preservation of the tombs of the valley of Kings, Luxor. In: Proceedings of ICCES 2010 - International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences, Las Vegas, v. 15, n. 2, p. 47-56, 2010. Disponível em: http://www.techscience.com/doi/10.3970/icces.2010.015.047.pdf (Acesso em 28/09/2012).

KHALIL, E. E. ventilation of the archeological tombs of the Valley of Kings, Luxor, Egypt. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, v. 20, n. 1, p. 1150002-1 a 115002-7, 2012. ISSN 2010-1325. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1142/S2010132511500027 (Acesso em 28/09/2012).

KHALIL, E. E. e ABDEL-AZIZ, O. A dry passage to the afterlife. Fluent News, v. 15, n. 1, p. 28, 2006.

KING, S. e PEARSON, C. Controle ambiental para instituições culturais: planejamento adequado e uso de tecnologias alternativas. In: MENDES, M. et al. (Org.). Conservação: Conceitos e práticas. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2001. p. 41-64.

KINNEAR, D. et al. Colour in visualisation for computational fluid dynamics. Optics & Laser Technology, v. 38, n. 4–6, p. 286-291, 2006. ISSN 0030-3992. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003039920500109X (Acesso em 30/09/2012).

KLEIVEN, T. Natural ventilation in buildings: architectural concepts, consequences and possibilities. (Tese de Doutorado). Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Architecture and Fine Art, Department of Architectural Design, History and Technology, 2003. ISSN 1503-8181. Disponível em: http://ntnu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:126224 (Acesso em 23/02/2013).

KLÜPPEL, G. P. e GOMES, A.M.S. Tratamento climático da sala da Reserva Técnica e definições ambientais para o acervo armazenado do Museu de Arte Sacra da UFBA. In: XIII Congresso da ABRACOR, 2009, Porto Alegre. XIII Congresso ABRACOR. Rio de Janeiro: ABRACOR, 2009. v. 1. p. 269-275.

KLÜPPEL, G. P. et al. Adequação ambiental e eficiência energética para o Museu de Arte Sacra da Bahia. In: 2º Seminário Internacional Museografia e Arquitetura de Museus: Identidades e Comunicação, 2010, Rio de Janeiro. ANAIS do 2º Seminário Internacional Museografia e Arquitetura de Museus: identidades e comunicação. Rio de Janeiro: FAU/PROARQ, 2010. v. 1. Disponível em: http://www.arquimuseus.arq.br/anais-seminario_2010/eixo_iii/p3-21_artigo_griselda_ana_vitoria_marcia_freire.pdf (Acesso em 22/11/2012).

KOENIGSBERGER, O. H. et al. Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales. Madrid: Paraninfo, 1977. 328 p., ISBN 8428308853.

KORJENIC, A. e BEDNAR, T. Development and validation of a new method for determining humidification and dehumidification needs. Applied Thermal Engineering, v. 40, n. 0, p. 275-283, 2012. ISSN 1359-4311. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431112001068 (Acesso em 23/02/2013).

KOZŁOWSKI, R. Standardisation activity on the protection of sensitive materials like wood within CEN Technical Committee 346. Establishing standards for allowable microclimatic variations for polychrome wood. Oslo, 2010. Disponível em: http://www.cyf-kr.edu.pl/~ncbratas/oslo/KozlowskiOslo2010.pdf (Acesso em 22/02/2013).

KRAMER, R.P. et al. Simplified thermal and hygric building models: a literature review. In: Proceedings of the 5th International Building Conference, 28-31 May 2012, Kyoto, p. 1-8. Disponível em: http://repository.tue.nl/730726 (Acesso em 03/10/2012).

KRAMER, R.P. et al. Inverse modeling of climate responses of monumental buildings. In: ASHLEY-SMITH, J. et al. (eds.) Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Londres, Achetype publications, 2013, p. 425-437. Disponível em: http://www.doernerinstitut.de/downloads/Climate_for_ Collections.pdf (Acesso em 29/08/2013).

KRAMER, R. e VAN SCHIJNDEL, A. W. Inverse modeling of climate responses of monumental buildings. arXiv preprint arXiv:1206.4438, 2012. Disponível em: http://arxiv.org/pdf/1206.4438v1 (Acesso em 03/10/2012).

KRAUSSE, B. et al. Environmental performance of a naturally ventilated city centre library. Energy and Buildings, v. 39, n. 7, p. 792-801, 2007. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/ rticle/ pii/S0378778807000515 (Acesso em 05/10/2012).

KRUGER, E. L. e DINIZ, W. Relationship between indoor thermal comfort conditions and the Time Weighted Preservation Index (TWPI) in three Brazilian archives. 2001. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910003752 (Acesso em 01/02/2011).

KRUGER, E. L. e GIVONI, B. Predicting thermal performance in occupied dwellings. Energy and Buildings, v. 36, n. 3, p. 301-307, 2004. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S0378778804000118 (Acesso em 06/10/2012).

KRÜGER, E.L. et al. Avaliação das condições ambientais em museus: aplicação de uma metodologia de predição com vistas ao uso adequado de insuflamento de ar. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e 10º Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, São Paulo. Anais do X ENTAC. Porto Alegre: ANTAC, 2004. v. 1. p. 1-10.

KRUS M, et al. Comparative evaluation of the predictions of two established mold growth models. In: Proceedings of Thermal Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings XI, Florida, December 2010. Disponível em: http://www.ornl.gov/sci/buildings/2010/B11%20papers/229_Krus.pdf (Acesso em 30/08/2012).

KRUS, M. et al. Mould growth prediction by computational simulation on historic buildings. Museum Microclimates. Copenhagen 2007.

KUMAR, P. P. The effect of Von Karman vortex street on building ventilation. In: Proceedings of the World Congress on Engineering. 2009. Disponível em: http://www.iaeng.org/publication/WCE2009/WCE2009_pp1601-1605.pdf (Acesso em 23/02/2013).

KUMARAN, M.K. Fundamentals of transport and storage of moisture in building materials and components. In: TRECHSEL, H. R. e BOMBERG, M. (eds.) Moisture control in buildings: the key factor in mold prevention. West Conshohocken: ASTM International, 2a ed., 2009, cap1. ISBN 9780803170049

KÜNZEL, H. M. et al. Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope. Solar Energy, v. 78, n. 4, p. 554-561, 2005. ISSN 0038-092X. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X04000507 (Acesso em 23/09/2012).

KUZMIN, D. Introduction to CFD. University of Dortmund, Institute of Applied Mathematics, 2008. Disponível em: http://www.mathematik.uni-dortmund.de/~kuzmin/cfdintro/cfd.html (Acesso em 20/04/2008)

KWOK, A. e GRONDZIK, W. The green studio handbook: environmental strategies for schematic design. 5. ed. Oxford; Burlington, MA: Architectural, 2007. x, 378 p.

LACANETTE, D. The Lascaux simulator, a numerical tool for preventive conservation. International preservation news, n. 52, p. 31-36, 2010. Disponível em: http://www.ifla.org/files/pac/ipn/52-december-2010.pdf (Acesso em 03/10/2012).

LACANETTE, D. e MALAURENT, P. La 3D au service de la conservation des grottes ornées, l'exemple de Lascaux et du simulateur Lascaux. In Situ, 13, 2010. Disponível em: http://insitu.revues.org/6793 (Acesso em 03/10/2012).

LACANETTE, D. et al. Etude des transferts de masse et de chaleur dans la grotte de Lascaux: le suivi climatique et le simulateur. Karstologia, ISSN 0751-7688, n. 50, p. 19-30, 2007. Disponível em: http://www.trefle.u-bordeaux1.fr/mfen/cluster/doc/LACANETTE.pdf (Acesso em 03/10/2012).

LACANETTE, D. et al. An eulerian/lagrangian method for the numerical simulation of incompressible convection flows interacting with complex obstacles: Application to the natural convection in the Lascaux cave. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 52, n. 11–12, p. 2528-2542, 2009. ISSN 0017-9310. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931009000672 (Acesso em 01/10/2012).

LACOTIZ, A. Estudo diacrônico da função e dos valores semânticos dos sufixos -ança/ -ença, -ância/ -ência no português. (Dissertação de mestrado). São Paulo: Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, 2007. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8142/tde-28012008-112539/pt-br.php (Acesso em 06/11/2013).

LA GENNUSA, M. et al. Control of indoor environments in heritage buildings: experimental measurements in an old Italian museum and proposal of a methodology. Journal of Cultural Heritage, v. 6, n. 2, p. 147-155, 2005. ISSN 1296-2074. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207405000312 (Acesso em 12/09/2012).

LA GENNUSA, M. et al. Conflicting needs of the thermal indoor environment of museums: In search of a practical compromise. Journal of Cultural Heritage, v. 9, n. 2, p. 125-134, 2008. ISSN 12962074. Disponível em: http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=32497136&lang=pt-br&site=ehost-live (Acesso em 12/09/2012).

LAMBERTS, R. et al. Eficiência energética na arquitetura. 2ª ed. rev. São Paulo: Prolivros, 2004.

LAMBERTS, R. et al. Sustentabilidade nas edificações: contexto internacional e algumas referências brasileiras na área. Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/sustentabilidade_nas_edificacoes_contexto_internacional_e_algumas_referencias_brasileiras_na_areasustentabilidade_nas_edificacoes_contexto_internacional_e_algumas_referencias_brasileiras_na_area.pdf. (Acesso em 09/09/2012).

LANKESTER, P. e BRIMBLECOMBE, P. Future thermohygrometric climate within historic houses. Journal of Cultural Heritage, v. 13, n. 1, p. 1-6, 2012. ISSN 1296-2074. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207411000598 (Acesso em 02/10/2012).

LARA FILHO, D. Museu: de espelho do mundo a espaço relacional (dissertação de mestrado), São Paulo: Universidade de São Paulo, Mestrado em ciência da informação e documentação, 2006.

LARSEN, P.K. Low energy climate control in historic buildings - Conservation heating or dehumidification? Establishing standards for allowable microclimatic variations for polychrome wood. Oslo, 2010. Disponível em: http://www.cyf-kr.edu.pl/~ncbratas/oslo/KlenzLarsenOslo2010.pdf (Acesso em 22/02/2013).

LARSEN, P.K. e BROSTROM, T. Climate control in cultural heritage buildings in Denmark. In: Developments in Climate Control of Historic Buildings. Proceedings from the International Conference "Climatization of Historic Buildings, State of the Art", December 2, 2010, Linderhof Palace. Disponível em: http://www.forschungsallianz-kulturerbe.de/download/3-8167-8637-5-developments-in-climate-control-of-historic-buildings.pdf (Acesso em 11/09/2012).

LEAL, C.F.B. Recortes de história social das missões da UNESCO no Brasil, 1964-1979. Nos arquivos do IPHAN Revista Eletrônica de Pesquisa e Documentação, 2010. Disponível em: http://portal.iphan.gov.br/portal/baixaFcdAnexo.do?id=1540 (Acesso em 05/10/2012).

LEAL, C.F.B. As missões da UNESCO no Brasil: Paul Coremans. Anais do XXVI Simpósio Nacional de História – ANPUH, São Paulo, julho 2011. Disponível em: http://www.snh2011.anpuh.org/resources/anais/14/1312827174_ARQUIVO_AsmissoesdaUNESCOnoBrasil-PaulCoremans.pdf (Acesso em 05/10/2012).

LECHNER, Norbert M. Heating, Cooling, Lighting: Design Methods for Architects. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2001, 2a ed.

LECHTMAN, H. et al. A matter of teamwork - a discussion about technical studies and art history. Conservation - The Getty Conservation Institute Newsletter, Los Angeles, v. 20, n. 1, p. 11-16, 2005.

LEHMBRUCK, M. Conservation - physiochemistry of the objects. Museum International, v. 26, n. 3-4, p. 205-220, 1974. ISSN 1468-0033. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-0033.1974.tb01836.x (Acesso em 22/02/2013)

LERNER, J.C. e BOLDES, U. (eds.) Wind tunnels and experimental fluid dynamics research, InTech, 709 p. ISBN 978-953-307-623-2. DOI: 10.5772/730. Disponível em: http://www.intechopen.com/books/wind-tunnels-and-experimental-fluid-dynamics-research (Acesso em 09/11/2012).

LI, Y. Airflow, heat and mass transfer in enclosures. In: AWBI, H. B. Ventilation systems - design and performance. Londres: Taylor & Francis, 2008, ISBN 9780419217008, p. 1-61.

LI, Y. e NIELSEN, P. V. CFD and ventilation research. Indoor Air, v. 21, n. 6, p. 442-453, 2011. ISSN 1600-0668. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00723.x (Acesso em 22/09/2012).

LIDDAMENT, M. PHPAIDA - The on-line natural ventilation, mixed mode and air infiltration rate calculation algorithm. 2008. (Página de internet). Disponível em: http://www.veetech.org.uk/PHP%20Programs/phpaida.php (Acesso em 23/05/2013).

LIMPENS-NEILEN, D. Bench heating in monumental churches: thermal performance of a prototype. (Tese de doutorado). Technische Universiteit Eindhoven, [Faculteit Bouwkunde], 2006. ISBN 9038617763. Disponível em: http://alexandria.tue.nl/extra2/200611882.pdf (Acesso em 01/10/2012).

LIMPENS-NEILEN, D. et al. Thermal performance of a local bench heating system for churches. 9th international conference RoomVent 2004, Coimbra, 5-8 de setembro de 2004. Disponível em: http://sts.bwk.tue.nl/friendlyheating/Publicaties/Limpens-Neilen_Netherlands_rv04.pdf (Acesso em 01/10/2012).

LIMPENS-NEILEN, D. et al. CFD study on a local radiant heating system and the resulting indoor climate. In: Proceedings of the 9th International Building Performance Simulation Association Conference, BS 2005, Montreal, IBPSA, 2005a, p. 633-640. Disponível em: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2005/BS05_0633_640.pdf (Acesso em 01/10/2012).

LIMPENS-NEILEN, D. et al. The influence of a local heating system on the indoor climate of a large room. In: Proceedings of the 7th Nordic Building Physics Conference, Reykjavık, June 13–15, 2005b. Disponível em: http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik/pdf/art_147.pdf (Acesso em 01/10/2012).

LINDEN, J. et al. Field-tested methodology for optimizing climate management..In: ASHLEY-SMITH, J. et al. (eds.) Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Londres, Achetype publications, 2013, p. 93-104. Disponível em: http://www.doernerinstitut.de/downloads/Climate_for_ Collections.pdf (Acesso em 29/08/2013).

LODI, C. Sustentabilidade ambiental, econômica e social nos novos museus cariocas: Museu do Amanhã, Museu de Arte do Rio e novo Museu da Imagem e do Som. In: 2º Seminário Internacional Museografia e Arquitetura de Museus - Identidades e Comunicação. Rio de Janeiro, UFRJ, 16 a 19 de novembro de 2010. Disponível em: http://www.arquimuseus.arq.br/anais-seminario_2010/eixo_iii/P3_Artigo_Cristina_Lodi.html (Acesso em 07/09/2012).

LOMAS, K. J. Architectural design of an advanced naturally ventilated building form. Energy and Buildings, v. 39, n. 2, p. 166-181, 2007. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806001617 (Acesso em 03/09/2012).

LONY, R.J.M. et al. Evaluation of the climate control performance and reliability of active display cases. Restoration of Buildings and Monuments, v. 16, n. 1, p. 15-26, 2010. Disponível em: http://alexandria.tue.nl/openaccess/Metis218547.pdf (Acesso em 02/10/2012).

LOOMANS, M. The measurement and simulation of indoor air flow. (Tese de doutorado). Technische Universiteit Eindhoven, 1998, ISBN 90 6814 085 X. Disponível em: http://alexandria.tue.nl/extra2/9803293.pdf (Acesso em 24/09/2012).

LÜ, X. Modelling of heat and moisture transfer in buildings: II. Applications to indoor thermal and moisture control. Energy and Buildings, v. 34, n. 10, p. 1045-1054, 2002. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778802000221 (Acesso em 24/09/2012).

LU, T. e CHEN, C. Uncertainty evaluation of humidity sensors calibrated by saturated salt solutions. Measurement, Volume 40, Issue 6, July 2007, Pages 591-599. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026322410600193X (Acesso em 15/08/2011)

LUBECK, A. Green restorations: sustainable building and historic homes. Gabriola Island, BC: New Society Publishers, 2010.

LUBITZ, W. D. Accuracy of vertically extrapolating meteorological tower wind speed measurements. Canadian Wind Energy Association Annual Conference Winnipeg, MB, Canada, 2006. Disponível em: http://www.rsach.plus.com/documents/Shear-Lubitz_CanWEA_2006.pdf. (Acesso em 23/02/2013).

LUCAS, V.S. Construção sustentável - sistema de avaliação e certificação. (Dissertação de mestrado). Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2011. Disponível em: http://run.unl.pt/handle/10362/5613 (Acesso em 07/09/2012).

ŁUKOMSKI, M. Fatigue fracture of paint layers from repeated cycles of humidity fluctuations. Establishing standards for allowable microclimatic variations for polychrome wood. Oslo, 2010. Disponível em: http://www.cyf-kr.edu.pl/~ncbratas/oslo/LukomskiOslo2010.pdf (Acesso em 22/02/2013).

ŁUKOMSKI, M. Painted wood. What makes the paint crack? Journal of Cultural Heritage, v. 13, n. 3, Supplement, p. S90-S93, 2012. ISSN 1296-2074. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S129620741200009X (Acesso em 01/10/2012).

LUXFORD, N. Reducing the risk of open display: optimising the preventive conservation of historic silks. (Tese de doutorado). University of Southampton, Winchester School of Art, 2009, 409p. Disponível em: http://eprints.soton.ac.uk/162153/ (Acesso em 03/10/2012).

LUXFORD, N et al. Applying preventive conservation recommendations for silk in historic houses. In: Janssen, E and Paris, M and Sawicki, M and Seymour, K and Thorn, A, (eds.) Proceedings of the joint interim conference Multidisciplinary Conservation: A Holistic View for Historic Interiors Rome 23-26 March 2010.

MACIEL, A.A. Integração de conceitos bioclimáticos ao projeto arquitetônico. (Tese de doutorado). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2006. Disponível em: http://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/88974/234130.pdf (Acesso em 23/02/2013).

MAEKAWA, S. Estratégias alternativas de controle climático para instituições culturais em regiões quentes e úmidas. In: BITTENCOURT, J.N. et al. Museus, Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro: Museu Histórico Nacional, p. 223-244, **2007a**.

MAEKAWA, S Investigations of climate control alternatives for cultural institutions in hot and humid climates. Experts Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies, Abril de 2007, Tenerife: Getty Conservation Institute, **2007b**. Disponível em: http://getty.edu/conservation/our_projects/science/climate/paper_maekawa.pdf (Acesso em 15/08/2012).

MAEKAWA, S. e BELTRAN, V. Climate controls for historic buildings: A new strategy. Conservation: the Getty Conservation Institute Newsletter, Los Angeles, v. 19, n. 1, p. 21-24, 2004. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/publications/newsletters/19_1/ feature.html (Acesso em 20/04/2008)

MAEKAWA, S. e CONRAD, E. Conservation-focused climate control system for an 18th century house museum in the Forbidden City, China. In: 10th REHVA World Congress, Clima 2010, Antalya, Turkey, May 2010, R4-TS36-OP04. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/science/climate/juanqinzhai.pdf (Acesso em 22/08/2011)

MAEKAWA, S. e MORALES, M.G. Low-cost climate control system for museum storage facility on Tenerife Island. 25th International Conference of Passive and Low Energy Architecture (PLEA 2006), Geneva, September 6–8, 2006. Disponível em: http://getty.edu/conservation/our_projects/science/climate/valle_de_ guerra_PLEA_2006.pdf (Acesso em 12/09/2012).

MAEKAWA, S. et al. Testing alternatives to conventional air-conditioning in coastal Georgia. APT Bulletin, Springfield, v. 38, n. 2-3, p. 3-11, 2007. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/ science/climate/hollybourne_cottage_APT.pdf (Acesso em 22/08/2011)

MAEKAWA, S. et al. Climate controls in a historic house museum in the tropics:A case study of collection care and human comfort. 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA 2009), Quebec City, Canada, 22-24 June 2009, **2009a**. Disponível em: http://getty.museum/conservation/science/climate/ barbosa_plea.pdf (Acesso em 22/08/2011)

MAEKAWA, S. et al. Sistema de controle climático para a Biblitoeca Rui Barbosa: Preservação da coleção e conforto dos visitantes. In: XIII Congresso Abracor - Congresso Internacional da Associação Brasileira de Conservadores e Restauradores de Bens Culturais, 2009, Porto Alegre. Preservação do Patrimônio: Ética e Responsabilidade Social". Porto Alegre : ABRACOR, **2009b**. v. 1. p. 281-285.

MAEKAWA, S. e TOLEDO, F. A climate control system for Hollybourne Cottage, Jekyll Island Historic District, Georgia. **2001a**. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/publications/pdf_ publications/iaq453.pdf. (Acesso em 22/08/2011)

MAEKAWA, S. e TOLEDO, F. Sustainable climate control for historic buildings. In: 18th International Conference on Passive Low Energy Architectures (PLEA 2001) Conference, Florianópolis, **2001b**. Disponível em http://www.getty.edu/conservation/publications/ pdf_publications/plea.pdf (Acesso em 20/04/2008)

MAEKAWA, S. e TOLEDO, F. Controlled ventilation and heating to preserve collections in historic buildings in hot and humid regions. In: Proceedings of 13th ICOM-CC Triennial Conference, Rio de Janeiro, 22-27 setembro 2002. ICOM Committee for conservation. Londres: James & James, 2002, p. 58-65. Disponível em: http://www.getty.edu/ conservation/publications/pdf_publications/icomcc1.pdf (Acesso em 20/04/2008)

MAEKAWA, S. e TOLEDO, F. Sustainable climate control for historic buildings in subtropical climates", Management of Environmental Quality: An International Journal, v. 14, n. 3, p.369–382, 2003. Disponível em: http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?issn=1477-7835&volume=14&issue=3&articleid=871432 &show=abstract (Acesso em 12/09/2012).

MAEKAWA, S. e TOLEDO, F. A collection climate control system for an ethnographic storage of a museum in north of Brazil. In: ASHRAE Winter Annual Meeting. Orlando, January 2010. 7p. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/science/climate/goeldi_ashrae.pdf (Acesso em 22/08/2011)

MAEKAWA, S. e TOLEDO, F. Climate controls in a historic house museum in the tropics: A case study of collection care and human comfort. International Preservation News, n. 54, p. 22-26, 2011. Disponível em: http://www.ifla.org/files/pac/ipn/IPN%2054def.pdf (Acesso em 23/09/2012).

MAEKAWA S. e VALENTIN, N. Use of controlled ventilation and heating for preservation of both collections and historic buildings. Documento eletrônico, Getty Conservation Institute, 2003. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/science/climate/moulds_2003.pdf (Acesso em 22/08/2011)

MALAURENT, P. et al. Contribution of numerical modelling of environmental parameters to the conservation of prehistoric cave paintings: the example of Lascaux Cave. Conservation and Management of Archaeological Sites, v. 8, n. 2, p. 59-76, 2006. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1179/175355206x202976 (Acesso em 03/10/2012).

MALDONADO, E. HVAC system design. In: TOMBAZIS, A. et al. Museums - energy efficiency and sustainability in retrofitted and new museum buildings handbook. University College Dublin, Ireland, 2004, p. 48-57. Disponível em: http://eprints.sparaochbevara.se/489/1/Handbook_ sustainable_Museums.pdf (Acesso em 23/08/2011)

MALKAWI, A. e AUGENBROE, G. Advanced building simulation. Nova Iorque: Spon Press, 2003. x, 252 p. ISBN 0415321220. Disponível em: http://www.loc.gov/catdir/toc/ecip0412/2003027472.html (Acesso em 21/01/2013).

MARSHALLSAY, P. e LUXTON, S. Air conditioning design for cultural institutions in tropical climates. AICCM bulletin. v. 29, p. 19-36, 2006. Disponível em: http://www.aiccm.org.au/docs/Bulletin2004_05/ MarshallayLuxton_Bulletin_2004and05_Vol29.pdf (Acesso em 13/09/2012).

MARTENS, M.H.J. Climate risk assessment in museums: degradation risks determined from temperature and relative humidity data. (Tese de doutorado) Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, Department of Architecture, Building and Planning, 2012, 214p., ISBN 978-90-6814-645-5. Disponível em: http://repository.tue.nl/729797 (Acesso em 05/09/2012).

MARTENS, M.H.J. e SCHELLEN, H. Climate risk assessment in museums. In: ASHLEY-SMITH, J. et al. (eds.) Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Londres, Achetype publications, 2013, p. 363-374. Disponível em: http://www.doernerinstitut.de/downloads/Climate_for_ Collections.pdf (Acesso em 29/08/2013).

MASCARÓ, L. R. Energia na edificação: estratégia para minimizar seu consumo. 2a. ed. São Paulo, Projeto, 1991, 213 p., il.

MASCARÓ, L. R. Luz, clima e arquitetura. São Paulo, Nobel, 1983.

MATSUMOTO, E. et al..Calibração do túnel de vento de camada limite atmosférica e proposição de uma nova metodologia simplificada de cálculo para a ventilação natural do ambiente construído. In: 10º. Encontro Nacional e 6º. Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Natal. São Paulo: ANTAC, 2009. p. 1796-1799.

MAZRIA, E. El libro de la energía solar pasiva. Cidade do México: Gustavo Gili, 1985. 368 p. ISBN 968-6085-76-9.

McCABE, J. M. Air humidification and aeration in museums. In: STANIFORTH, S. (ed.) Historical perspectives on preventive conservation. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2013, p. 131-133.

McCORMICK-GOODHART, M. The allowable temperature and relative humidity range for the safe use and storage of photographic materials. Journal of the society of archivists, v. 17, n. 1, p. 1-15, 1996.

McDONALD, I. Quantifying the effects of uncertainty in building simulation. (Tese de Doutorado). University of Strathclyde, 2002. Disponível em: https://www.strath.ac.uk/media/departments/mechanicalengineering/esru/research/phdmphilprojects/macdonald_thesis.pdf (Acesso em 23/02/2013).

McDONALD, I. et al. Assessing uncertainty in building simulation. In: Proceedings of the 6th International Building Performance Simulation Association Conference, BS 1999, Kioto, IBPSA, 1999. Disponível em: http://www.ibpsa.org/%5Cproceedings%5CBS1999%5CBS99_B-21.pdf (Acesso em 23/02/2013).

MECKLENBURG, M. F. Determining the acceptable ranges of relative humidity and temperature in museums and galleries, part 1, structural response to relative humidity, 2007a. Disponível em: http://si-pddr.si.edu/dspace/handle/10088/7056 (Acesso em 16/08/2012).

MECKLENBURG, M. F. Determining the acceptable ranges of relative humidity and temperature in museums and galleries, part 2, structural response to temperature, 2007b., Disponível em: http://si-pddr.si.edu/dspace/handle/10088/7055 (Acesso em 16/08/2012).

MECKLENBURG, M. F. Determining the acceptable ranges of relative humidity and temperature in museums and galleries. Lecture at the Danish National Gallery, 2010. Disponível em: http://www.conservationphysics.org/cpw/uploads/Storage/mecklenburg_cph2010.pdf (Acesso em 22/02/2013).

MECKLENBURG, M. F. et al. Structural response of painted wood surfaces to changes in ambient relative humidity. In: Painted wood: history and conservation (Part 6: Scientific Research). The Getty Conservation Institute, 1998, p. 464-483. ISBN 0-89236-501-3. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/publications/pdf_publications/paintedwood6.pdf (Acesso em 19/09/2012).

MECKLENBURG, M. F. e TUMOSA, C. S. Temperature and relative humidity effects on the mechanical and chemical stability of collections. ASHRAE Journal 41(4): 69-74, 1999.

MENDES, M. (org.) Conservação: conceitos e práticas. Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 2001.

MENDES, N. Modelos para previsão da transferência de calor e de umidade em elementos porosos de edificações. (Tese de Doutorado). Florianópolis: UFSC, 1997. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/TESE_Nathan_Mendes.pdf (Acesso em 13/03/2013).

MENDES, N. et al. UMIDUS: a PC program for the prediction of heat and moisture transfer in porous building elements. Proceedings of 6th International Building Performance Simulation Association Conference. IBPSA, 1999. p.277-283.

MENDES, N. et al. Moisture effects on conduction loads. Energy and Buildings, v. 35, n. 7, p. 631-644, 2003. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778802001718 (Acesso em 24/09/2012).

MENDES, N. et al. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, 2005. Disponível em: http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/viewFile/3657/2013 (Acesso em 20/09/2012).

MENDONÇA, P. Habitar sob uma segunda pele: estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados. (Tese de deoutorado). Guimarães: Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 2005. Disponível em: http://hdl.handle.net/1822/4250 (Acesso em 12/03/2013).

MERRIMAN, N. Museum collections and sustainability. Cultural Trends, v. 17, n. 1, p. 3-21, 2008. ISSN 0954-8963. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1080/09548960801920278 (Acesso em 03/09/2012).

MICHALSKI, S. A relative humidity control module. Museum, Paris, n. 146, p.85-88, 1985.

MICHALSKI, S. An overall framework for preventive conservation and remedial conservation. In: Proceedings of ICOM-CC 9th Triennial Conference, Paris: ICOM-CC, 1990, p.589-591.

MICHALSKI, S. Relative humidity: a discussion of correct/incorrect values. In: Proceedings of ICOM-CC 10th Triennial Conference, Washington, DC, 22-27 agosto de 1993. ICOM-CC, 1993.

MICHALSKI, S. Relative humidity and temperature guidelines: What's happening? CCI Newsletter, Ottawa, n. 14, p. 6-8, 1994.

MICHALSKI, S. Quantified risk reduction in the humidity dilemma. APT Bulletin, Springfield , v. 27, n. 3, p. 25-29, 1996.

MICHALSKI, S. Climate control priorities and solutions for collections in historic buildings. Historic Preservation Forum, 12(4), 1998, p. 8-14.

MICHALSKI, S. Guidelines for humidity and temperature in Canadian archives. Ottawa: Canadian Conservation Institute, 2000. 20 p. ISBN 0662295099

MICHALSKI, S. Double the life for each five-degree drop, more than double the life for each halving of relative humidity. In: VONTOBEL, Roy (Editor). In: Proceedings of ICOM-CC 13th Triennial Conference, Rio de Janeiro, 22-27 September 2002. Earthscan Ltd., 2002, p. 66-72.

MICHALSKI, S. Care and preservation of collections. In: BOYLAN, P. J. (Ed.). Running a Museum: a practical handbook. Paris: International Council of Museums, 2004. p. 51-90.

MICHALSKI, S. The ideal climate, risk management, the ASHRAE chapter, Proofed fluctuations and toward a full risk analysis model. Experts Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies, Abril de 2007, Tenerife: Getty Conservation Institute, 2007. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/science/climate/paper_michalski.pdf (Acesso em 15/08/2012).

MICHALSKI, S. Correction to the proofed fluctuation principle by stress relaxation and fatigue. Establishing standards for allowable microclimatic variations for polychrome wood. Oslo, 2010. Disponível em: http://www.cyf-kr.edu.pl/~ncbratas/oslo/MichalskiOslo2010.pdf (Acesso em 22/02/2013).

MICHALSKI. S. Museum climate and global climate: Doing the right thing for both. In: Reflections on Conservation. 2011. p. 9-11.

MICHALSKI, S. Stuffing everything we know about mechanical properties into one collection simulation. In: ASHLEY-SMITH, J. et al. (eds.) Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Londres, Achetype publications, 2013, p. 349-362. Disponível em: http://www.doernerinstitut.de/downloads/Climate_for_Collections.pdf (Acesso em 29/08/2013).

MICHALSKI, S. e GRATTAN, D. W. Environmental guidelines for museums temperature and relative humidity (RH). Ottawa: Canadian Conservation Institute, 2007. Disponível em: http://www.cci-icc.gc.ca/caringfor-prendresoindes/articles/enviro/ index-eng.aspx (Acesso em 16/08/2012).

MICHALSKI, S. e PEDERSOLI JR., J.L. Reference manual for the CCI-ICCROM-ICN risk management method. V. 3.0 May 2011. (Apostila do curso Reducing Risks to Cultural Heritage). Istambul, 24-28 de Outubro, 2011.

MILLS, M. e FORE, G. Environmental monitoring and conservation study of Drayton Hall in Charleston, South Carolina. APT Bulletin, Springfield, v. 31, n. 2/3, p. 63-70, 2000. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/1504662 (Acesso em 18/08/2011).

MIRANDA, S.M. A igreja de São Francisco de Assis em Diamantina. Brasília: IPHAN/MONUMENTA, 2009. 300 p. (Grandes obras e intervenções; 3) Disponível em: http://www.monumenta.gov.br/site/wp-content/uploads/2011/05/diamantinacompleto.pdf (Acesso em 20/08/2011).

MIRSADEGHI, M. Co-simulation of building energy simulation and computational fluid dynamics for whole-building heat, air and moisture engineering. (Tese de doutorado). Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, Department of Architecture, Building and Planning, 2011. ISBN 978-90-386-2426-6. Disponível em: http://repository.tue.nl/694412 (Acesso em 23/09/2012).

MOE, R. Historic preservation and green building: finding common ground. U.S.G.B.C. Greenbuild Conference, Boston, 20/11/2008. Disponível em: http://www.law.du.edu/images/uploads/rmlui/conferencematerials/2009/ USGBC Green Build Conference.pdf (Acesso em 03/09/2012).

MONROY, M. M. Comportamiento térmico de cerramientos soleados: Un modelo de simulación por diferencias finitas. (Tese de doutorado) Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 1995. Disponível em: http://hdl.handle.net/10553/7501 (Acesso em 15/03/2013)

MOON, H.J. Assessing mould risk in buildings under uncertainty. (Tese de doutorado). Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2005. Disponível em: http://smartech.gatech.edu/handle/1853/7279 (Acesso em 24/08/2012).

MOON, H.J. e AUGENBROE G. Evaluation of hygrothermal models for mold growth avoidance prediction, In: Proceedings of the 8th International Building Performance Simulation Association Conference, BS 2003, Eindhoven, IBPSA, 2003. p. 895-902. Disponível em: http://www.ibpsa.org/\proceedings\BS2003\ BS03_0895_902.pdf (Acesso em 24/08/2012).

MOREIRA, D. C. et al. Avaliação de edificação: Biblioteca Central da UNICAMP – área de coleções especiais. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 10º, São Paulo: ANTAC, 2004, 15p. CD-ROM.

MUSEUMS ASSOCIATION. Sustainability and museums: your chance to make a difference. Londres: Museums Association, 2008. Disponível em: http://www.museumsassociation.org/download?id=16398 (Acesso em 03/09/2012).

MUELLER, H. F. O. Energy efficient museum buildings. In: World Renewable Energy Congress – WREC XI, Abu Dhabi, 25-30 de setembro de 2010. Disponível em: http://www.greenbuilding-rd.de/download/WREC_XI_paper_Energy_Efficient_Museum_Buildings.pdf (Acesso em 14/09/2012).

MUSEUMS AUSTRALIA - Museums and sustainability: guidelines for policy and practice in museums and galleries. Canberra: Museums Australia National Office, 2003. Disponível em: http://www.museumsaustralia.org.au/userfiles/file/Policies/sustainability.pdf (Acesso em 03/09/2012).

NAZAROFF, W. et al. Airborne particles in museums. Marina del Rey: Getty Conservation Institute, 1993. 137 p. ISBN 0892361875..

NEALE, A. et al. Coupled simulation of vapor flow between air and a porous material. In: Proceedings of the Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X International Conference, Clearwater Beach, Florida, 2nd-7th December 2007. Disponível em: http://www.ornl.org/sci/buildings/2010/Session%20PDFs/61_New.pdf (Acesso em 24/09/2012).

NEUHAUS, E. A critical look at the use of HVAC systems. In: ASHLEY-SMITH, J. et al. (eds.) Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Londres, Achetype publications, 2013, p. 117-126. Disponível em: http://www.doernerinstitut.de/downloads/Climate_for_ Collections.pdf (Acesso em 29/08/2013).

NEUHAUS, E. e SCHELLEN, H. L. Conservation heating for a museum environment in a monumental building, In: Proceedings of the 10th Conference on the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings, 02-07 December 2007, Florida, EUA.

NEUHAUS, E. e SCHELLEN, H. L. Conservation heating in historical building: results from an experimental and simulation study. In: Developments in Climate Control of Historic Buildings. Proceedings from the International Conference "Climatization of Historic Buildings, State of the Art", December 2, 2010, Linderhof Palace. Disponível em: http://www.forschungsallianz-kulturerbe.de/download/3-8167-8637-5-developments-in-climate-control-of-historic-buildings.pdf (Acesso em 11/09/2012).

NISHIMURA, D. Understanding preservation metrics. Rochester, Nova Iorque: Image Permanence Institute, (s.d.). Disponível em: https://www.imagepermanenceinstitute.org/webfm_send/316 (Acesso em 24/08/2012).

NORDSTROM C. e NORDSTROM, A. Sustainable solutions and materials. In: TOMBAZIS, A. et al. Museums- Energy Efficiency and Sustainability in Retrofitted and New Museum Buildings Handbook. University College Dublin, Ireland, 2004, p. 30-37. Disponível em: http://eprints.sparaochbevara.se/489/1/Handbook_sustainable_Museums.pdf (Acesso em 23/08/2011)

OGDEN, S. et al. Cadernos técnicos 14 a 17: Meio Ambiente. 2.ed. Rio de Janeiro : Projeto Conservação Preventiva em Bibliotecas e Arquivos, 2001. 43 p. Disponível em: http://143.106.151.46/cpba/pdf_cadtec/14_17.pdf (acesso em 04/08/2010)

OLESEN, B. W. e LIEDELT, D. F. Cooling and heating of buildings by activating their termal mass with embedded hydronic pipe systems. (s.d.) Disponível em: http://www.cibse.org/pdfs/Embedded Hydronic Pipe Sys.pdf (Acesso em 11/09/2012).

OLGYAY, V. Design with climate. New Jersey: Princeton University, 1963.

OLIVEIRA, M. M. La formación científica como base para el profesional conservador-restaurador. El caso brasileño. Apuntes: Revista de estudios sobre patrimonio cultural, Bogotá, v. 19, n. 1 (Patrimonio brasileño), p.142-153, 2006a.

OLIVEIRA, M.A.R. O Aleijadinho e o Santuário de Congonhas. Oliveira. – Brasília, DF: IPHAN / MONUMENTA, 2006b, 134 p. (Roteiros do Patrimônio; 1)

OLIVEIRA, M.A.R. Os passos de Congonhas e suas restaurações. Brasilia: IPHAN, Programa Monumenta, 2011. 261 p. (Grandes obras e intervenções ; 5) ISBN 9788573341935.

OLSTAD, T.M. Condition surveys of painted wood in the church of Hedalen, Norway: a support from the advanced optical techniques. Establishing standards for allowable microclimatic variations for polychrome wood. Oslo, 2010. Disponível em: http://www.cyf-kr.edu.pl/~ncbratas/oslo/OlstadOslo2010.pdf (Acesso em 22/02/2013).

OMEGA Engineering Inc. Equilibrium relative humidity – saturated salt solutions. 2011. Disponível em: http://www.omega.com/temperature/z/pdf/z103.pdf (Acesso em 15/08/2011).

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. DEPARTAMENTO DE ASSUNTOS ECONÔMICOS E SOCIAIS. Climate and house design. Nova Iorque: United Nations, 1971. (Design of low-cost housing and community facilities, 1)

ORESZCZYN, T. et al. Comparative study of air-conditioned and non air-conditioned museums. Preventive conservation: practice, theory and research. Preprints of the contributions to the Ottawa Congress, 12-16 September 1994 . p. 144-148.

OROSA, J. A. e OLIVEIRA, A. C. Software tools for HVAC research. Advances in Engineering Software, v. 42, n. 10, p. 846-851, 2011. ISSN 0965-9978. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997811001359 (Acesso em 20/09/2012).

OSANYINTOLA, O. F. e SIMONSON, C. J. Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact. Energy and Buildings, v. 38, n. 10, p. 1270-1282, 2006. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806000855 (Acesso em 12/09/2012).

OTADUY, P. e KARAGIOZIS, A. Corrosion prediction in buildings based on simulation of temporal distribution of humidity and temperatures and the international standard ISO-9223. In: Proceedings of Thermal Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings XI, Florida, EUA. December 2010.

PADFIELD, T. Proposed environmental standard for museums. (s.d.a) Disponível em: http://www.conservationphysics.org/cpw/Std/Std (Acesso em 23/02/2013).

PADFIELD, T. The role of standards and guidelines: Are they a substitute for understanding a problem or a protection against the consequences of ignorance? (s.d.b) Disponível em: http://www.padfield.org/tim/cfys/ppubs/dahlem.pdf (Acesso em 03/09/2012).

PADFIELD, T. The control of relative humidity and air pollution in show-cases and picture frames. Studies in Conservation, v. 11, n. 1, p. 8-30, 1966. ISSN 00393630. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/1505401 (Acesso em 14/09/2012).

PADFIELD, T. A cooled display case. Museum, 146, p.102-103. 1985.

PADFIELD, T. The dangers of installing air conditioning in historic buildings. In: Old cultures in new worlds: ICOMOS 8th General Assembly and International Symposium, Washington, D.C. Oct. 10-15, 1987. Symposium Papers, v. 1., p. 432 -439, 1987. Disponível em: http://si-pddr.si.edu/jspui/handle/10088/11184 (Acesso em 14/09/2012).

PADFIELD, T. The role of absorbent materials in moderating changes of relative humidity. (Tese de doutorado). The Technical University of Denmark, Department of Structural Engineering and Materials, Series R n. 54, 1998, ISBN 87-7740-256-1. Disponível em: http://www.conservationphysics.org/phd/phd-indx.php (Acesso em 11/09/2012).

PADFIELD T. The preservation index and the time weighted preservation index. 2004. Disponível em: http://www.conservationphysics.org/twpi/twpi_01.php (Acesso em 22/08/2012).

PADFIELD, T. How to keep for a while what you want to keep forever. Lecture notes for the museology course at Denmark's Library School, Denmark. 24. April 2005. Disponível em: http://www.conservationphysics.org/phdk/phdk_tp.pdf (Acesso em 11/09/2012).

PADFIELD, T. Why keep climate records - and how to keep them. In: Museum Microclimates. National Museum of Denmark. 2007a, p. 157-163. ISBN 978-87-7602-080-4. Disponível em: http://eprints.sparaochbevara.se/60/1/padfield.pdf (Acesso em 22/11/2012).

PADFIELD, T. Exploring the limits for passive indoor climate control. Getty Conservation Institute. Experts Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies, Abril de 2007, Tenerife: Getty Conservation Institute, 2007b. Disponível em: http://www.padfield.org/tim/cfys/ppubs/getty_tenerife_tp2007.pdf (Acesso em 11/09/2012).

PADFIELD, T. Museum environmental standards in an age of energy anxiety. (Documento eletrônico). Disponível em: http://www.conservationphysics.org/standards/mus-env-std.pdf (Acesso em 29/08/2013).

PADFIELD T. e BORCHERSEN, K. (eds.) Museum microclimates. Contributions to the Copenhagen conference, 19 - 23 de novembro de 2007, The National Museum of Denmark, Copenhagen, 2007. Disponível em http://www.padfield.org/tim/cfys/mm/musmic/ musmic150.pdf (Acesso em 20/04/2008)

PADFIELD, T. e LARSEN, P. K. How to design museums with a naturally stable climate. Studies in Conservation, v. 49, n. 2, p. 131-137, 2004. ISSN 00393630. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/1506903 (Acesso em 14/09/2012).

PADFIELD, T. e LARSEN , P. K. Low-energy air conditioning of archives. In: Proceedings of ICOM-CC 14th Triennial Conference, The Hague, 12-16 setembro 2005. p. 677-680. Disponível em: http://www.conservationphysics.org/arnemag/arnemag_nrwch.pdf (Acesso em 22/08/2011)

PADFIELD T. et al. Passive design, mechanical systems and doing nothing: a discussion about environmental management. Conservation: the Getty Conservation Institute newsletter, Los Angeles, v. 22, n. 1, p.10-16, 2007a. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/publications/newsletters/22_1/feature. html. (Acesso em 11/09/2012)

PADFIELD T. et al. The potential and limits for passive air conditioning of museums, stores and archives. In: Padfield and Borchersen (eds.) Museum Microclimates. National Museum of Denmark, Copenhagen, 2007b, p. 191-198. Disponível em: www.conservationphysics.org/mm/padfield_2/padfield_2.pdf (Acesso em 11/09/2012).

PAPADOPOULOS, A. et al. D. Low energy cooling of the White Tower, functioning as a contemporary museum. Energy and Buildings, v. 40, n. 8, p. 1377-1386, 2008. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877880800008X (Acesso em 03/09/2012).

PAPAKONSTANTINOU, K. A. et al. Computational analysis of thermal comfort: the case of the archaeological museum of Athens. Applied Mathematical Modelling, v. 24, n. 7, p. 477-494, 2000a. ISSN 0307-904X. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X99000499 (Acesso em 23/09/2012).

PAPAKONSTANTINOU, K. A. et al. Numerical simulation of air flow field in single-sided ventilated buildings. Energy and Buildings, v. 33, n. 1, p. 41-48, 2000b. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778800000633 (Acesso em 23/05/2013).

PARK, S C. Heating, ventilating, and cooling historic buildings - problems and recommended approaches. TPS Preservation Briefs (24), 1991. (Documento eletrônico). Disponível em: http://www.nps.gov/history/ hps/tps/briefs/brief24.htm (Acesso em 13/09/2012).

PARK, S.C. Sustainable design and historic preservation. CRM, n. 2, p.13-16, 1998. Disponível em: http://www.smartplaces.com/general/21-2-4.pdf (Acesso em 05/09/2012).

PATKUS, B. Assessing preservation needs, a self-survey guide. Northeast Document Conservation Center, 2003.

PAVLOGEORGATOS, G. Environmental parameters in museums. Building and Environment, v. 38, n. 12, p. 1457-1462, 2003. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/ article/pii/S0360132303001136 (Acesso em 20/08/2012).

PEARSON, C. Preserving collections in tropical countries. In: Conservation: the Getty Conservation Institute Newsletter, Los Angeles, v. 12, n. 2, p. 17-18, 1997. Disponível em: http://www.getty.edu/ conservation/publications/newsletters/12_2/news2_1.html ou em http://www.culturepacific.org/en/bm/ bm~doc/preserving-collections-in-tropical-conditions.pdf (Acesso em 20/04/2008).

PEREIRA, C. D. e GHISI, E. Calibração de um modelo computacional de uma residência unifamiliar localizada em Florianópolis. In: 10º. Encontro Nacional e 6º. Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Natal. São Paulo: ANTAC, 2009a. Disponível em: www.encac2009.ufrn.br/paginas/arquivos/Modelo1_Encac2009.doc (Acesso em 20/09/2012).

PEREIRA, C. D. e GHISI, E. Calibration of a computer model of a naturally-ventilated house located in southern Brazil. In: Proceedings of the 11th International Building Performance Simulation Association Conference, BS 2009, Glasgow, IBPSA, 2009b. Disponível em: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_1490_1497.pdf (Acesso em 10/09/2012).

PEREIRA H. N. Contemporary trends in conservation: culturalization, significance and sustainability. City & Time, v. 3, N. 2, 2007. Disponível em: http://www.ct.ceci-br.org/novo/revista/viewarticle.php?id=104 (Acesso em 03/09/2012).

PEREIRA, I. e ASSIS, E. S. Discussão das estratégias propostas pelo projeto de norma de desempenho térmico de edificações através de estudo de caso. In: 8º. Encontro Nacional e 4º. Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Maceió. São Paulo: ANTAC/UFAL, 2005a, p. 1480-1489.

PEREIRA, I. e ASSIS, E. S. Discussão da classificação bioclimática de Belo Horizonte proposta pelo projeto de norma de desempenho térmico de edificações. In: 8º. Encontro Nacional e 4º. Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Maceió. São Paulo: ANTAC/UFAL, 2005b, p. 1490-1498.

PEREIRA, I. M. e ASSIS, E. S. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. Ambiente Construído, v. 10, n. 1, p. 31-51, 2010. ISSN 1678-8621. Disponível em: http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/6319/7490 (Acesso em 06/10/2012).

PHILLIPS, D. Daylighting: natural light in architecture. Oxford: Architectural Press, 2004. ISBN 0750663235.

PLENDERLEITH, H. J. The conservation of antiquities and works of art: treatment, repair and restoration. Londres: Oxford University Press, 1956.

POPESCU, C.M. et al. A thermogravimetric study of structural changes of lime wood (Tilia cordata Mill.) induced by exposure to simulated accelerated UV/Vis-light. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, v. 217, n. 1, p. 207-212, 2011. ISSN 1010-6030. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1010603010004247. (Acesso em 23/02/2013).

POWTER, A. e ROSS, S. Integrating environmental and cultural sustainability for heritage properties. APT Bulletin, Springfield, v. 36, n. 4, p. 5-11, 2005.

PRATA SHIMOMURA, A.R. Modelos de transposição de velocidade de vento. (Mensagem pessoal). Mensagem recebida por willidebarros@oi.com.br, em 20/12/2012.

PROCINO, L. et al. Wind tunnel tests on natural ventilation in the historical bulding 'Palazzo Pitti'. In: Proceedings of BBAA VI International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, Milão, 20-24 de julho de 2008. Disponível em: http://bbaa6.mecc.polimi.it/uploads/abstract_files/PST11_STAMPA9.pdf (Acesso em 27/09/2012).

PUGLIERI, T.S. et al. Novas estratégias para o monitoramento da degradação de bens culturais em ambientes internos. In FRONER, Y. e SOUZA, L.A.C. (orgs.) Anais do 2º Encontro Luso-Brasileiro de Conservação e Restauração, São João Del Rei: PPGA-EBA-UFMG, 2013. Disponível em: http://www.researchgate.net/publication/255040124_Novas_estratgias_para_o_monitoramento_da_degradao_de_bens_culturais_em_ambientes_internos/file/5046351ffa7c9aed8d.pdf. (Acesso em 30/11/2013).

PUTT, N. e SLADE, S. Teamwork for preventive conservation. Roma: ICCROM: vii, 50 p. p. 2004. Disponível em: http://www.iccrom.org/pdf/ICCROM_01_teamwork_en.pdf (Acesso em 30/06/2013).

QIN, M. et al. Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials. Construction and Building Materials, v. 23, n. 2, p. 967-975, 2009. ISSN 0950-0618. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061808001323 (Acesso em 24/09/2012).

QUIRIJNS, E.J. et al. Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. Journal of the Science of Food and Agriculture, 85:1805-1814, 2005.

RACHWAŁ, B. et al. Response of wood supports in panel paintings subjected to changing climate conditions. Strain, v. 48, n. 5, p. 366-374, 2012a. ISSN 1475-1305. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-1305.2011.00832.x (Acesso em 23/02/2013).

RACHWAŁ, B. et al. Fatigue damage of the gesso layer in panel paintings subjected to changing climate conditions. Strain, v. 48, n. 6, p. 474-481, 2012b. ISSN 1475-1305. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-1305.2012.00844.x (Acesso em 23/02/2013).

RAGHEB, M. Wind shear, roughness classes and turbine energy production. (Documento eletrônico), 2012. Disponível em: http://mragheb.com/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Wind%20Shear%20Roughness%20Classes%20and%20Turbine%20Energy%20Production.pdf (Acesso em 23/02/2013).

RAMER, B. The development of a local humidity control system. International Journal of Museum Management and Curatorship, v. 3, n. 2, p. 183-191, 1984. ISSN 0260-4779. Disponível em: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09647778409514916 (Acesso em 14/09/2012).

REEDY, T. J. et al. Principles of experimental design for art conservation research. Delaware: University of Delaware. Getty Conservation Institute, 1992. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/publications/pdf_publications/principles_experiment.pdf (Acesso em 20/08/2011).

REID, D.B. Illustrations of the theory and practice of ventilation. In: STANIFORTH, S. (ed.) Historical perspectives on preventive conservation. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2013. p. 118-125.

REILLY, J. M.. IPI storage guide for acetate film: instructions for using the wheel, graphs, and table : basic strategy for film preservation. Rochester, NY: Image Permanence Institute, Rochester Institute of Technology, 1993. 23 p.

REILLY, J. M. et al. New tools for preservation: assessing long-term environmental effects on library and archives collections. Washington, DC: Commission on Preservation and Access, 1995. 35 p. ISBN 1887334467.

REILLY, J.M. et al. Novas ferramentas para preservação: avaliando os efeitos ambientais a longo prazo sobre coleções de bibliotecas e arquivos. 2ª . ed. Rio de Janeiro: Projeto Conservação Preventiva em Bibliotecas e Arquivos: Arquivo Nacional, 2001, 44 p.

REINO UNIDO. HOUSE OF LORDS; TECHNOLOGY COMMITTEE. Science and Heritage: Report with Evidence; 9th Report of Session 2005-06. The Stationery Office, 2006. Disponível em: http://www.publications.parliament.uk/pa/ld200506/ldselect/ldsctech/256/25602.htm (Acesso em 29/05/2013).

REMKI, B. et al. Hygrothermal transfer in wood drying under the atmospheric pressure gradient. International Journal of Thermal Sciences, v. 57, n. 0, p. 135-141, 2012. ISSN 1290-0729. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072912000506 (Acesso em 24/09/2012).

RESOURCE: THE COUNCIL FOR MUSEUMS, ARCHIVES AND LIBRARIES. Parâmetros para a conservação de acervos: um roteiro de auto-avaliação. São Paulo: EDUSP: Vitae, 2004. 149 p (Museologia. Roteiros práticos; 5) ISBN 8531408113

RIBEIRO, M. B. A importância do edifício para o conforto e o controle ambientais nos museus. In: 1º Seminário de Investigação em Museologia dos Países de Lingua Portuguesa e Espanhola, 2010, Porto. Actas do 1º Seminário de Investigação em Museologia dos Países de Língua Portuguesa e Espanhola. Porto: Universidade do Porto / Faculdade de Letras / Departamento de Ciências e Técnicas do Patrimônio, 2010. v. 1. p. 402-413. Disponível em: http://ler.letras.up.pt/uploads/ficheiros/8144.pdf (Acesso em 02/11/2012).

RIBEIRO, M.B. Arquitetura na conservação preventiva em museus brasileiros. (documento eletrônico) In: VIEIRA, E. e SOUZA, G.V. (eds.) Actas do I Encontro Luso-Brasileiro de Conservação e Restauro. Porto: CITAR/UCP, 2011. Disponível em: http://artes.ucp.pt/citar/actasrestauro/11_arquitetura na conservacao preventiva.pdf (Acesso em 24/11/2012).

RO, K. e HUNT, P. Characteristic wind speed distributions and reliability of the logarithmic wind profile. Journal of environmental engineering, v. 133, n. 3, p. 313-318, 2007. ISSN 0733-9372. Disponível em: http://ddr.nal.usda.gov/bitstream/10113/19183/1/IND44102911.pdf (Acesso em 23/03/2013).

ROACHE, P. J. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. Annual review of fluid mechanics. v. 29 (A97-22767 05-34), Palo Alto, CA, Annual Reviews, Inc., 1997, p. 123-160. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1146/annurev.fluid.29.1.123 (Acesso em 24/09/2012).

ROAF, S. et al. Ecohouse: a casa ambientalmente sustentável. Tradução Alexandre Salvaterra. Porto Alegre: Bookman, 2006.

ROCHA et al. Zoneamento bioclimático do Estado de Minas Gerais: aperfeiçoamento dos resultados. In: 10º. Encontro Nacional e 6º. Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Natal. São Paulo: ANTAC, 2009. p. 800-809.

RODE, C. Moisture buffering of building materials. BYG DTU-126 Report, Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, 2005. Disponível em: http://www.byg.dtu.dk/upload/institutter/byg/publications/rapporter/byg-r126.pdf (Acesso em 12/09/2012).

RODE, C. et al. A review of humidity buffering in the interior spaces. Journal of Thermal Envelope and Building Science, Nova Iorque, v. 27, n. 3, p. 221-226, 2004. Disponível em: http://jen.sagepub.com/content/27/3/221.short (Acesso em 12/09/2012).

RODE, C. et al. Moisture buffer value of materials in buildings. In: Proceedings of the 7th Nordic Building Physics Conference, Reykjavık, June 13–15, 2005, p. 108–115. Disponível em: http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik/pdf/art_039.pdf (Acesso em 01/10/2012).

RODE, C. e WOLOSZYN, M. Whole-building hygrothermal modeling in IEA Annex 41. In: ASHRAE, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings (ISBN: 978-1-933742-28-1), pages: 1-15, 2007. Disponível em: http://www.ornl.org/sci/buildings/2010/Session%20PDFs/175_New.pdf (Acesso em 19/04/2013).

ROEMICH, H. e WEINTRAUB, S. Teaching preventive conservation: preparing conservators for the complex world of interdisciplinary decision making. In: Proceedings of the Final Meeting of COST Action D42. Bruxelas: Trinity College Dublin, Ireland and COST, 2010. Disponível em: http://www.nyu.edu/gsas/dept/fineart/faculty/2010_Roemich_Weintraub_teaching_preventive_conservation.pdf (Acesso em 15/09/2012)

ROMERO, M.A.B.. Princípios bioclimáticos para o desenho urbano. 2. ed. São Paulo: ProEditores, 2000, 123p..

ROMERO, M.A.B. A arquitetura bioclimática do espaço público. Brasília Editora Universidade de Brasília, 2001, 225p.

ROMERO, M.A.B. A concepção bioclimática. In: ROMERO, M.A.B. (org.) Reabilitação ambiental sustentável arquitetônica e urbanística: registro do curso de especialização a distância. Brasília , DF: FAU/UNB, 2009, p. 545-569. ISBN 9788560762019.

RORIZ, M. Arquivos climáticos de municípios brasileiros. São Carlos, ANTAC, 2012a. (Documento eletrônico). Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/sobre_epw.pdf (Acesso em 05/02/2013).

RORIZ, M. Dados climáticos do Brasil. Florianópolis, UFSC, 2012b. (Documento eletrônico). Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/dadosclimaticosbrasil_31_08_2012.pdf (Acesso em 05/02/2013).

RORIZ, M. Uma proposta de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro. UFSC, 2012c. (Documento eletrônico). Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/projetos/proposta-de-revisao-do-zoneamento-bioclimatico -brasileiro (Acesso em 28/05/2013).

RORIZ, M et al. Um zoneamento bioclimático para a arquitetura no Brasil. In: JORNADA SOBRE CLIMA E APLICAÇÃO NA COMUNIDADE DE PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2, 2001, Maceió. 7p. Disponível em: www. infohab.org.br (Acesso em 16/08/2011)

RORIZ, M. et al. Bioclimatic zoning of Brazil: A proposal based in Givoni and Mahoney methods. In: PLEA 99: The 16th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, 1999, Brisbane - Austrália. Proceedings of the 16th International Conference on Passive and Low Energy Architecture. Brisbane - Austrália: PLEA International, 1999a. v. 1. p. 211-216.

RORIZ, M. et al. Uma proposta de norma técnica brasileira sobre desempenho térmico de habitações populares. In: 5º. Encontro Nacional e 2º. Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Fortaleza. São Paulo: ANTAC, 1999b.

ROSADO, A. Conservação preventiva da escultura colonial mineira em cedro: um estudo preliminar para estimar flutuações permissíveis de umidade relativa. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Belas Artes, 2004.

ROSE, W. Effects of climate control on the museum building envelope. Journal of the American Institute for Conservation, Washington, v. 33, n. 2, p. 199-210, 1994. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/3179428 (Acesso em 11/09/2012).

ROTHE, A. e METRO, B. Climate controlled show-cases for paintings. Museum, Paris, n.146, p.89-91, 1985.

ROULET, C. A. Ventilation and airflow in buildings: methods for diagnosis and evaluation. Londres: Earthscan, 2008, 190 p. ISBN 9781844074518

ROWAN, N. J. et al. Prediction of toxigenic fungal growth in buildings by using a novel modelling system. Applied and Environmental Microbiology, Washington, v. 65, n. 11, p. 4814-4821, 1999.

ROWELL, R. M. Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton: CRC Press, 2005. 485 p. ISBN 0849315883.

RUSSELL, R. et al. Significance 2.0: a guide to assessing the significance of collections. Canberra: Heritage Collections Council, 2009 ; viii, 71 p. : ill. ; 30 cm. , ISBN 9780977544363

RYE, C. SPAB Research Report: U-value Report 1. Londres: Society for the Protection of Ancient Buildings, 2010. Disponível em: http://www.spab.org.uk/downloads/The%20SPAB%20Research%20Report%201.%20U-value%20Report.%20Revised%20October%202011.pdf (Acesso em 23/02/2013).

RYHL-SVENDSEN, M. Indoor air pollution in museums: prediction models and control strategies. Studies in Conservation, v. 51, Suplemento 1, p. 27-41, 2006. ISSN 0039-3630.

RYHL-SVENDSEN, M. et al. Does a standard temperature need to be constant? In: Proceedings of Going Green: towards sustainability in conservation, Londres, 2009. Disponível em: http://www.padfield.org/tim/cfys/standards/standardtemperature_mrs.pdf (Acesso em 05/10/2012).

SÁ JÚNIOR, A. Aplicação da classificação de Koppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais. (Dissertação de mestrado). Lavras: Universidade Federal de Lavras – Mestrado em Engenharia Agrícola, Engenharia de Água e Solo, 2009, 113p.

SABBIONI, C. et al. Global climate change impact on built heritage and cultural landscapes. In: Proceedings of the International Heritage, Weathering and Conservation Conference (HWC-2006), 21-24 June 2006, Madri, Taylor & Francis/Balkema (ISBN 0 415 41272 2), P. 395-401. Disponível em: http://noahsark.isac.cnr.it/publications/Publication_3.pdf (Acesso em 05/09/2012).

SABBIONI, C. et al. Mapping climate change and cultural heritage. In: 7th EC Prague Conference on Safeguarded Cultural Heritage - Understanding & Viabiliy for the Enlarged Europe, 2007. ISBN 978 80 86246 31 4. p. 119-124. Disponível em: http://noahsark.isac.cnr.it/publications/Publication_4.pdf (Acesso em 05/09/2012).

SABBIONI, C. et al. The atlas of climate change impact on European cultural heritage: scientific analysis and management strategies. Londres: Anthem Press, 2010. ISBN 9781843317982

SAHEB, M. e DUBUS, M. Indoor corrosivity in museums and archives assessment: standards and recommendations. IAQ – Indoor Air Quality Meeting, 2006. Disponível em: http://iaq.dk/iap/iaq2006/Saheb_IAQ2006.pdf (Acesso em 27/08/2012).

SALA, M. e GALLO, P. Building energy management systems and intelligent component design. in: TOMBAZIS, A. et al. Museums - Energy Efficiency and Sustainability in Retrofitted and New Museum Buildings Handbook. University College Dublin, Ireland, 2004, p. 70-82. Disponível em: http://eprints.sparaochbevara.se/489/1/Handbook_sustainable_Museums.pdf (Acesso em 23/08/2011)

SALONVAARA M. et al. Moisture buffering effects on indoor air quality—experimental and simulation results, in: Proceedings of the Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings IX International Conference, Clearwater Beach, Florida, 2004, 11 p. Disponível em: http://wp.ornl.gov/sci/roofs+walls/staff/papers/new_119.pdf (Acesso em 12/09/2012).

SAMEK, L. et al. The impact of electric overhead radiant heating on the indoor environment of historic churches. Journal of Cultural Heritage, v. 8, n. 4, p. 361-369, 2007. ISSN 1296-2074. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207407001021 (Acesso em 10/09/2012).

SAMUEL, A.A. On the conflation of contaminant behaviour prediction within whole building performance simulation. (tese de doutorado) University of Strathclyde, Energy Systems Research Unit, Glasgow, 2006.

SAMUEL, A.A. STRACHAN, P. Integration of contaminant modelling within whole building simulation. Proceedings of the 9th International Building Performance Simulation Association Conference, BS 2005, Montreal, IBPSA, 2005, p. 1083-1090. Disponível em: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2005/BS05_1083_1090.pdf (Acesso em 28/09/2012).

SANDS, J. Sustainable library design. Libris Design Project, 2004. (Documento eletrônico). Disponível em: http://www.librisdesign.org/docs/SustainableLibDesign.pdf (Acesso em 17/05/2013).

SANDU, I. C. A. et al. Thermogravimetric study on the ageing of lime wood supports of old paintings. Polymer Degradation and Stability, v. 80, n. 1, p. 83-91, 2003. ISSN 0141-3910. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391002003865 (Acesso em 01/04/2013).

SANTARELLI, M.L. et al. Environmental studies for the preservation of the Hypogeum sites. In: FERRARI, A. (ed.), Proceedings of the 4th International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin, Cairo, 6-8 Dezembro 2009, v. 2, p. 358-360. Disponível em: http://books.google.com.br/books?id=uuRLHs472RsC (Acesso em 27/09/2012).

SANTOS, C. A. P. e MATIAS, L. Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006. (Informação Técnica de Edifícios, ITE 50). ISBN 978-972-49-2065-8. Disponível em: home.fa.utl.pt/~lcaldas/LNEC_ITE_50.pdf (Acesso em 12/03/2013).

SATTLER,A. Ferramentas para avaliação de sustentabilidade e propostas mais sustentáveis. In: ROMERO, M.A.B. (org.) Reabilitação ambiental sustentável arquitetônica e urbanística: registro do curso de especialização a distância. Brasília, DF: FAU/UNB, 2009, p.494-517. ISBN 9788560762019.

SCHAPER, L. e SCHERER, J. The new landmark libraries: a library journal quest - inaugural year wrap-up. IFLA Newsletter 2012, Haia, n.1, p. 5-27, 2012. Disponível em: http://www.ifla.org/files/assets/library-buildings-and-equipment/newsletters/2012-1.pdf (Acesso em 17/05/2013).

SCHELEMERG, R. How hard could that be? Practical humidity calibration experiences. Cal Lab, Jan-Feb-Mar, 2001, p. 40-42. Disponível em: http://www.faslab.it/pdf/practical-rh-experiences.pdf (Acesso em 15/08/2011)

SCHEFFLER, G.A. e PLAGGE, R. Introduction of a drying coefficient for building materials. In: Proceedings of 11th International Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings Conference: Clearwater Beach 5-9 December 2010. Disponível em: http://www.ornl.gov/sci/buildings/2010/B11%20papers/23_Scheffler.pdf (Acesso em 24/09/2012).

SCHELEMERG, R. The trouble with humidity: the hidden challenge of RH calibration. Cal Lab, Oct-Nov-Dec, 2002, p. 40-42. Disponível em: http://www.veriteq.com/download/Trouble-with-Humidity.pdf (Acesso em 15/08/2011).

SCHELLEN, H L Heating monumental churches: indoor climate and preservation of cultural heritage. (Tese de doutorado). Technische Hogeschool Eindhoven, 2002. ISBN: 90-386-1556-6. Disponível em: http://alexandria.tue.nl/extra2/200213875.pdf (Acesso em 01/10/2012).

SCHELLEN, H. L. e VAN SCHIJNDEL, J. A. W. M. An overview of experimental and simulation work on indoor climate and control in historic houses and monumental buildings. Getty Conservation Institute. Experts Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies, Abril de 2007, Tenerife: Getty Conservation Institute, 2007. Disponível em: http://getty.art.museum/conservation/our_projects/science/climate/paper_schellen.pdf (Acesso em 03/10/2012).

SCHELLEN, H. e VAN SCHIJNDEL, A. setpoint control for air heating in a church to minimize moisture related mechanical stress in wooden interior parts. Building Simulation, v. 4, n. 1, p. 79-86, 2011. ISSN 1996-3599. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/s12273-011-0026-7 (Acesso em 02/10/2012).

SCHILKEN, P. Photovoltaic energy and library: the experience of Mataró. International preservation news, n. 44, p. 30-31, 2008. Disponível em: http://archive.ifla.org/VI/4/news/ipnn44.pdf (Acesso em 28/05/2013).

SCHOFFELEN, M. et al. Measurement setup for the verification of CFD modeling used in a design study for a local bench heating system for churches. In: PLEA 2004 - The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven. 2004. p.19-22. Disponível em: http://sts.bwk.tue.nl/friendlyheating/Publicaties/PLEA_paper_Schoffelen.pdf (Acesso em 01/10/2012).

SCIGLIANO, S. e HOLLO, V. IVN - Índice de ventilação natural. São Paulo Pini, 2001, 279p.

SCOTT, G. Formação de mofo em ambientes tropicais: discussão. In: MENDES, M. et al. (Org.). Conservação: Conceitos e práticas. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2001. p. 261-278.

SEASE, C. The development of the humidity control module at field museum. Journal of the American Institute for Conservation, v. 30, n. 2, p. 187-196, 1991. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/3179530 (Acesso em 24/09/2012).

SEBERA, D.K. A Graphical representation of the relationship of environmental conditions to the permanence of hygroscopic materials and composites. In: Proceedings of Conservation in Archives: International Symposium, Ottawa, Canada, May 10-12, 1988. Paris, France: International Council on Archives, 1989.

SEBERA, D. K. Isopermas: uma ferramenta para o gerenciamento ambiental. [trad. José Luiz Pedersoli Jr.] 2. ed. Rio de Janeiro: Projeto Conservação Preventiva em Bibliotecas e Arquivos: Arquivo Nacional, 2001 27 p. (Conservação Preventiva em Bibliotecas e Arquivos;n.18) ISBN 8570090439 (Broch.)

SEDLBAUER, K. Prediction of mould growth by hygrothermal calculation. Journal of Building Physics, v. 25, n. 4, p. 321-336, 2002.

SEDLBAUER K. Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components. (tese de doutorado). Stuttgart: Fraunhofer Institute for Building Physics, 2001.

SEDLBAUER, K. et al. Mold growth prediction by computational simulation. In: ASHRAE Conference IAQ 2001. San Francisco: ASHRAE, 2001. Disponível em: http://www.ibp.fraunhofer.de/Images/mold_growth_prediction_tcm45-35007.pdf (Acesso em 30/08/2012).

SELWITZ, C. et al. Inert gases in the control of museum insect pests. Los Angeles, Calif.: Getty Conservation Institute, 1998. (Research in conservation).

SENA, C.B. Análise comparativa entre o método de Mahoney tradicional e o método de Mahoney nebuloso para caracterização do clima no projeto arquitetônico. (Dissertação de mestrado). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004, 130p.

SENA, C.B. et al. Análise climática das regiões do estado de São Paulo: estudo comparativo entre o método de Mahoney tradicional e o remodelado através da teoria dos sistemas nebulosos - parte I. In: 7º. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 3ª. Conferência Latino-Americana sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações, Curitiba. São Paulo: ANTAC, 2003a,. p. 233-240.

SENA. C.B. et al. Análise climática das regiões do estado de São Paulo: estudo comparativo entre o método de Mahoney tradicional e o remodelado através da teoria dos sistemas nebulosos - parte II. In: 7º. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 3ª. Conferência Latino-Americana sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações, Curitiba. São Paulo: ANTAC, 2003b, p. 225-232.

SERAFIM, A. C. D. M. Análise in-situ do comportamento físico de argamassas de revestimento de fachadas. (Dissertação de mestrado). Lisboa: UTL. Instituto Superior Técnico, 2012. Disponível em: https://fenix.ist.utl.pt/dissertacoes/329035 (Acesso em 23/02/2013).

SHINER, J. Trends in microclimate control of museum display cases. In: Museum microclimates: contributions to the Copenhagen conference, 19-23 November 2007, Copenhagen: National Museum of Denmark, 2007 p.267-275.

ŠIJANEC ZAVRL, M. Analysing indoor climate in building heritage in Slovenia. In: European Research on Cultural Heritage, State-of-the-Art Studies. ITAM, pp. 389-403, 2004. ISBN 80-86246-23-X. Disponível em: http://www.arcchip.cz/w07/w07_sijanec_zavrl.pdf (Acesso em 18/11/2012).

SILVA, A.C.S.B., Zoneamento bioclimático brasileiro para fins de edificação. (Dissertação de mestrado). Porto Alegre: Departamento de Engenharia Civil, UFRGS, Rio Grande do Sul, 1994.

SILVA, A.C.S.B. et al. Zoneamento bioclimático brasileiro para fins de edificação. In: 3º. Encontro Nacional e 1º. Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído Gramado. Porto Alegre: ANTAC, 1995. p. 161-166.

SILVA, A.G.S. The difficulty for conserving cultural heritage in tropical countries: the experience of Rio de Janeiro city. International Preservation News, n. 54, p. 40-43, 2011. Disponível em: http://www.ifla.org/files/pac/ipn/IPN%2054def.pdf (Acesso em 23/09/2012).

SILVA, F. V. M. Ventilação natural de edifícios. Turbulência atmosférica. (Tese de doutorado). Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2003.

SILVA, K. O. D. et al. Sistema automatizado para aquisição de dados de umidade relativa do ar. Engenharia Agrícola [S.I.], v. 27, p. 630-638, **2007a**.

SILVA, V. G. Metodologias de avaliação de desempenho ambiental de edifícios: estado atual e discussão metodológica. In: JOHN, V. M. (coord.) Tecnologias para construção habitacional mais sustentável – Projeto FINEP 2386/04. (Documento 5) São Paulo, **2007b**. Disponível em: http://www.habitacaosustentavel.pcc.usp.br/pdf/D5_metodologias_de_avaliacao.pdf (Acesso em 03/09/2012).

SIMONS, M. et al. Local mean age of air: Predictive techniques compared. Building Services Engineering Research and Technology, v. 20, n. 4, p. 211-218, 1999. Disponível em: http://bse.sagepub.com/content/20/4/211.abstract (Acesso em 22/03/2012).

SIMONSON, C.J. et al. Moderating indoor conditions with hygroscopic building materials and outdoor ventilation, ASHRAE Transactions, v. 110, n. 2, p. 804–819, 2004. Disponível em: http://connection.ebscohost.com/c/articles/15565231/moderating-indoor-conditions-hygroscopic-building-materials-outdoor-ventilation (Acesso em 12/09/2012).

SIMPSON, W.T. Equilibrium moisture content of wood in outdoor locations in the United States and worldwide. Res. Note FPL-RN-0268. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1998, 11 p.

SMITH, B. Humidistatically controlled heating and ventilation systems - alternative methods for control of relative humidity. CRM Online, v. 7, p. 3 -5, 1999. Disponível em: http://crm.cr.nps.gov/archive/22-7/22-07-o2.pdf (Acesso em 10/09/2012).

SMITH, S. L. e HILL, S. T. Influence of temperature and water activity on germination and growth of Aspergillus restrictus and A. versicolor. Transactions of the British Mycological Society, v. 79, n. 3, p. 558-560, 1982. ISSN 0007-1536.

SØRENSEN, D. N. e NIELSEN, P. V. Quality control of computational fluid dynamics in indoor environments. Indoor Air, v. 13, n. 1, p. 2-17, 2003. ISSN 1600-0668. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0668.2003.00170.x (Acesso em 30/09/2012).

SORGATO, M.J. et al. Avaliação de desempenho térmico pela norma NBR 15575 em consulta pública em 2012. UFSC, 2012. (Documento eletrônico). Disponível em: www.labeee.ufsc.br/node/397 (Acesso em 28/05/2013).

SOUZA, L.A.C. et al. (org). Roteiro de avaliação e diagnóstico de conservação preventiva. Belo Horizonte: EBA / UFMG, 2008a. Projeto: Conservação preventiva: avaliação e diagnóstico de coleções. Programa de Cooperação Técnica: IPHAN/UFMG. (Tópicos em conservação preventiva - caderno 1).

SOUZA, L.A.C. Panorama brasileiro na relação entre ciência e conservação de acervos. Pós, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 37-46, 2008b. ISSN 1982-9507, ISSN eletrônico 2238-2046. Disponível em: http://www.eba.ufmg.br/revistapos/index.php/pos/article/view/6 (Acesso em 05/10/2012).

SPERA, D. e RICHARDS, T. Modified power law equations for vertical wind profiles. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration,. Lewis Research Center, DOE/NASA/1059-79/4; NASA-TM-79275, 1979. Disponível em: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19800005367_1980005367.pdf (Acesso em 20/12/2012).

STANIFORTH, S. Sustainability and collections. Conservation Perspectives, v. 26, n. 1, p. 12-14, 2011.

STANIFORTH, S. Conservation heating to slow conservation: a tale of the appropriate rather than the ideal. Getty Conservation Institute. Experts Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies, Abril de 2007, Tenerife: Getty Conservation Institute, 2007. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/ our_projects/science/climate/paper_staniforth.pdf (Acesso em 07/09/2012).

STANIFORTH, S. (ed.) Historical perspectives on preventive conservation. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2013. 426 p. ISBN 9781606061428

STANIFORTH, S e HAYES, B. Temperature and relative humidity measurement and control in National Trust houses. In: Proceedings of ICOM-CC 8th Triennial Conference, Sydney, 6-11 setembro de 1987. Getty Conservation Institute, 1987. p. 915-926. ISBN 0-89236-094-1

STEEMAN, H. J. Modelling local hygrothermal interaction between airflow and porous materials for building applications. (Tese de doutorado) Ghent University. Faculty of Engineering, 2009. Disponível em: https://biblio.ugent.be/record/713360 (Acesso em 24/09/2012).

STEEMAN, H. J. et al. Coupled simulation of heat and moisture transport in air and porous materials for the assessment of moisture related damage. Building and Environment, v. 44, n. 10, p. 2176-2184, 2009. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132309000821 (Acesso em 24/09/2012).

STEEMAN, M. et al. On modelling moisture buffering when evaluating humidity controlled HVAC Systems. In: Proceedings of the 10th International Building Performance Simulation Association Conference. IBPSA, 2009. p. 819–826. Disponível em: https://biblio.ugent.be/publication/959146/file/986488.pdf (Acesso em 13/03/2013)

STEEMAN, M. et al. A. Impact of whole-building hygrothermal modelling on the assessment of indoor climate in a library building. Building and Environment, v. 45, n. 7, p. 1641-1652, 2010. ISSN 0360-1323.

STERFLINGER, K. Fungi: Their role in deterioration of cultural heritage. Fungal Biology Reviews, v. 24, n. 1–2, p. 47-55, 2010. ISSN 1749-4613.

STERN, F. et al. Quantitative V&V of CFD simulations and certification of CFD codes. International Journal for Numerical Methods in Fluids, v. 50, n. 11, p. 1335-1355, 2006. ISSN 1097-0363. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1002/fld.1090 (Acesso em 24/09/2012).

STESKENS, P.W.H.M. et al. Modelling local hygrothermal interactions. In: Proceedings of 11th International Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings, Clearwater Beach,:5-9 December 2010. Disponível em: http://www.ornl.gov/sci/buildings/2012/B11%20papers/12_Steskens.pdf (Acesso em 24/09/2012).

STOLOW, N. Silica gel and related RH buffering materials, conditioning and regeneration techniques. In: KNELL, S. (ed). Care of Collections. Londres: Routledge, 1984, p. 104-112.

STRANG, T. e GRATTAN, D. Temperature and humidity considerations for the preservation of organic collections – the isoperm revisited. e-Preservation Science 6, p.68-74, 2009.

STRLIC, M. et al. Damage functions in heritage science. Studies in Conservation, v. 58, n. 2, p. 80-87, 2013. Disponível em: http://www.ingentaconnect.com/content/maney/sic/2013/00000058/00000002/art00003 (Acesso em 01/05/2013).

STULL, R. B. An introduction to boundary layer meteorology. Nova Iorque: Springer, 2009. ISBN 9789027727695.

SULAIMAN, R. et al. Pilot study on indoor climate investigation and computer simulation in historical museum building: Amerongen Castle, the Netherlands. Journal of Design and the Built Environment, v. 7, p. 75-94, 2010. Disponível em: http://biomed2011.um.edu.my/filebank/published_article/3278/Vol%207-6.pdf (Acesso em 01/10/2012).

ZOKOLAY, S. V Termal design of buildings. Camberra, Australian: Raia Education Division, 1995. [a]

SZOKOLAY, S.V. The CPZ (Control Potencial Zone) method and its use to develop climate zones. ISES"95, Harvey, 1995. [b]

SZOKOLAY, S.V. Bioclimatic design: strategy to details. In: 3º. Encontro Nacional e 1º. Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído Gramado. Porto Alegre: ANTAC, 1995.

TAHBAZ, M. Estimation of the wind speed in urban areas – height less than 10 metres. International Journal of Ventilation, v. 8, n. 1, p. 75-84, 2009. ISSN 1473-3315. Disponível em: http://www.ijovent.org/doi/abs/10.5555/ijov.2009.8.1.75 (Acesso em 20/10/2012).

TARIKU, F. et al. Integrated analysis of whole building heat, air and moisture transfer. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 53, n. 15–16, p. 3111-3120, 2010a. ISSN 0017-9310. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931010001493 (Acesso em 24/03/2012).

TARIKU, F. et al. Transient model for coupled heat, air and moisture transfer through multilayered porous media. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 53, n. 15–16, p. 3035-3044, 2010b. ISSN 0017-9310. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931010001572 (Acesso em 24/09/2012).

TAYLOR, J. An integrated approach to risk assessments and condition surveys. Journal of the American Institute for Conservation, v. 44, n. 2, p. 127–141, 2005. ISSN 0197-1360. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/40025139 (Acesso em 03/10/2012).

TAYLOR, J. et al. Reviewing past environments in a historic house using building simulation. In: Preprints of ICOM-CC 14th Triennial Conference, Londres, ICOM, 2005, p. 708 – 715. Disponível em: http://eprints.ucl.ac.uk/2287/ (Acesso em 23/09/2012).

TEODOSIU, C. et al. Numerical prediction of indoor air humidity and its effect on indoor environment. Building and Environment, v. 38, n. 5, p. 655-664, 2003. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132302002111 (Acesso em 23/09/2012).

TÉTREAULT, J. Airborne pollutants in museums, galleries and archives : risk assessment, control strategies and preservation management. Ottawa: Canadian Conservation Institute, 2003a. 168 p. ISBN 0662340590.

TÉTREAULT, J. Guidelines for pollutant concentrations in museums. CCI newsletter, Ottawa, v. 31, p. 3-5, 2003b. Disponível em: http://www.cci-icc.gc.ca/cci-icc/about-apropos/nb/nb31/pollutants-eng.aspx (Acesso em 19/04/2013).

TÉTREAULT, J. Preservation based on a risk management approach. (Documento eletrônico). 6th Indoor Air Quality 2004 Meeting (IAQ2004). Padova, 10-12 Novembro 2004. Disponível em: http://www.isac.cnr.it/iaq2004/powerpoint/tetreault.ppt (Acesso em 19/04/2013).

TETREAULT, J. Prediction of damages caused by pollutants by using risk assessment approaches. 8th Indoor Air Quality 2008 Meeting (IAQ 2008), Viena, 17 - 19 Abril de 2008. Disponível em: http://iaq.dk/iap/iaq2008/iaq2008_abstracts.pdf (Acesso em 19/04/2013).

THARAZI, M. I. The use of passive design of heritage building as an alternative indoor climate control for museum. AYRC X3 2011 – AKEPT's 1st Annual Young Researchers International Conference and Exhibition. Kuala Lampur, 19 e 10 de dezembro de 2011. Disponível em: http://umkeprints.umk.edu.my/297/1/Paper%202.pdf (Acesso em 03/09/2012).

THARAZI, M. I. New approach for climate control in managing cultural collections housed in heritage buildings. 2012. Disponível em: http://umkeprints.umk.edu.my/296/1/Paper%201.pdf (Acesso em 03/09/2012).

THOMSON, G.. The museum environment, Londres: Butterworth-Heinemann, 1986.

THROSBY D. The economics of heritage conservation. In: STANIFORTH, S. (ed.) Historical perspectives on preventive conservation. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2013, p. 149-150.

TIME, B. Hygroscopic moisture, transport in wood. (Tese de doutorado). Norwegian University of Science and Technology, 1998. ISBN 8247102137. Disponível em: http://www.stijnreijnen.com/articles/numerical_ modelling_of_moisture_movement_through_wood/hygroscopic_moisture_transport_in_wood_(by_Berit_Time). pdf (Acesso em 01/10/2012).

TOLEDO, A. M. e PEREIRA, F. O. R. O potencial da mesa d'água para a visualização analógica da ventilação natural em edifícios. In: 7º. Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído, 3ª. Conferência Latino-Americana sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações, 2º. Workshop IBPSA-Brasil, 2003. p.1383-1390. Disponível em: http://www.labcon.ufsc.br/publicacoes/15.pdf (Acesso em 30/09/2012).

TOLEDO, A. M. e PEREIRA, F. O. R. Visualização analógica da ventilação natural pela ação do vento em edifícios residenciais na mesa d'água. In: I Conferência Latino-americana de Construção Sustentável. X encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. 18-21 julho 2004, São Paulo, 16p.

TOLEDO, E. Ventilação natural das habitações. Maceió: EDUFAL, 1999a. 170p.

TOLEDO, F. L. Passive environmental control for museums in hot-humid climates: guidelines for building design and fabric improvements. University of London, 1999b.

TOLEDO, F.L. Controle ambiental através de intervenções mínimas em edifícios históricos. In; Memória e Informação 2004. Rio de Janeiro: Casa de Rui Barbosa, 2004. Disponível em: http://www.casaruibarbosa.gov.br/dados/DOC/palestras/memo_info/mi_2004/FCRB_MemoriaInformacao_FrancizaToledo.pdf (Acesso em 15/05/2013).

TOLEDO, F. L. The role of architecture in preventive conservation. (Relatório de estágio pós-doutoral) Roma: ICCROM: 74 p. 2006.

TOLEDO, F. L. Museum passive buildings in warm, humid climates. Experts Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies, Abril de 2007, Tenerife: Getty Conservation Institute, 2007. Disponível em: http://getty.museum/conservation/our_projects/science/climate/paper_toledo.pdf (Acesso em 15/08/2012).

TOLEDO, F.L. Controle ambiental e preservação de acervos documentais nos trópicos úmidos. Revista Acervo, v. 23, n. 2, 2010. Disponível em: http://revistaacervo.an.gov.br/seer/index.php/info/article/view/12 (Acesso em: 12/09/2012).

TOLEDO, F.L. et al. The use of glass boxes to protect modern paintings in warm humid museums. Museum microclimates: contributions to the Copenhagen conference, 19-23 November 2007. Copenhagen: National Museum of Denmark, 2007, p.261-266.

TOMBAZIS, A. et al. Museums - energy efficiency and sustainability in retrofitted and new museum buildings handbook. Dublin: University College, 2004. Disponível em: http://eprints.sparaochbevara.se/489/1/ Handbook_sustainable_Museums.pdf (Acesso em 23/08/2011).

TORRES, M.C. e NOVAIS, P.C.M. Laudo de vistoria. Ref. Ofício GAB 1ª. PJ/Congonhas, VAG/383/2010 SGDP: 1.589.241 – Serra da Casa de Pedra/Tombamento IC – 0180.03.000001-2 (Documento eletrônico). Ministério Público do Estado de Minas Gerais, Procuradoria Geral de Justiça, Central de Apoio Técnico, 2011. Disponível em: http://www.observatoriodopresal.com.br/wp-content/uploads/2012/04/LAUDO_CONGONHAS _SERRA_CASA_DE_PEDRA1.pdf. (Acesso em 11/06/2013).

TRINDADE, S.C. Simulação computacional como ferramenta de auxílio ao projeto: aplicação em edifícios naturalmente ventilados no clima de Natal/RN. (Dissertação de mestrado). Natal: UFRN, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2006. Disponível em: http://www.dominiopublico.gov.br/ pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=& co_obra=142633 (Acesso em 23/02/2013).

TRINDADE, S.C. et al. Representatividade das condições de contorno para simulações da ventilação natural em CFD. 9º. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e 5º. Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. Ouro Preto: ANTAC, 2007, p. 1887-1886.

TUOMAALA, P. e RAHOLA, J. Combined air flow and thermal simulation of buildings. Building and Environment, v. 30, n. 2, p. 255-265, 1995. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/036013239400044S (Acesso em 24/09/2012).

UCCI, M. et al., Ventilation rates and moisture-related allergens in UK dwellings, Proceedings of the 2nd WHO International Housing and Health Symposium. WHO, pp. 328-334, 2004.

UNESCO - WORLD HERITAGE CENTRE. Policy document on the impacts of climate change on World Heritage properties. Paris: UNESCO World Heritage Centre, 2008.

UNI – ENTE NAZIONALE ITALIANO DE UNIFICAZIONI. UNI 10829 - Works of art of historical importance – ambient conditions for the conservation – measurements and analysis. Milão, 1999.

UNI – ENTE NAZIONALE ITALIANO DE UNIFICAZIONI. UNI 10969 - Cultural heritage - general principles for the choice and the control of the microclimate to preserve cultural heritage in indoor environments. Milão, 2002.

UNI – ENTE NAZIONALE ITALIANO DE UNIFICAZIONI. UNI EN 15757 - Conservation of Cultural Property - Specifications for temperature and relative humidity to limit climate - induced mechanical damage in organic hygroscopic materials. Milão: UNI, 2010. Disponível em: https://law.resource.org/pub/it/ibr/ uni.en.15757.ei.2010.pdf (Acesso em 20/02/2013).

UNVER, E. Sustainability of cultural heritage management: Keklik Street and its surrounding conservation and development project. (Dissertação de mestrado). Akara: Middle East Technical University. Graduate School of Natural and Applied Sciences, 2006. Disponível em: http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12607428/index.pdf (Acesso em 01/09/2012).

UZIELLI, L. Monitoring the impact of microclimate on panel paintings. Establishing standards for allowable microclimatic variations for polychrome wood. Oslo, 2010. Disponível em: http://www.cyf-kr.edu.pl/~ncbratas/oslo/UzielliOslo2010.pdf (Acesso em 22/02/2013).

VALENTIN, N. Microbial contamination in museums and archives—health hazards: preventive strategies using air ventilation systems. Experts Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies, Abril de 2007, Tenerife: Getty Conservation Institute, 2007. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/ science/climate/paper_valentin.pdf (Acesso em 22/08/2011)

VAN LENGEN, J. Manual do arquiteto descalço. Porto Alegre: Livraria do Arquiteto, 2a. ed.,2004. 697p.

VAN SCHIJNDEL, A. W. Integrated heat air and moisture modeling and simulation. (Tese de doutorado). Technische Universiteit Eindhoven. 2007. Disponível em: http://alexandria.tue.nl/extra2/200612401.pdf (Acesso em 03/10/2012).

VAN SCHIJNDEL, A. W. Estimating values for the moisture source load and buffering capacities from indoor climate measurements. Journal of Building Physics, v. 31, n. 4, p. 319-331, 2008. Disponível em: http://jen.sagepub.com/content/31/4/319.abstract (Acesso em 03/10/2012).

VAN SCHIJNDEL, A.W. Integrated modeling of dynamic heat, air and moisture processes in buildings and systems using SimuLink and COMSOL. Building Simulation, v. 2, n. 2, p. 143-155, 2009. ISSN 1996-3599. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/s12273-009-9411-x (Acesso em 03/10/2012).

VAN SCHIJNDEL, A.W. et al. Optimal setpoint operation of the climate control of a monumental church. In Research in Building Physics: Proceedings of the 2nd International Conference on Building Physics, 14–18 Setembro de 2003, Antuérpia, p. 777–784. Disponível em: http://alexandria.tue.nl/openaccess/Metis244006.pdf (Acesso em 02/10/2012).

VAN SCHIJNDEL, A.W. et al. Application of an integrated indoor climate, HVAC and showcase model for the indoor climate performance of a museum. In: Proceedings of the 7th Nordic Symposium on Building Physics, Reykjavík, 2005. Disponível em http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik/pdf/art_168.pdf (Acesso em 01/10/2012).

VAN SCHIJNDEL, A.W. et al. Application of an integrated indoor climate, HVAC and showcase model for the indoor climate performance of a museum. Energy and Buildings, v. 40, n. 4, p. 647-653, 2008. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877880700148X (Aceddo em 03/10/2012).

VAN SCHIJNDEL, A.W. et al. Improved HVAC operation to preserve a church organ. Building and Environment, v. 44, n. 1, p. 156-168, 2009. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/ science/article/pii/ S0360132308000280 (Acesso em 01/10/2012).

VAN SCHIJNDEL, A.W. et al. Simulation of the climate system performance of a museum in case of failure events. Energy and Buildings, v. 42, n. 10, p. 1790-1796, 2010. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810001775 (Acesso em 01/10/2012).

VARLAMOFF, M. The first step in preservation: building the right building. World Library and Information Congress: 71st IFLA General Conference and Council "Libraries-A voyage of discovery", 2005.

VERSAGE, R.S. Ventilação natural e desempenho térmico em edifícios verticais multifamiliares em Campo Grande, MS. (Dissertação de mestrado). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2009.

VERSTEEG, H. K. e MALALASEKERA, W. An introduction to computational fluid dynamics : the finite volume method. Harlow, Nova Iorque: Pearson Education Ltd., 2007, 2a ed., 503 p. ISBN 9780131274983.

VIANNA, N.S. Iluminação e arquitetura. 2.ed. São Paulo: Geros, 2004. 357p.

VIITANEN, H. Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures. In: Mass Transfer - Advanced Aspects, Dr. Hironori Nakajima (Ed.), Rijeka: InTech, 2011. ISBN: 978-953-307-636-2. Disponível em: http://www.intechopen.com/books/mass-transfer-advanced-aspects/moisture-and-bio-deterioration-risk-ofbuilding-materials-and-structures (Acesso em 29/08/2012)

VIITANEN, H. et al. Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures. Journal of Building Physics, v. 33, n. 3, p. 201-224, 2010.

VIITANEN, H. et al. Moisture conditions and biodeterioration risk of building materials and structures. In: Proceedings of the Second International Symposium Integrated Lifetime Engineering of Buildings and Civil Infrastructures, Kuopio, December 1–3, 2003, p. 151–156. Disponível em: http://www.bfafh.de/inst4/45/pdf/tfmccond.pdf (Acesso em 29/08/2012)

VIITANEN, H. et al. Moisture conditions and biodeterioration risk of building materials and structures. In: Proceedings of BEST 1: Building for Energy Efficiency and Durability at the Crossroads. Minneapolis: Building Enclosure Council BEC-Minnesota. June 10-12, 2008. Disponível em: http://best1.thebestconference.org/pdfs/009.pdf (Acesso em 29/08/2012)

VIITANEN, H. e OJANEN, T. Improved model to predict mold growth in building materials. In: Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X. Clearwater Beach: ASHRAE/DOE/ORNL, 2007. Disponível em: http://www.ornl.gov/sci/buildings/2010/Session%20PDFs/162_New.pdf (Acesso em 29/08/2012).

WACHBERGER, M. e WACHBERGER, H. Construir con el sol : utilización de la energía solar pasiva = Construir com o sol : utilização da energia solar. Barcelona etc.: Gustavo Gili, 1984. 143 p. ISBN 8425211913.

WALLER, R. Conservation risk assessment: a strategy for managing resources for preventive conservation. In: A. Roy and P. Smith (eds.). Preventive Conservation Practice, Theory and Research. Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress, 12-16 September 1994. Londres: The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works. p. 12-16, 1994. Disponível em: http://museum-sos.org/docs/WallerOttawa1994.pdf (Acesso em 20/04/2008)

WALLER, R. Risk management applied to preventive conservation. In: Storage of Natural History Collections: A Preventive Conservation Approach. C. L. Rose, C. A. Hawks and H. H. Genoways (eds.). Iowa City: Society for the Preservation of Natural History Collections, p. 21-27, 1996. Disponível em: http://museum-sos.org/docs/WallerSPNHC1995.pdf (Acesso em 20/04/2008)

WALLER R. A risk model for collection preservation. Preprints of ICOM-CC 13th Triennial Conference Rio de Janeiro, 22-27 September 2002, Londres: James & James, 2002, p. 102-107.

WALLER, R. e MICHALSKI, S. Effective preservation: from reaction to prevention. In: Conservation: the Getty Conservation Institute Newsletter, Los Angeles, v. 19, n. 1, p. 4-9, 2004. Disponível em: http://www.getty.edu/conservation/publications/newsletters/19_1/ feature.html (Acesso em 20/04/2008)

WALLER, R, e MICHALSKI, S. A paradigm shift for preventive conservation, and a software tool to facilitate the transition. Preprints of ICOM-CC 14th Triennial Conference, the Hague, 12–16 September, 2005. v. 1, p. 733–738.

WANG, L. e CHEN, Q. Evaluation of some assumptions used in multizone airflow network models. Building and Environment, v. 43, n. 10, p. 1671-1677, 2008. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132307001989 (Acesso em 22/09/2012).

WANG, L. e CHEN, Q. Theoretical and numerical studies of coupling multizone and CFD models for building air distribution simulations. Indoor Air, v. 17, n. 5, p. 348-361, 2007. ISSN 1600-0668. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00481.x (Acesso em 22/09/2012).

WANG, H. e CHEN, Q. A new empirical model for predicting single-sided, wind-driven natural ventilation in buildings. Energy and Buildings, v. 54, n. 0, p. 386-394, 2012. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812003738 (Acesso em 23/05/2012).

WATSON, D. e. LABS, K. Climatic design: energy-efficient building principles and practices. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1993, 280p.

WEINTRAUB, S. Demystifying silica gel. American Institute for Conservation - Objects Specialty Group Postprints, v. 9, p.169-194, 2002.

WEINTRAUB, S. The museum environment: transforming the solution into a problem. Collections: A Journal for Museum and Archives Professionals. v. 2, n. 3, p. 195-218, 2006.

WESTPHAL, F.S. e LAMBERTS, R. Building simulation calibration using sensitivity analysis. In: Proceedings of the 9th International Conference on Building Performance Simulation, Montréal, Canada, 2005, p. 1331–1338. Disponível em: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2005/BS05_1331_1338.pdf (Acesso em 20/09/2012).

WHITE, R. e DIETENBERGER, M. Fire safety of wood construction. In: EUA – ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA – DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA – SERVIÇO FLORESTAL - LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS (FOREST PRODUCTS LABORATORY). Wood handbook: wood as an engineering material. General technical report FPL GTR-190. Madison: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010, Centennial Edition, p. 18.1-18.22.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. Programmes and projects: Guidelines for indoor air quality: dampness and mould, 2009. Disponível em: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0017/43325/E92645.pdf. (Acesso em 30/08/2012) .

WILLIAMSON, T. J. et al. Understanding sustainable architecture. Londres: Spon Press, 2003. ISBN 0415283515.

WILLIGEN, P. D. A mathematical study on craquelure and other mechanical damage in paintings. Delft: Delft University Press, 1999. vi, 100 p. ISBN 9040719462. Disponível em: http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:9453c253-731b-478e-92bf-302d269d3d89/ (Acesso em 29/08/2013).

WILSON, W. K. National Information Standards Organization, Technical Report NISO-TR01-1995 - Environmental guidelines for the storage of paper records.Bethesda: NISO Press, 1995.

WINK, W. Determining moisture equilibrium curves of hygroscopic materials. Industrial Engineering Chemistry Anal. Ed., 1946, 18 (4), pp 251–252. Disponível em: http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/i560152a008 (Acesso em 15/08/2011)

WOODS, J. et al. Evaluation of the effective moisture penetration depth model for estimating moisture buffering in buildings. Contract, v. 303, p. 275-3000, 2013.

WOOLFSON, M. M.; PERT, G. J. An introduction to computer simulation. Oxford ; Nova Iorque: Oxford University Press, 1999.

WRIGHT, D. Arquitectura solar natural: un texto pasivo. Ed. rev. México: Gili, 1983. 245, 11 p. ISBN 968-6085-60-2.

WU, Y.C. et al. Myth of ecological architecture designs: Comparison between design concept and computational analysis results of natural-ventilation for Tjibaou Cultural Center in New Caledonia. Energy and Buildings, v. 43, n. 10, p. 2788-2797, 2011. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811002842 (Acesso em 22/09/2012).

WYRWAŁ, J. e MARYNOWICZ, A. Vapour condensation and moisture accumulation in porous building wall. Building and Environment, v. 37, n. 3, p. 313-318, 2002. ISSN 0360-1323. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132300000974 (Acesso em 24/09/2012).

YANG, T. CFD and field testing of a naturally ventilated full-scale building. (Tese de doutorado). Nottingham: University of Nottingham, Faculty of Engineering, School of Civil Engineering, 2004. Disponível em: http://etheses.nottingham.ac.uk/91/1/TongYangThesis2004.pdf (Acesso em 18/10/2012).

YANG, X. et al. Fullscale experimental investigation of moisture buffering effect and indoor moisture distribution. In: Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings (Building X Conference), Clearwater Beach, 2007. Disponível em: http://www.ornl.org/sci/buildings/2010/Session%20PDFs/83_New.pdf (Acesso em 24/09/2012).

YEANG, K. Designing with nature: the ecological basis for architectural design. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1995. ix, 243 p. ISBN 0070723176.

YEANG, K. Green design in the hot humid tropical zone. In: BAY, J.H. e ONG, B.L. Tropical sustainable architecture : social and environmental dimensions. 1st. Boston, MA: Elsevier, 2006.

YOUNES, C. et al. Air infiltration through building envelopes: a review. Journal of Building Physics, v. 35, n. 3, p. 267-302, 2012. Disponível em: http://jen.sagepub.com/cgi/content/abstract/35/3/267 (Acesso em 23/05/2012).

YOUNSI, R. et al. Three-dimensional simulation of heat and moisture transfer in wood. Applied Thermal Engineering, v. 26, n. 11–12, p. 1274-1285, 2006. ISSN 1359-4311. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431105003650 (Acesso em 24/09/2012).

YU et al. An evaluation of silica gel for humidity control in display cases. WAAC newsletter, Nova Iorque, v. 23, n. 2, p.14-19, 2001. Disponível em: http://cool.conservation-us.org/waac/wn/wn23/wn23-2/wn23-206.html (Acesso em 14/09/2012).

ZANIRATO, S.H. Experiências de prevenção de riscos ao patrimônio cultural da humanidade. Ambiente e Sociedade. São Paulo, v. 13, n.1, p. 151-164, 2010. ISSN 1414-753X. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/S1414-753X2010000100010 (Acesso em 05/09/2012).

ZANNIS, G. et al. Energy efficiency in retrofitted and new museum buildings in Europe. International Journal of Sustainable Energy, v. 25, n. 3/4, p. 199-213, 2006. ISSN 1478-6451. Disponível em: http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=23220017&lang=pt-br&site=ehost-live (Acesso em 12/09/2012).

ZÁRATE, L.E. et al. Estimativa de dados climáticos utilizando redes neurais artificiais para fins de zoneamento bioclimático do estado de Minas Gerais. In: 12º. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Fortaleza. São Paulo: ANTAC, 2008. 10 p. (CD-ROM).

ZEVENHOVEN, R. Introduction to computational fluid dynamics. Åbo Akademi University, Thermal and Flow Engineering Laboratory, 2012. Disponível em: http://users.abo.fi/rzevenho/introCFD.html (Acesso em 19/09/2012).

ZHAI, Z. e CHEN, Q. Solution characters of iterative coupling between energy simulation and CFD programs. Energy and Buildings, v. 35, n. 5, p. 493-505, 2003. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778802001561 (Acesso em 03/10/2012).

ZHAI, Z. J.; CHEN, Q. Y. Performance of coupled building energy and CFD simulations. Energy and Buildings, v. 37, n. 4, p. 333-344, 2005. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804002130 (Acesso em 01/10/2012).

ZHAI, Z. J. e CHEN, Q. Y. Sensitivity analysis and application guides for integrated building energy and CFD simulation. Energy and Buildings, v. 38, n. 9, p. 1060-1068, 2006. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806000053 (Acesso em 01/10/2012).

ZHAI, Z. e PREVITALI, J. M. Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation. Energy and Buildings, v. 42, n. 3, p. 357-365, 2010. ISSN 0378-7788. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778809002400 (Acesso em 03/09/2012).

ZÍTEK, P.; VYHLÍDAL, T. Model-based moisture sorption stabilization in historical buildings. Building and Environment, v. 44, n. 6, p. 1181-1187, 2009. ISSN 0360-1323.

ZOU, X. et al. Prediction of paper permanence by accelerated aging I. Kinetic analysis of the aging process. Cellulose, v. 3, n. 1, p. 243-267, 1996a. ISSN 0969-0239. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/BF02228805 (Acesso em 03/10/2012).

ZOU, X. et al. Prediction of paper permanence by accelerated aging II. Comparison of the predictions with natural aging results. Cellulose, v. 3, n. 1, p. 269-279, 1996b. ISSN 0969-0239. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/BF02228806 (Acesso em 03/10/2012).

ZUO, W. Introduction of computational fluid dynamics. (Documento eletrônico). Lehrstuhl für Strömungsmechanik, FAU Erlangen-Nürnberg, Joint Advanced Student School (JASS), Course 2: The Interplay of Mathematical Modeling and Numerical Simulation, 2005. Disponível em: http://wwwmayr.informatik.tu-muenchen.de/konferenzen/Jass05/courses/2/index.html (Acesso em 19/09/2012).

APÊNDICE A

MÉTRICAS DE PRESERVAÇÃO COMO FERRAMENTAS DIAGNÓSTICAS PARA O GERENCIAMENTO AMBIENTAL

As métricas de preservação são parâmetros ou índices que

(i) Permitem uma avaliação quantitativa, mensurável, padronizada, reprodutível, facilmente compreensível e comunicável das condições de conservação de coleções, bem como dos riscos para a sua preservação, em função de condicionantes ambientais;

(ii) Permitem comparar duas ou mais situações ambientais diferentes no mesmo espaço (sala ou mobiliário fechado), em diferentes épocas do ano, ou espaços distintos com diferentes condições ambientais, em termos da **expectativa de vida** das coleções;

(iii) Procuram integrar condições e mecanismos dinâmicos complexos, envolvidos na deterioração das coleções, resultando em medidas **simplificadas** (e por isso embutem incertezas) de fácil interpretação e possibilitando uma análise expedita de grandes quantidades de dados, inclusive por leigos.

Os mecanismos de atuação dos agentes de deterioração das coleções são dinâmicos e complexos e o uso das métricas de preservação aponta para uma **mudança de paradigma** em termos de gerenciamento ambiental. Assim é, na medida em que esse uso **exige uma maior compreensão** sobre o que está sendo monitorado e controlado (mecanismos de deterioração, dados climáticos, dados sobre o edifício e seus sistemas), bem como sobre os objetivos do gerenciamento ambiental, mas por outro lado, produz um tipo de resultado que facilita as etapas de informação, avaliação e tomada de decisão não só por parte dos profissionais diretamente envolvidos com a conservação da coleção, mas envolvendo toda a equipe da instituição. Henry, ao discutir como esses profissionais trabalham com dados ambientais, comenta que "a temperatura e a umidade relativa são as únicas coisas que um curador ou um diretor podem medir com um medidor. Eles não podem medir a segurança; eles não podem medir o risco de incêndio, eles não podem medir outras coisas que colocam a coleção em risco" (HENRY apud GCI, 2007, p.29).

O Quadro 5 classifica as métricas de preservação estudadas neste trabalho.

Quadro 5 – Resumo das métricas de preservação estudadas neste trabalho. Adaptado de IPI (2005, 2013), (NISHIMURA, s.d.)

Mecanismo	**Embasamento científico**	**Aplicações**	**Métricas de preservação**	**Algoritmo**	**Interpretação**
Deterioração química (danos espontâneos em nível molecular em materiais orgânicos)	Cinética das reações químicas	Materiais orgânicos (papel, couro, plásticos, corantes, têxteis, etc.)	Isopermas de Sebera (*P2/P1, Isoperma-T*)	Calculado a partir de médias móveis de *T* e *UR* e sua integração no tempo	Comparativa: quanto maiores os valores, melhor
			Isopermas de Michalski (*LM, LM-T*)	Calculado a partir de médias móveis de *T* e *UR* e sua integração no tempo	Comparativa *LM* > 1: BAIXO RISCO 0.75 < *LM* ≤ 1: RISCO MEDIANO *LM* ≤ 0.75: ALTO RISCO (MARTENS, 2012)
			Índice de preservação (*IP*)	Calculado a partir de valores instantâneos de *T* e *UR*	Comparativa: quanto maior o *IP*, melhor
			Índice de preservação considerando o efeito cumulativo do tempo (*IETP*)	Integração de valores de *T* e *UR* no tempo, cada intervalo temporal é ponderado pela taxa de deterioração	Comparativa: quanto maior o *IETP*, melhor >100 : EXCELENTE >75: BOM 45-75: ACEITÁVEL <45: RISCO
Danos físico-mecânicos devidos à adsorção / dessorção de umidade	Comporta-mento físico de madeira "típica"	Materiais higroscópicos (madeira, papel, têxteis, couro, etc.)	Teor de umidade em condições de equilíbrio (*EMC*)	Estimativa da variação de *EMC* com o tempo	Risco em condições extremas (*minEMC* ≥ 5% E *maxEMC* ≤ 12,5% E *DC* < 0,5%) : BOM; (*minEMC* ≥ 5% E *maxEMC* ≤ 12,5% E 0,5% ≤ *DC* ≤ 1,5%) : ACEITÁVEL (*minEMC* < 5% OU *maxEMC* > 12,5% OU *DC* > 1,5%) : RISCO
			Mudança dimensional (*DC*)	Estimativa de mudanças dimensionais nos objetos com o tempo	
			Flutuações na *UR* (*ΔUR*)	Mudanças na *UR* em intervalo de tempo compatível com o tempo de resposta, comparação com gráfico de resposta da madeira	Variável na literatura, referências: MARTENS (2012); BRATASZ (s.d.); BRATASZ et al. (2007a); KOZLOWSKI (2010); CAMUFFO e PAGAN (2004), CAMUFFO et al. (2002, 2004b),

Quadro 5 – Resumo das métricas de preservação estudadas neste trabalho. Adaptado de IPI (2005, 2013), (NISHIMURA, s.d.) – (continuação)

Mecanismo	**Embasamento científico**	**Aplicações**	**Métricas de preservação**	**Algoritmo**	**Interpretação**
Deterioração biológica	Germinação de mofo em grãos	Materiais higroscópicos (madeira, papel, têxteis, couro, etc.)	Fator de risco de mofo (*MRF*)	Integração de *T* e *UR* no tempo, projeta uma soma móvel progressiva até a germinação	*MRF* = 0 : IDEAL *MRF* <0,5: BOM 0,5<*MRF* <1: RISCO *MRF* >1: MOFO ATIVO
			Tempo de umidade (*TOW*)	Fração de tempo com *UR* > 80% nas últimas 24h	*TOW* ≤ 0,5: BOM *TOW* > 0.5: RISCO
Corrosão	Metais (avaliação por meio do comportamento físico típico da madeira)	Metais	Teor de umidade em condições de equilíbrio (*EMC*)	Estimativa da variação de *EMC* com o tempo	*maxEMC* ≤ 7: BOM 7.1≤ *maxEMC* ≤ 10.5 : ACEITÁVEL *maxEMC* ≥ 10.6 : RISCO *UR*>55% por mais de 30 dias: RISCO

A interpretação correta das métricas de preservação facilita o processo de tomada de decisão na medida em que pode ajudar na quantificação da magnitude dos riscos bem como na análise de custo-benefício na sua redução. Isso se aplica à adoção de medidas como: uso de umidificação / desumidificação, alterações no *set-point* dos sistemas ativos, mudança de espaço e mobiliário, transferência das coleções para áreas com métricas mais favoráveis, abertura e fechamento de janelas, proteções contra a insolação direta ou o uso da ventilação noturna, etc.

As ferramentas de simulação computacional estudadas neste trabalho podem ser programadas para avaliar o efeito de medidas como as citadas acima, bem como calcular a variação temporal das métricas de preservação em função dos dados climáticos externos ou também a distribuição espacial dessas métricas, no interior de uma sala ou de um móvel. Tais aspectos são investigados por meio da metodologia, resultados e análises aqui apresentados.

A.1- Índices de desempenho e critérios de classificação ambiental

O uso das métricas apresentadas no Quadro 5 difere da análise básica de tabelas e gráficos brutos de variáveis como temperatura e umidade relativa, resultantes de procedimentos de monitoramento ambiental. Essa análise básica, cujas limitações são apontadas por BERNARDI (2008, p. 21), geralmente é feita comparando os valores medidos com padrões, limites, faixas ou zonas de segurança fixos, estáticos e de aplicabilidade geralmente restrita, a exemplo dos chamados "números mágicos" de Garry Thomson (1986), que fixou em 50 ± 3% a umidade relativa segura para conservação. (Vide seção 2.4.3).

Normalmente, as interpretações obtidas a partir deste tipo de análise são determinísticas / binárias, do tipo "atende" ou "não atende", "está dentro" ou "está fora" dos limites considerados. Uma abordagem metodológica intermediária, cuja aplicação fica restrita pelas considerações acima, é o uso de **índices de desempenho.**

Esse tipo de índice considera a **porcentagem do tempo**, em relação ao período monitorado, ou períodos pré-definidos (anual, mensal, semanal, etc.) na qual os parâmetros analisados permanecem dentro de determinada faixa de valores previamente estabelecida (CORGNATI et al., 2009; CORGNATI e FILLIPI, 2010; LA GENNUSA et al., 2005).

CORGNATI et al. (2009) e CORGNATI e FILLIPI (2010) consideraram como satisfatórios, no monitoramento de temperatura e umidade relativa, índices de desempenho maiores que 90%. COSTANZO et al. (2006) e D'AGOSTINO (2006) descrevem os índices adotados nas normas italianas UNI 10829 e UNI 10969 que constituem **indicadores de desvio**, a serem aplicados na análise das flutuações de temperatura e umidade relativa, quando fora dos limites de segurança.

A.2- Isopermas

O método das **isopermanências** ou **isopermas** foi originalmente desenvolvido por Donald Sebera (1989, 2001) e publicado em 1994 pela CLIR – Conselho de Recursos em Biblioteconomia e Informação, que incorporou a antiga Comissão de Preservação e Acesso dos Estados Unidos[123]. Em essência, o método permite comparar condições ambientais

[123] http://www.clir.org/pubs/reports/isoperm (Acesso em 21/08/2012).

distintas, caracterizadas pela temperatura e umidade relativa, em termos da **expectativa de vida** proporcionada pelo ambiente para as coleções. Para Sebera, a isoperma é "**uma medida gráfica quantitativa de permanência relativa**" (SEBERA, 2001, p. 26). Ela é simbolizada por uma **linha que representa uma taxa de permanência constante**, sobre um gráfico de umidade relativa em função da temperatura (STRANG e GRATTAN, 2009, p. 2).

As considerações do autor foram baseadas nos mecanismos químicos de deterioração do **papel**, sendo a **energia de ativação para a hidrólise da celulose** uma das variáveis fundamentais do método. O autor afirma (SEBERA, 2001, p. 9) que o método pode ser aplicado para outros materiais higroscópicos como tecidos e pergaminhos. STRANG e GRATTAN (2009) revisaram as equações apresentadas por Sebera, pois o método original não incluía o efeito sobre os objetos de outros agentes climáticos de deterioração, como a luz ou os poluentes. LUXFORD et al (2010) utilizaram resultados de experimentos de envelhecimento acelerado para obter isopermas específicas para acervos de tecido em seda.

O embasamento científico do método parte da relação diretamente proporcional entre a **taxa de deterioração** (o mesmo que dizer: a velocidade das reações químicas de deterioração) e os valores observados de temperatura e umidade relativa. Entretanto, a expectativa de vida estimada por essa e também por outras métricas de preservação tratadas nesta seção – como, por exemplo, o Índice de Preservação descrito na próxima seção – não pode ser interpretado de maneira absoluta. Antes pelo contrário, o método fornece uma f**erramenta de comparação, relativa,** para cotejar duas ou mais condições ambientais distintas, que podem ocorrer no mesmo espaço (sala ou mobiliário fechado) ou em espaços diferentes.

Sebera chama a expectativa de vida para uma coleção de **permanência** (*P*) cujo valor é inversamente proporcional à taxa de deterioração (*r*). A razão comparativa entre duas permanências (*P2/P1*) será o inverso da razão entre duas taxas de deterioração. A taxa de deterioração da celulose é diretamente proporcional ao **teor de umidade em condições de equilíbrio (*EMC*)**[124] do papel – argumento confirmado por STRANG e GRATTAN (2009, p.2) – o qual, por sua vez, é diretamente proporcional à umidade relativa do ambiente.

[124] Vide seção A.4.

Segundo SEBERA (2001, p. 11), a eq. (25) fornece uma boa aproximação quantitativa para taxas de deterioração (e permanências) na **faixa de *UR* entre 30 e 65%,** considerando-se tempos de resposta longos.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{r_2/r_1} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{UR_1}{UR_2} \tag{25}$$

O aumento de *T* aumenta a velocidade da maioria das reações químicas, segundo o princípio de Arrhenius:

$$k_r = Ae^{-\frac{E}{RT}} \tag{26}$$

Onde k_r é a constante de velocidade da reação, *A* é uma constante pré-exponencial representando o número de moléculas ativadas e a frequência das colisões (STRANG e GRATAN, 2009, p. 124) e *R* é a constante universal dos gases perfeitos. MICHALSKI (2002) deduz, a partir da revisão desse princípio, que a cada redução ou aumento de 5ºC em *T*, a expectativa de vida da coleção dobrará ou diminuirá pela metade, respectivamente. O autor enfatiza (p. 70) que valores maiores, entre 7-10ºC nessa regra, podem ser mais acurados, dependendo dos mecanismos químicos de deterioração considerados. Esses mecanismos podem ser desacelerados, mantendo-se o ambiente frio, seco e escuro (MAEKAWA et al., 2009). Porém, o ganho em termos da expectativa de vida de materiais instáveis conseguido pela redução de temperatura é em parte contrabalançado diminuição dessa expectativa que ocorre em função do aumento da umidade relativa decorrente do resfriamento (MICHALSKI, 2002).

> Materiais que se degradam com uma energia de ativação elevada terão uma expectativa de vida muito maior com pequenas reduções na temperatura. Contudo, pela mesma maneira, a deterioração será também bem mais rápida com pequenos aumentos na temperatura. Para estes materiais com elevada energia de ativação, condições ruins são muito ruins e condições boas são muito boas. De forma similar, materiais com uma energia de ativação da deterioração muito baixa necessitarão de grandes melhorias nas condições de armazenagem para produzir um aumento significativo em sua expectativa de vida. Contudo, eles também se deterioram mais lentamente. (REILLY et al, 2001, p. 32).

A temperatura do ar influencia também na umidade relativa, uma vez que determina a umidade de saturação. SEBERA (2001, p. 12) apresenta as equações (27) e (28), derivando as taxas de deterioração (e inversamente, as permanências) dos valores de temperatura e umidade relativa, bem como da energia de ativação *(E*) da reação de deterioração,

considerando como representativa das aplicações para preservação a hidrólise do papel, com energia de ativação da ordem de 30-35Kcal/mol125:

$$\frac{r_2}{r_1} = \left(\frac{UR_2}{UR_1}\right)\left(\frac{T_2+460}{T_1+460}\right)10^{-394.E.\left(\frac{1}{T_2+460}-\frac{1}{T_1+460}\right)} \quad (27)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{UR_1}{UR_2}\right)\left(\frac{T_1+460}{T_2+460}\right)10^{+394.E.\left(\frac{1}{T_2+460}-\frac{1}{T_1+460}\right)} \quad (28)$$

Onde *T* é dada em [ºF].

A partir destas equações o autor escolheu arbitrariamente o par de valores (20ºC / 50%) correspondendo a isoperma de número 1, e, fixando uma das variáveis, e fazendo vaiar a outra, obteve os pares de valores de temperatura e umidade relativa para os quais as equações resultam o valor 1. Depois, repetiu o mesmo procedimento para diferentes valores de isopermanências relativas, por exemplo, 0.5, 0.33, 0.1, 2, 5, 10, etc., obtendo as figuras 133 e 134, respectivamente para energias de ativação de 35 e 25Kcal/mol. Ao longo de uma curva isoperma, a permanência – e reciprocamente, a taxa de deterioração – não varia.

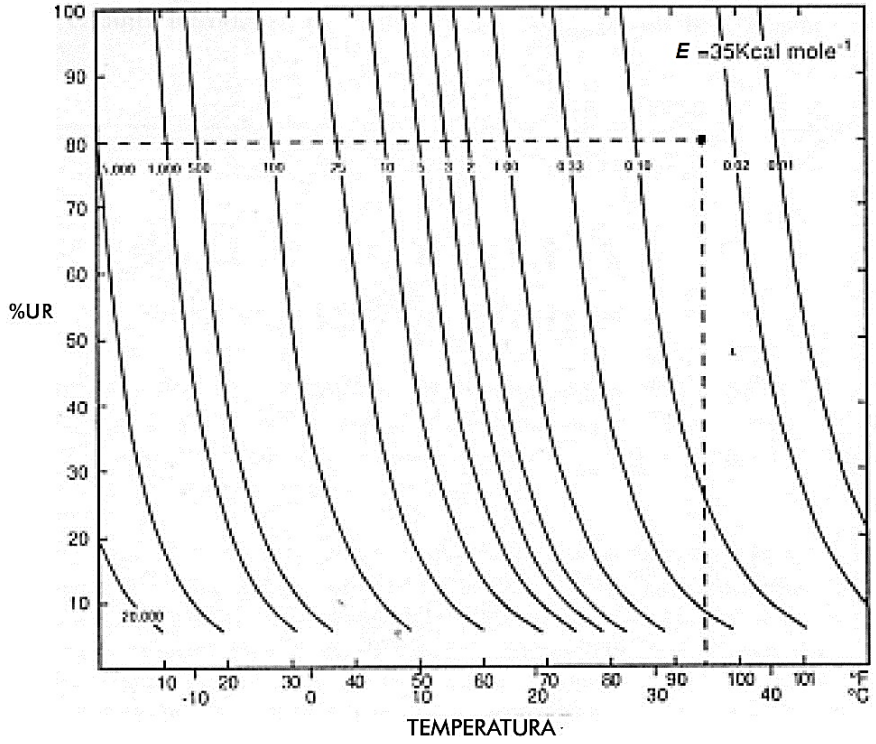


Figura 133 – Diagrama de isopermas de Sebera, *E* = 35Kcal/mol. Fonte: (SEBERA, 2001).

[125] 1Kcal = 4,1868KJ

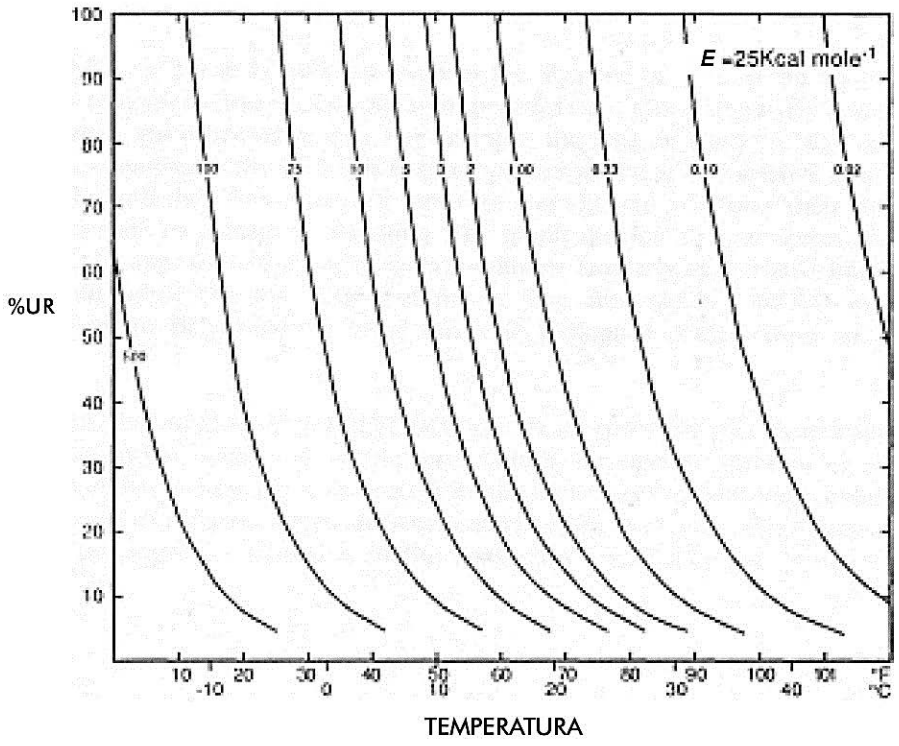


Figura 134 – Diagrama de isopermas de Sebera, *E* = 25Kcal/mol. Fonte: (SEBERA, 2001).

SEBERA (2001, p. 24) discute a adequação do uso de uma proporção linear entre a taxa de deterioração e a umidade, afirmando que uma maior sensibilidade à influência da umidade na taxa de deterioração poderia ser considerada adotando-se um expoente maior que 1 no primeiro termo das equações acima. Sebera afirma que **é mais significativa a seleção de um valor apropriado da energia de ativação *E*.** A escolha entre o uso dos valores 35Kcal ou 25Kcal produz gráficos diferentes, sendo que o primeiro valor resulta em diferenças maiores e mais facilmente reconhecíveis.

ZOU (1996a, 1996b) levanta e procura sanar as dificuldades na escolha de um valor apropriado para *E*, ressaltando a grande variedade de valores empíricos publicados. O autor investiga em profundidade a cinética química da deterioração do papel e ressalta a importância do uso de indicadores relacionados aos processos químicos de deterioração, como o **grau de polimerização**. O autor propõe uma metodologia para o cálculo da expectativa de vida do papel com base neste indicador cujo formato gráfico é similar às curvas de Sebera e Michalski, pois guardam como base comum a eq. (26).

Segundo MICHALSKI (apud MARTENS, 2012, p. 61) a energia de ativação fica entre 70 e 100 kJ/mol (~17 a 24 kcal/mol) para a maioria dos materiais.

É difícil estabelecer um valor adequado de energia de ativação *E* para aplicação das equações de Sebera à deterioração química da madeira. As referências sobre as energias de ativação dos mecanismos químicos de deterioração de madeira estão dispersas na literatura, sendo geralmente encontradas em estudos de termogravimetria.

WHITE e DIETENBERGER (2010) citam estudos sobre os mecanismos térmicos de deterioração da madeira, enfatizando que eles envolvem estágios com energias de ativação distintas. As principais alterações que ocorrem em baixas temperaturas (abaixo de 100ºC) são relacionadas às mudanças dimensionais devido à perda de umidade.

SANDU et al. (2003) investigou o comportamento de amostras de tília (*lime wood)*, comentando as diferenças estruturais moleculares entre a lignina e a celulose e dividindo em três os estágios térmicos de deterioração, encontrando uma energia de ativação da ordem de entre 70 kJ/mol (~17 a 19Kcal/mol) para o primeiro estágio e de 80 a 140KJ/mol (~19 a 33Kcal/mol) para o segundo estágio. Os autores destacam ainda que a energia de ativação é inversamente proporcional ao grau de deterioração atingido.

POPESCU et al. (2011) estudaram o envelhecimento acelerado de amostras de tília e encontraram energias de ativação entre 100 e 120KJ/mol (~23 a 28Kcal/mol).

HON e SHIRAISHI (2001, p. 451) investigam em profundidade diversos mecanismos de deterioração química da madeira. Eles apontam energias de ativação da ordem de 30 a 35Kcal/mol para a hidrólise de polissacarídeos contidos na madeira, 30Kcal/mol para a hidrólise ácida da celulose (p. 450), sendo 22 a 28Kcal/mol nas fases iniciais deste processo (p.466), e 36 a 38Kcal/mol para a hidrólise alcalina de glucosídeos (p. 475).

ROWELL (2005, p. 92) apresenta energias de ativação específicas para o empolamento por adsorção de água líquida de diversas espécies de madeira, variando entre 32 e 48KJ/mol (~8 a 11Kcal/mol).

MICHALSKI (2002, apud MARTENS, 2011, p. 61) elaborou um modelo semelhante ao de Sebera, também arbitrando a isoperma de número 1 com referência no par de valores (20ºC / 50%) e calculando suas isopermas denominadas **multiplicadores de expectativa de vida *(LM)*** dados pela relação

$$LM = \left(\frac{50\%}{UR}\right)^{1.3} \cdot e^{\frac{E}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293}\right)} \quad (29)$$

Onde *E* é dada em [J/mol]; *T* é dada em [K] e *LM* é o multiplicador da isoperma 1, representando uma permanência maior ou menor, em função das condições ambientais.

Michalski plotou as isopermas calculadas segundo o modelo acima sobre uma carta psicrométrica (Figura 135), demonstrando que as elas são **mais acuradas com umidade relativa em torno de 50%**, quando consideramos a **isoterma de sorção média**[126] para madeira, papel e gelatina.

A Figura 135 foi incluída no manual da ASHRAE (2007, p. 21.4) e demonstra as relações de proporcionalidade entre a permanência e a variação da temperatura deduzidas por Michalski, ao analisar o princípio de Arrhenius (eq. 26). PADFIELD (2004) comenta, com razão, que o manual da ASHRAE não deixa clara a metodologia de obtenção das curvas. MICHALSKI (2002) chama atenção para o fato de que a diminuição da temperatura corresponde a um aumento na umidade relativa, que por sua vez diminui a expectativa de vida. Desprezando-se alterações na pressão atmosférica, uma diminuição de 10ºC na temperatura corresponde aproximadamente ao dobro da umidade relativa. Portanto, quando a taxa de deterioração em função da temperatura tem uma derivada (coeficiente angular) que se aproxima de 10ºC, os dois efeitos tendem a se anular e as isopermas se aproximarão de retas horizontais, na Figura 135 e inclinadas, nas figuras 133 e 134.

MARTENS (2012, p. 117) **arbitrou** que condições ambientais que produzem expectativas de vida maiores do que a expectativa correspondente ao *LM* = 1 (*T*=20ºC e *UR*=50%) resultam em um baixo risco de deterioração química para as coleções. Valores de temperatura ou de umidade relativa acima dos valores de referência produzirão expectativas de vida menores. Martens considerou o risco de deterioração química causado por condições ambientais com $0{,}75 < LM < 1$ como "mediano" e quando o $LM \leq 0{,}75$, como "alto", sem justificar, contudo, a escolha desses parâmetros.

[126] Uma **isoterma de sorção** é um gráfico que expressa a relação entre o EMC de um material higroscópico e a umidade relativa do ambiente, sob temperatura constante. As isotermas de sorção podem ser obtidas em laboratório, expondo uma amostra do material a condições controladas de temperatura e umidade e medindo o peso da amostra após tempo suficiente de equilíbrio, que pode chegar a semanas ou meses, dependendo da amostra. Embora as isotermas sejam tradicionalmente plotadas em função da umidade relativa, os processos de adsorção/dessorção dependem de diferenças de pressão de vapor. (BOU SAID, 2003; CARMELIET et al., 2005; CHASSAGNE et al., 2005, 2007; DUBOIS et al., s.d.; REMKI et al., 2012; ROSADO, 2004; YOUNSI et al., 2006).

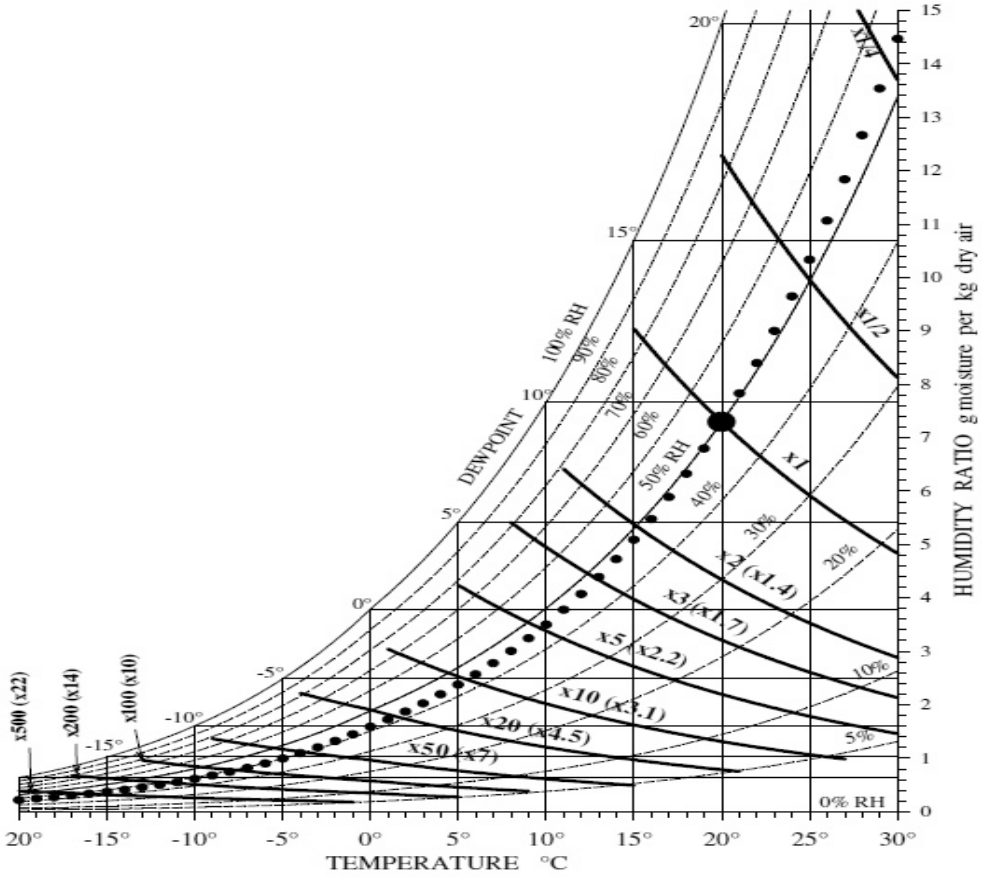


Figura 135 – Diagrama psicrométrico com isopermas de Michalski (*LM*). E =100KJ/mol (representativo para papel, filmes e corantes), valores entre parênteses considerando E = 60KJ/mol (representativo para mídias magnéticas e vernizes). A curva pontilhada representa uma isoterma de adsorção média para madeira, papel e gelatina. Fontes: (ASHRAE, 2007; MICHALSKI, 2002, 2000).

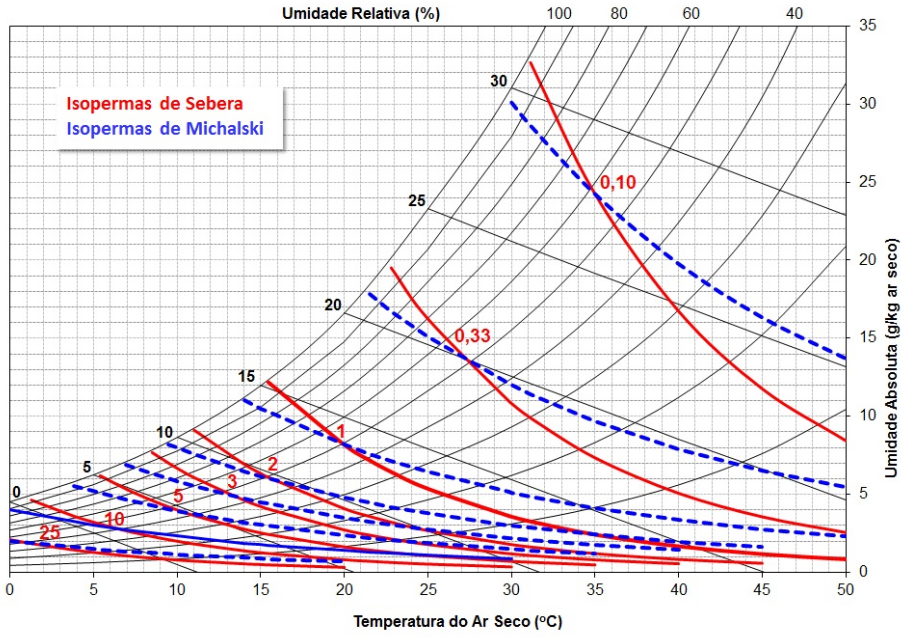


Figura 136 – Diagrama psicrométrico comparativo das isopermas de Sebera (em vermelho) e Michalski (em azul, tracejadas). (*E = 25Kcal/mol ~105KJ/mol).*

Ao comparar os dois modelos sobre a carta psicrométrica (Figura 136), verifica-se que, de modo geral, para *UR* > 50%, as taxas de permanência calculadas pela metodologia de Michalski resultam em valores menores que os calculados pela metodologia de Sebera, ocorrendo o contrário para *UR* < 50%.

Os detalhes apontados por Sebera e Michalski foram estudados por STRANG e GRATTAN (2009), partindo da premissa de que o uso de uma relação linear entre a deterioração e a umidade relativa pode induzir a erros, uma vez que as isotermas de sorção do papel e de outros materiais orgânicos, na maioria das vezes, apresentam uma curva sigmoide (curva pontilhada na Figura 135), com não linearidades significativas. CARMELIET et al. (2005) estudam a influência da histerese no processo de adsorção/dessorção. STRANG e GRATTAN (2009) revisaram o modelo de Sebera, incorporando a equação de Arrhenius (eq. 26), e aproximando a isoterma de sorção pelo modelo GAB (Guggenheim-Anderson-deBoer)[127], obtendo:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\frac{M_{01}K_1C_1A_{W1}}{(1-K_1A_{W1})(1-K_1A_{W1}+K_1C_1A_{W1})}}{\frac{M_{02}K_2C_2A_{W2}}{(1-K_2A_{W2})(1-K_2A_{W2}+K_2C_2A_{W2})}} \times e^{\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_2}-\frac{1}{T_1}\right)} \qquad (30)$$

Ou resumidamente,

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{GAB_1}{GAB_2} \times e^{\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_2}-\frac{1}{T_1}\right)} \qquad (31)$$

Onde

E é dada em [J/mol];

A_w é a *atividade aquosa*, definida como sendo a razão entre a pressão de vapor d`água no substrato e a pressão de vapor d`água pura, à mesma temperatura e varia de 0 a 1;

M_0 é o teor de umidade na monocamada molecular (superfície) do substrato;

[127] O modelo GAB é bastante utilizado em aplicações de secagem de alimentos. Ele supõe a ocorrência de adsorção de umidade em microcamadas moleculares na interface entre o substrato e o líquido em processo de secagem. Descrições mais completas do modelo podem ser encontradas em (CELESTINO, 2010; QUIRIJNS et al, 2005; TIME, 1998).

K são constantes que expressam diferenças de estado entre a monocamada molecular e as demais camadas da água pura;

C são constantes de Guggenheim, expressando a diferença de estado entre a monocamada molecular e as demais camadas líquidas no substrato;

Para a obtenção das isopermas com o modelo corrigido, STRANG e GRATTAN também arbitraram como condições de referência para a isoperma 1 (*P2/P1*=1) os valores 20ºC e 50%, que correspondem a uma atividade aquosa A_{w1} = 0,5 e obtiveram A_{w2} de referência. Obtiveram em seguida os pares de *T* e *UR* que resultam na mesma permanência e simultaneamente atendem a isoterma de sorção usando o modelo GAB. O processo de cálculo demanda a solução parametrizada da eq. (30), envolvendo a extração da raiz de um polinômio quadrático.

ASSIS e BASTOS (2007) e KRUGER e DINIZ (2010) utilizaram o diagrama de permanências como auxiliar na análise diagnóstica de condições de conservação de acervos. Os dados climáticos das normais climatológicas ou resultantes do monitoramento ambiental foram plotados sobre o diagrama de isopermanências, para avaliar como variam as taxas de permanência ao longo de um determinado período (vide, p. ex., o resultado mostrado na Figura 106). MOREIRA et al. (2004) também citam o método, ao analisar as condições de conservação do acervo da biblioteca da UNICAMP.

Ambos os modelos de Sebera e Michalski fornecem taxas comparativas **instantâneas** de permanência, baseadas nas condições ambientais em um dado momento. Conforme se discute na próxima seção, o conceito de uma taxa de permanência ponderada pelo efeito cumulativo do tempo pode ser aplicado a ambos os modelos.

A.3- Índice de preservação (*IP*) e Índice de preservação considerando o efeito cumulativo do tempo (*IETP*)

Esses dois índices, assim como as métricas de preservação descritas nas seções seguintes foram desenvolvidas pelo *IPI – Image Permanence Institute* (IPI, 2005, 2010, 2013). Na década de 1990, o IPI começou a desenvolver algoritmos computacionais para mensurar os impactos do ambiente de guarda das coleções sobre elas. Daí resultou o trabalho de REILLY et al (2001), originalmente publicado em 1995.

REILLY et al (2001, p. 7) consideram suas ideias uma evolução do método das isopermas proposto por Sebera, na medida em que o *IP* e o *IETP* também levam em consideração o efeito combinado da temperatura e da umidade relativa sobre as condições de conservação, porém as consideram "uma medida geral – que se aplica a todos os materiais orgânicos e não somente ao papel". Essa afirmativa dos autores é, em realidade, exagerada. BANKS (1999) e REILLY et al (2001, p38) comparam os dois métodos, que guardam semelhanças entre si. Em trabalho anterior, REILLY et al (1993) apresentaram as isopermas para filmes de acetato de celulose, em um gráfico de temperatura em função da umidade relativa (Figura 137), e também sob formato de um nomograma circular (*wheel)*.

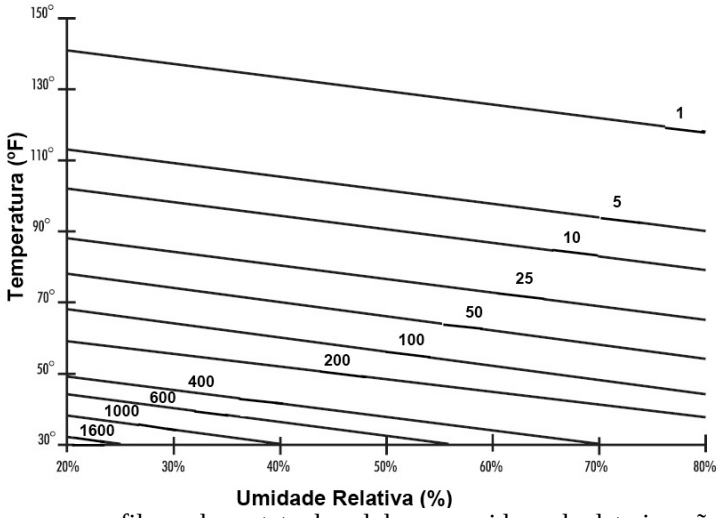


Figura 137 – Isopermas para filmes de acetato de celulose, considerando deterioração por hidrólise ácida (síndrome do vinagre) – tempo previsto (anos) para atingir acidez livre 0,5. Adaptado de: (REILLY, 1993)

McCORMICK-GOODHART (1996) estudou flutuações de temperatura e umidade relativa admissíveis em coleções fotográficas, delimitando as zonas de segurança ambiental mostradas na Figura 138, sobre as quais superpõe as isopermas:

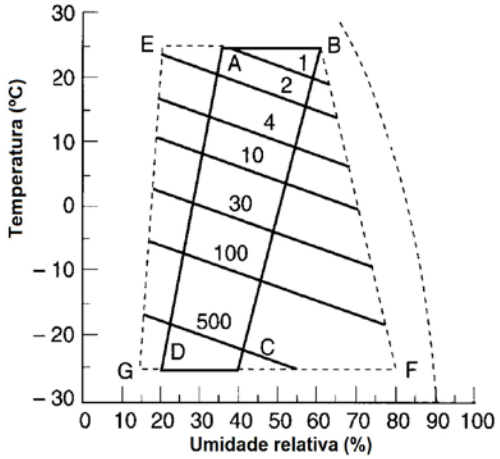


Figura 138 – Zonas de segurança ambiental e isopermas para coleções fotográficas – Estabilidade química (ABCD); Estabilidade química com possíveis deformações mecânicas (BEFG); Fonte: (McCORMICK-GOODHART, 1996).

O modelo para o cálculo do *IP* considerou "a média ligeiramente inferior" (REILLY et al, 2001, p. 36) de uma tabela de energias de ativação de hidrólise de materiais fílmicos com cinquenta e dois valores publicados em fontes diversas, abrangendo materiais distintos, como filmes de acetato e nitrato de celulose, impressão fotográfica colorida, gelatina fotográfica, e papéis fotográficos diversos. **O valor escolhido foi 22Kcal/mol, que é o valor aproximado da energia de ativação para hidrólise ácida de filmes de acetato de celulose** (ADELSTEIN et al, 1997). PADFIELD (2004) utilizou o valor 95,22KJ/mol (22,7Kcal/mol) na equação que propôs para calcular o *IP* (eq. 34).

O *IP* embute um conceito análogo ao de **permanência,** como definido por Sebera (eq. 25). REILLY et al (2001) consideraram ser mais expressivo falar de expectativa de vida em anos, do que em uma taxa de deterioração por ano. Assim, o índice exprime uma estimativa aproximada da expectativa de vida, em anos, de materiais orgânicos **inerentemente instáveis – com expectativa de vida média de 50 anos (*E* média = 22Kcal/mol).** Isso denota uma postura cautelosa dos autores no valor de referência da energia de ativação. O modelo foi concebido considerando essa expectativa de vida média – 50 anos – como valor de referência em situações climáticas "normais" (T=20ºC e UR= 45%). Portanto, **o *IP* indica uma estimativa de quanto tempo um material orgânico demoraria para sofrer a mesma deterioração de 2% ao ano, que um filme de acetato de celulose sofreria em 50 anos, se mantido a 20ºC / 45%.** Os autores alertam (REILLY et al, 2001, p. 39) que os erros inerentes ao modelo são significativos quando envolve expectativas de vida muito longas, de centenas a milhares de anos.

Em função disso, **o índice deve ser utilizado com cuidado e não pode ser aplicado indiscriminadamente a qualquer coleção contendo materiais orgânicos**. Materiais com energia de ativação de hidrólise inferior a 22Kcal/mol tenderão a se deteriorar mais rapidamente do que o índice prevê. Outro aspecto a considerar, conforme demonstra MICHALSKI (2002, p. 70) é que a química da deterioração é invariavelmente complexa. Dependendo do caso em análise, a hidrólise pode não ser o principal processo a ser considerado. Na ausência de umidade predominarão os processos de oxidação, mais lentos que os de hidrólise. E na ausência de ar e umidade pode ocorrer deterioração **térmica.** Via de regra, todos esses processos ocorrem simultaneamente. REILLY et al (2001, p. 14) advertem que é importante considerar todas as outras formas possíveis de deterioração, como por

exemplo, ataques biológicos e poluição. PADFIELD (2007a, p. 158) aponta outras limitações das métricas *IP* e *IETP*, chegando a classifica-las como "idiossincráticas".

Da mesma forma que o método das isopermas, as métricas *IP* e *IETP* permitem quantificar a "qualidade das condições de conservação" das coleções, devendo os índices ser utilizados de forma **relativa, comparativa**, entre condições ambientais distintas, encontradas em diferentes épocas no mesmo espaço (sala ou mobiliário fechado) ou em espaços diferentes.

Segundo REILLY et al (2001, p. 11),

> o *IP* é expresso em anos e fornece uma idéia geral de quanto tempo seria necessário para materiais orgânicos vulneráveis, tais como papéis de baixa qualidade, tornarem-se muito deteriorados, supondo que a temperatura e a *UR* **não fossem variar** a partir do momento da medição. (...) **A definição de 'anos de vida' dos valores de *IP* foi escolhido deliberadamente para refletir o comportamento de materiais de vida relativamente curta. O *IP* não é produzido com a intenção de predizer a vida de qualquer objeto em particular.** Ele é simplesmente uma medida conveniente do efeito das condições ambientais existentes sobre a expectativa global de vida da coleção, utilizando como referência materiais com expectativa de vida mais curta. (REILLY et al, 2001, p. 11, grifos nossos).

O *IP* representa a qualidade de preservação **instantânea**, para um dado momento, em um determinado espaço (sala ou mobiliário fechado) Ele é calculado considerando **uma determinada condição estável, invariável, constante** de temperatura e umidade relativa. Entretanto, mesmo na presença de sistemas ativos[128] de climatização, raramente os ambientes que abrigam coleções apresentam microclimas estáveis. Isso ocorre devido à variação dos diversos fatores que compõem a carga térmica dos ambientes, a começar pelo clima externo e passando, por exemplo, pela ocupação ou pela presença da iluminação artificial. Aliás, é exatamente com base na amplitude de variação típica que a ASHRAE propõe a classificação dos sistemas de climatização, a partir do trabalho de Conrad e Michalski (Figura 8).

REILLY et al (2001, p.14) não apresentaram a fórmula matemática adotada para o cálculo do *IP*, limitando-se a mostrar uma tabela com valores de *IP* calculados para temperatura entre 0 e 33ºC e umidade relativa entre 0 e 95%. Contudo, o algoritmo foi incluído em dois programas disponibilizados[129] gratuitamente pelo IPI: o *Preservation Calculator* e o *Dew Point Calculator*, sendo que este último também é apresentado em uma

[128] A distinção entre sistemas passivos, ativos e híbridos de climatização e discutida na seção 2.4 acima.

[129] https://www.imagepermanenceinstitute.org/resources/calculators (Acesso em 22/08/2012).

versão para internet, sem necessidade de instalação[130]. A ferramenta completa com o algoritmo das métricas de preservação associada a rotinas de gerenciamento ambiental é comercializada pelo IPI sob o nome de *Climate Notebook*[131].

PADFIELD (2004) revisou o modelo *IP* / *IETP* e apresenta a seguinte fórmula, seguindo o princípio de Arrhenius (eq. 26), para descrever a **taxa de deterioração da hidrólise ácida da celulose** e segundo Padfield, ela se adapta muito bem aos dados da tabela apresentada por REILLY et al (2001):

$$\frac{1}{IP_{Padfield}} = r_{Padfield} = UR \cdot 5{,}9 \cdot 10^{12} \cdot e^{\frac{-90300}{R \cdot T}} \quad (32)$$

A energia de ativação utilizada na eq. (32) corresponde a 21,56Kcal/mol.

Ainda segundo PADFIELD (2004) a equação utilizada pelo IPI para o cálculo do *IP* foi:

$$\frac{1}{IP_{IPI}} = r_{IPI} = \frac{365}{e^{\left(\frac{95220-134{,}9 \cdot \mathrm{UR}}{R \cdot T} + 0{,}0284 \cdot UR - 28{,}023\right)}} \quad (33)$$

Em ambas as equações *T* é dada em [ºK] e *UR* é dada em [%]. A energia de ativação de 95.220J/mol (~23Kcal/mol), segundo PADFIELD (2004), é a que melhor se adapta a dados empíricos de deterioração de triacetato de celulose. Padfield ressalta ainda que, como na eq. (33) o primeiro termo de *UR* é somado à energia de ativação, **não há como comparar o valor resultante com outros resultados publicados de energia de ativação.**

Padfield comparou as taxas de deterioração obtidas pelas duas equações anteriores, mostrando que elas são praticamente iguais, com um desvio maior para altas umidades relativas. Mostrou ainda que o desvio é bastante sensível à constante correspondente à energia de ativação. Isso também foi observado nos resultados desta pesquisa (vide Figura 109).

Cabe, portanto destacar que a mesma dificuldade inerente aos modelos de isopermas de Sebera e Michalski no estabelecimento da energia de ativação correta aplica-se também ao cálculo do *IP* e do *IETP*, sendo agravada pela falta de transparência teórica na literatura de

[130] http://www.dpcalc.org/ (Acesso em 22/08/2012).

[131] https://www.imagepermanenceinstitute.org/environmental/climate-notebook (Acesso em 22/08/2012)

referência a esses índices, o que, de certo modo, reforça as críticas feitas a eles por PADFIELD (2004).

Considerando a variabilidade microclimática comum aos ambientes de preservação, é desejável ter uma maneira de calcular um *IP* médio, ao longo de um determinado intervalo de tempo típico (semana, mês, estação do ano, ano). Porém esse ***IP* médio não pode ser calculado como uma média aritmética simples**, pois o(s) período(s) de tempo que a coleção durante os quais as coleções são mantidas sob condições ambientais desfavoráveis à preservação tem um impacto mais significativo sobre a sua expectativa de vida. Estudando a deterioração de materiais fotográficos, McCORMICK-GOODHART (1996) observou que quando a coleção é removida de um ambiente refrigerado, para outro mais quente, com condições desfavoráveis, fora da reserva técnica, sua estabilidade química é de centenas a milhares de vezes menor, dependendo do tempo de permanência naquelas condições. Dados similares são apresentados por REILLY (1993, p.8).

PADFIELD (2004) destaca que as taxas de deterioração instantâneas derivadas de medidas isoladas de temperatura e umidade relativa, bem como os seus recíprocos, sob a forma de taxas de permanência, não são suficientes para os objetivos do gerenciamento ambiental de coleções. Segundo Padfield, uma expectativa de vida calculada com base em um ano de monitoramento horário seria mais adequada para a avaliação da qualidade climática em um determinado ambiente.

Qual seria então a expectativa de vida de uma coleção se ela passasse parte do tempo mantida em um ambiente com boas condições de preservação e parte do tempo em condições desfavoráveis? Em outras palavras, como calcular uma expectativa de vida média em ambientes com microclima variável ou no caso de bens culturais em trânsito entre ambientes de reserva técnica ou entre instituições? Para responder essa questão, REILLY et al (2001) propuseram o ***IETP* - Índice de preservação considerando o efeito cumulativo do tempo.**

O nome original do *IETP* é *TWPI – Time-Weighted Preservation Index*, que numa tradução literal seria “Índice de preservação ponderado pelo tempo”. Na tradução do trabalho de REILLY et al (1995) para o projeto CPBA, José Pedersoli Jr. adotou a nomenclatura “Índice de efeito-tempo para preservação”, cuja sigla foi mantida aqui em função dessa referência ser muito conhecida na área. Porém, ao nos referirmos ao nome completo do índice

preferimos a forma extensa “Índice de preservação considerando o efeito cumulativo do tempo” que reflete mais claramente os conceitos representados por ele.

Para o cálculo do *IETP* é calculada a **média aritmética de todas as taxas de deterioração observadas anteriormente ao intervalo atual de medição. O inverso dessa média corresponde a uma permanência (expectativa de vida) média.** Ou seja, considerando ***n*** IPs obtidos em um procedimento de monitoramento ambiental, com intervalos de tempo iguais, calcula-se uma **média harmônica cumulativa** dos IPs obtidos até o intervalo ***n***. Utilizando-se a eq. (32) ou a eq. (33), com ***n*** medições de temperatura e umidade relativa em intervalos de tempo iguais, o *IETP* no momento da medição ***n,*** representando a média harmônica cumulativa de todos os (***n-1)*** IPs anteriores, é dado por

$$IETP_n = \frac{n \cdot IETP_{n-1} \cdot IP_n}{IP_{n-1} + IETP_{n-1}} \tag{34}$$

REILLY et al (2001, p. 17) sugerem que uma tabela comparativa com os valores de *IETP* semanais, mensais ou anuais para diferentes ambientes ou um gráfico temporal (vide Figura 107) desta média são muito mais informativos do que tabelas brutas ou gráficos de temperatura e umidade relativa resultantes de um monitoramento ambiental. Os autores sugerem ainda o uso de **médias móveis** de temperatura e umidade relativa, para o cálculo do *IETP*, devendo o período para o cálculo da média móvel ser escolhido em função do **tempo de resposta típico** da coleção às flutuações ambientais (vide a próxima seção).

Esse tempo é definido por MARTENS (2012, p. 98) como sendo o **tempo necessário para atingir 95% do valor de equilíbrio final**. Em sua tese ele propõe a utilização de aproximações matemáticas de primeira ordem para calcular esse tempo. Os programas do IPI utilizam médias móveis de 24 horas para a temperatura e 30 dias para a umidade relativa. A norma EN 15757 (UNI, 2010) preconiza o uso de médias móveis centrais de 30 dias, 15 anteriores e 15 posteriores a cada registro horário.

PADFIELD (2004) adverte quanto a erros que podem passar despercebidos no cálculo do *IETP* se tal cálculo não for feito criteriosamente, como por exemplo, as datas de início e fim da série: se forem incluídos dois períodos de verão e somente um de inverno, o *IETP* tende a ser menor do que se forem incluídos dois verões e dois invernos.

KRUGER E DINIZ (2010) analisaram o desempenho de três diferentes arquivos, em Curitiba, Belo horizonte e Rio de Janeiro, tendo como referência o *IETP*, a norma ISO 7730 (ISO, 2005) e o diagrama bioclimático de Givoni (vide Apêndice B). Foram avaliados arquivos situados em condições climáticas diversas, utilizando medições em campo de temperatura e umidade relativa, com metodologia semelhante a que é adotada neste trabalho. No caso de Curitiba, os autores detectaram que o clima externo apresentava melhor desempenho que o interno, em termos do *IETP*. Isso sugere que sugere que um projeto adequado de um sistema de ventilação para aquela cidade poderia tirar vantagem das condições climáticas externas, para prover condições de conforto ambiental aos usuários e condições ambientais adequadas para a conservação das coleções, sem necessitar do uso de estratégias ativas de climatização.

A.3.1- Aplicação do conceito do IETP aos modelos de Sebera e Michalski

Ambos os modelos de Sebera e Michalski, assim como o *IP*, fornecem valores ***instantâneos*** de taxas de permanência calculadas com base nas condições ambientais.

Os conceitos discutidos acima para o *IETP* podem ser aplicados aos modelos de Sebera e Michalski definindo **taxas de permanência ponderadas pelo efeito cumulativo do tempo**, aqui denominadas respectivamente ***Isoperma-T*** e ***LM-T,*** calculadas com a mesma metodologia do *IETP* explicada acima, por meio de **médias harmônicas cumulativas**, correspondentes ao inverso das médias aritméticas cumulativas das taxas de deterioração observadas anteriormente a cada intervalo de medição.

A.4- Conteúdo de umidade nas condições de equilíbrio (EMC) e mudança dimensional (DC)

Além das métricas *IP* e *IETP*, o IPI utiliza, em seus programas de gerenciamento ambiental, duas métricas de preservação relacionadas ao risco de danos físico-mecânicos devidos a flutuações na temperatura e, principalmente, na umidade relativa: *EMC* e DC.

Cabe alertar que na metodologia do IPI (2012), estas métricas são calculadas considerando o **comportamento "típico" de madeiras norte-americanas**, e o seu cálculo incorpora simplificações e suposições, cuja compreensão exige uma leitura bastante atenta das

referências bibliográficas[132]. Portanto, não obstante o IPI (2013) considere a aplicação desta e de outras métricas para **todos** os materiais orgânicos higroscópicos, citando exemplos como papel, têxteis, madeira, couro, veludo, etc., com a concordância de GUTHS (s.d., p. 2), é necessário usar do **bom senso para reconhecer que esse uso tem restrições**.

O **teor de umidade em condições em condições de equilíbrio** (*EMC – Equilibrium Moisture Content)* de um material é a **razão entre a massa total de água contida em uma amostra desse material e a massa da amostra seca** (ASHRAE, 2009, p.36.30). Diversos estudos têm investigado a difusão e movimentação da água na estrutura microporosa dos materiais[133].

A capacidade de tamponamento de umidade relativa dos materiais (*buffering)* depende das propriedades de adsorção e de permeabilidade ao vapor nas camadas superficiais, as quais, por sua vez, dependem da umidade relativa do ar (KORJENIC e BEDNAR, 2012; RODE et al., 2004, 2005). Outros fatores como a espessura das camadas e velocidade do ar sobre a superfície também influenciam nas trocas de vapor. A camada pictórica numa pintura ou numa escultura policromada atua como uma barreira de vapor entre o suporte e o ar. Métodos para determinação da capacidade de tamponamento de umidade relativa dos materiais são discutidos por BERNARDI (2008, seção 4.1), OSANYINTOLA e SIMONSON (2006). RODE (2005) e SALONVAARA et al. (2004).

Em 2010, o Instituto de Catálise e Química de Superfícies da Academia Polonesa de Ciências promoveu, em Cracóvia, o seminário *Establishing standards for allowable microclimatic variations for polychrome wood,* e disponibilizando referências que podem ser consideradas como estado da arte atual da pesquisa neste campo específico[134].

---

[132] (CARLL e WIEDENHOEFT, 2009; EUA, 2010; IPI, 2005 e 2012; NISHIMURA, s.d.; RODE, 2004, 2005; SIMPSON, 1998).

[133] (ABAHRI, K. et al, 2011; BERNARDI, 2008, seções 3.5 e 4.1; BOOMBERG e SHIRTLIFFE, 2009; CAMUFFO, 1998, cap. 5; DELGADO et al., 2011; JANSSEN e CHRISTENSEN, s.d.; JANSSEN e SCHEFFLER, 2010; KAROGLOU et al., 2005, 2007; KUMARAN, 2009; LÜ, 2002; MENDES, 1997; MENDES et al., 1999, 2003, 2005; NEALE et al., 2007; QIN, 2009; REMKI et al., 2012; SCHEFFLER e PLAGGE, 2010; SERAFIM, 2012; STEEMAN, 2009; STEEMAN et al., 2009; STESKENS et al., 2010; TIME, 1998; WYRWAŁ e MARYNOWICZ, 2002; YOUNSI et al., 2006; ZITEK e VYHLÍDAL, 2009).

[134] http://www.cyf-kr.edu.pl/~ncbratas/oslo/ (Acesso em 22/02/2013).

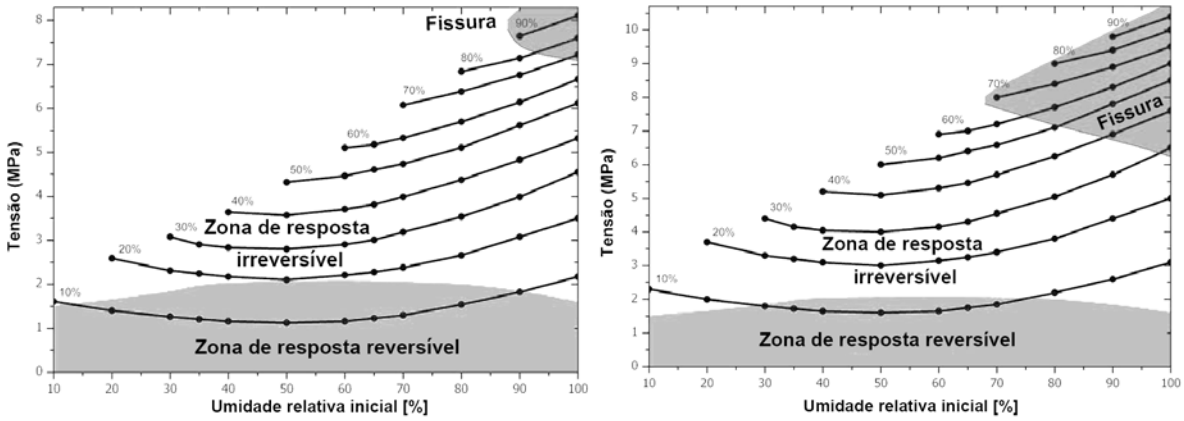


Figura 139 – Simulação de tensões induzidas em madeira (tília – *lime wood)* por flutuações de *UR* (esquerda - ressecamento gradual durante 24h; direita – ressecamento repentino), em função da umidade relativa inicial. Fontes: (JAKIELA apud MARTENS, 2012, p. 57; JAKIELA et al, 2008). A área hachurada no canto superior direito corresponde a condições que levam a deformações irreversíveis. As menores tensões resultantes correspondem a uma umidade inicial de 50%.

Para cada material, há um determinado *EMC* que corresponde à máxima estabilidade química, física e biológica. Quando o *EMC* é baixo demais ou alto demais, a umidade do ar incorreta pode ser um risco, devido às mudanças dimensionais – expansões ou contrações - que podem ocorrer nos objetos, ocasionando **fissuras**, ou **deformações irreversíveis,** devidas às **tensões** envolvidas no processo (Figura 139). Em longo prazo, essas tensões podem causar danos cumulativos aos objetos.

ERHARDT et al. (1996, p.905) apontam que o cálculo de flutuações admissíveis para artefatos de madeira com base nas isotermas de sorção e limites de deformações elásticas resultam em faixas extremamente restritivas. Isso foi confirmado nos resultados obtidos nesta pesquisa.

MECKLENBURG (2007a, 2007b, 2010) alerta especialmente quanto ao risco de fissuração de camadas pictóricas contendo ligantes à base de óleo, alquídicos ou acrílicos submetidos a baixas temperaturas e umidades relativas, abaixo de sua temperatura de transição vítrea. MECKLENBURG (2010) enfatiza ainda que além das mudanças dimensionais causadas por flutuações na temperatura e na umidade relativa, deve-se considerar as curvas de resposta de ruptura em função da tensão (as quais dependem da técnica de execução, principalmente quanto à fixação no suporte) e isotermas de adsorção / dessorção de cada material estudado. Ele demonstra como os três fatores podem ser interpretados simultaneamente através de gráficos tridimensionais e também como as

simulações computacionais que utilizam métodos de elementos finitos podem ser utilizadas para estudar os problemas.

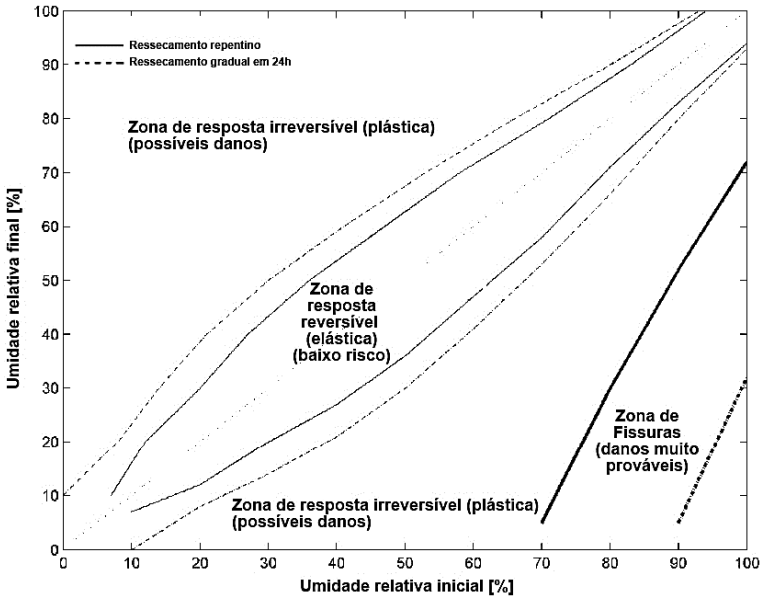


Figura 140 – Resposta de madeira (tília – *lime wood)* a flutuações de umidade relativa. (Zonas da Figura 139 plotadas em função da umidade relativa inicial e final). Fonte: (MARTENS, 2012, p. 58).

MARTENS (2012, p. 105) associou as zonas mostradas na Figura 139 ao risco de fissuração. Ele fez o mesmo com isotermas de adsorção/dessorção obtidas experimentalmente e publicadas por MECKLENBURG et al. (1998), de aspecto similar ao da Figura 140. Há maior probabilidade de danos físico-mecânicos em objetos que possuem partes rigidamente presas, sem liberdade para se movimentar, em função das flutuações ambientais. O mesmo ocorre com objetos heterogêneos, compostos por materiais com *EMC* diferentes (CAMUFFO e PAGAN, 2004; CAMUFFO et al., 2002, 2004b; LUKOMSKI, 2010, 2012; MARTENS, 2012; MICHALSKI, 2007).

Como o *EMC* é dependente da umidade relativa, o risco de danos é maior quando ocorrem grandes flutuações ambientais, principalmente se as flutuações de umidade superarem a maior flutuação já “provada” pelo material. Podem ocorrer fissuras devidas a pequenas flutuações, se alguma intervenção de restauração tiver tornado os materiais mais vulneráveis.

LUKOMSKI (2012) investigou a relação entre as flutuações de umidade relativa e as deformações provocadas em painéis de madeira pintados com uma camada de gesso,

verificando ainda o número de ciclos de flutuação necessários para ocasionar fissuras na camada pictórica, para cada nível de tensão:

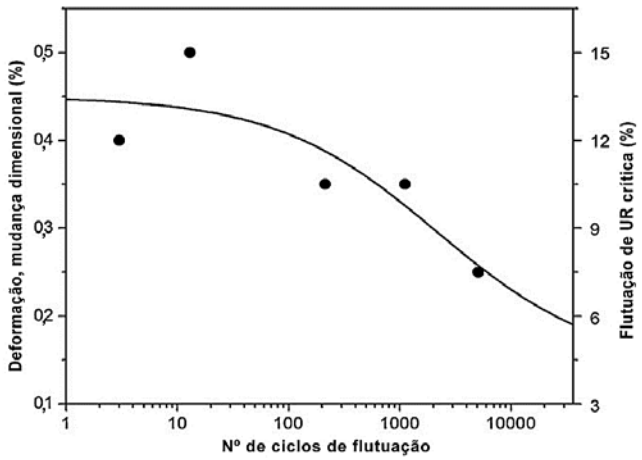


Figura 141 – Relação entre mudança dimensional, amplitude de flutuação e número de ciclos de flutuação de *UR* para camada de 0,5mm de gesso sobre madeira tília (*lime wood)* esp. 10mm. *UR* inicial: 50%. Adaptado de BRATASZ et al. (2011), LUKOMSKI (2012).

Verifica-se que quanto menor a amplitude de flutuação da umidade relativa, menor a mudança dimensional provocada e maior o número de ciclos de flutuação necessários para provocar fissuração. É necessário considerar também o **tempo de duração dos ciclos de flutuações** e as proporções entre as dimensões dos objetos. **Ciclos lentos permitem que os objetos respondam como um todo, enquanto que ciclos curtos atuam mais diretamente na superfície dos objetos e não são notados pelo interior dos mesmos** (Figura 142). Flutuações com ciclos menores do que dez horas não são relevantes para a maioria dos objetos. Folhas de papel soltas apresentam tempos de resposta que vão de algumas horas até cerca de três dias, enquanto um livro colocado em uma caixa pode ter um tempo de resposta de seis a nove meses. Pinturas sobre painéis de madeira não respondem significativamente a flutuações com tempo menor que 24 horas e apresentam tempos de resposta típicos entre duas e doze semanas. Em relação à forma, quanto mais a proporção largura:altura:comprimento se desviar do valor 1:1:1, menor será o tempo de resposta e maior a chance de danos físico-mecânicos[135].

[135] BRATASZ s.d., 2013a; BRATASZ e RACHWAL, 2010; BRATASZ et al., 2005, 2007a, 2007b, 2011; CAMUFFO e PAGAN, 2004; BOU SAID, 2003; DUBOIS et al., s.d.; DIONISI VICI et al., 2006, p. 42; LUKOMSKI, 2012; MARTENS, 2012, p. 54, 60, 100; MICHALSKI, 1993, 1994, 1996, 2000, 2002, 2007, 2010; MICHALSKI apud GCI, 2007, p. 34; RACHWAL et al., 2012a, 2012b).

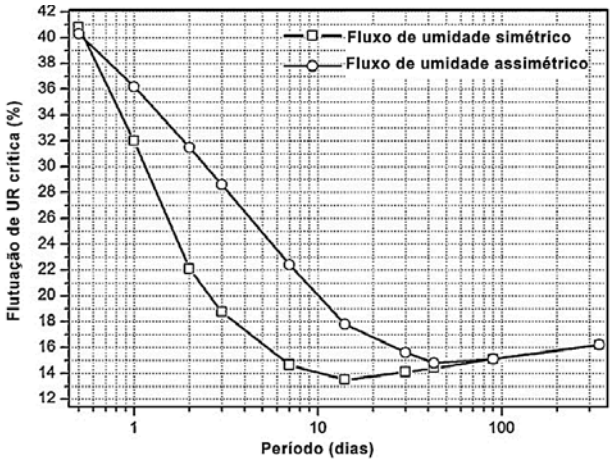


Figura 142 – Amplitude de flutuação crítica para fissuração como função da duração do ciclo de flutuação, para painel de madeira tília *(lime wood)* espessura 10mm pintado com gesso esp. 0,5mm. *UR* inicial: 50%, *T*: 20ºC. Adaptado de LUKOMSKI (2012).

Segundo CORREA (2003, p. 51), flutuações sazonais de temperatura e umidade relativa são lentas o suficiente para permitir o relaxamento das tensões provocadas na maioria dos objetos, sendo que os esforços solicitantes observados durante a retração ou dilatação não são significativos, se o processo durar mais que quatro meses, sob temperaturas moderadas.

O manual de fundamentos da ASHRAE (2007, p. 21.5) fornece nomogramas (Figura 143) para estimativa do tempo de resposta típico de painéis de madeira em função de sua espessura e cobertura por base de preparação e camadas pictóricas. Condições típicas resultam em tempos de resposta de cerca de 30 dias. MARTENS (2012, p. 100) lembra que em função da escala logarítmica do nomograma, o tempo para 95% da resposta é obtido multiplicando o valor indicado por um fator de 4,32 (ln 0,05 / ln 0,5).

A norma UNI EN15157 (UNI, 2010) considera seguras umidades relativas entre o 7º. e o 93º. percentis de umidades já provadas pelo material (UNI, 2010, p. 15). Para determinar a **umidade "provada"** e limites seguros de flutuação, podem-se utilizar **histogramas de ciclos de flutuação** de umidade relativa bem como **gráficos de dispersão** comparando as flutuações na temperatura com as flutuações de umidade relativa. Essa metodologia foi aplicada aos resultados apresentados nesta pesquisa (vide Capítulo 5). A relação entre as isotermas de

sorção e as forças físicas e mudanças dimensionais geradas nos objetos pelas flutuações ambientais tem sido investigada por diversos autores[136].

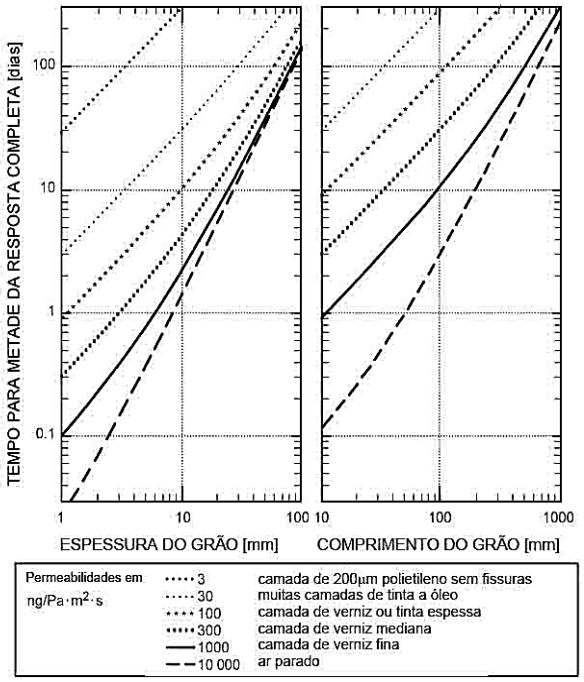


Figura 143 – Nomogramas para estimativa do tempo de resposta típico de painéis de madeira. Adaptado de ASHRAE (2007, p. 21.5). Calculado para madeira "típica", temperatura ambiente, 25% < *UR* < 75%. Usar o menor tempo obtido dos dois nomogramas

MARTENS (2012, p.101) comenta que as camadas de **policromia normalmente executadas sobre esculturas de madeira têm um tempo de resposta curto em função de sua espessura**. A Figura 143 indica cerca de 0,1 dias para uma camada de verniz fina, e 0,3 dias para uma camada de verniz mediana, o que corresponde a tempos de resposta entre aproximadamente 10 horas e 1 dia. DIONISI-VICI et al. (2006) estudaram os tempos de resposta de painéis não revestidos de álamo *(poplar wood)* e verificaram que o pico de resposta ocorre entre 10 e 15 dias, resultado compatível com o nomograma da Figura 143. Em sua análise de riscos, MARTENS (2012, p. 101) adotou o tempo de 15 dias para esculturas de madeira.

[136] (BRATASZ, s.d., 2013a; BRATASZ et al., 2007a, 2011; BRATASZ e RACHWAL, 2010; BRATASZ e RACHWAŁ, 2010; CAMUFFO e PAGAN, 2004; ERHARDT e MECKLENBURG, 1994, 1995; GARRECHT. et al., 2010; KOZŁOWSKI, 2010; LUKOMSKI, 2010, 2012; MECKLENBURG, 2007a, 2007b; MECKLENBURG et al., 1998; MECKLENBURG e TUMOSA, 1999, MICHALSKI, 2010, OLSTAD, 2010; RACHWAL et al., 2012a, 2012b; UZIELLI, 2010).

CAMUFFO e PAGAN (2004) e CAMUFFO et al. (2002, 2004b) afirmam que **a moda (faixa de valores com maior frequência) identificada nos histogramas representa o ciclo de flutuação mais frequente, ao qual os objetos estão adaptados**, inclusive através da ocorrência de fissuras. Por outro lado, as faixas de valores menos frequentes indicam "zonas de perigo" em que os riscos de danos físico-mecânicos são maiores.

De acordo com CAMUFFO e PAGAN (2004) e CAMUFFO et al. (2002, 2004b), **identificada uma moda com valor M, ciclos de cerca de até 2M ainda serão admissíveis**, mas inspiram atenção por serem menos frequentes. Eles podem causar a continuidade de abertura de fissuras existentes e acumular fadigas que podem causar novas fissuras. Ciclos diários maiores que o dobro da moda são os responsáveis pelas maiores fissuras existentes e muito provavelmente provocarão novas fissuras.

BICHLMAIR et al. (2013) e BRATASZ et al. (2007a) discutem o uso do critério da norma UNI EN15157 (UNI, 2010) como base para o estabelecimento de limites de segurança para as flutuações de umidade relativa. Inicialmente os autores interpretaram o critério de forma exclusiva, propondo adotar o intervalo entre o 8º. e o 92º. percentis, ou seja, basear a faixa "segura" em 84% das ocorrências das flutuações no passado, excluindo 16% das maiores flutuações. Posteriormente, KOZŁOWSKI (2010) adotou um critério inclusivo, corrigindo os percentis propostos para 86% e 14%, respectivamente. Estatisticamente, isso significa excluir cerca de um desvio padrão em uma distribuição de frequência acumulada das flutuações. KOZŁOWSKI (2010) aponta ainda que a adoção de limites de segurança mais estreitos que 10% do ciclo sazonal (média móvel central de 30 dias, 15 anteriores e 15 posteriores) seria desnecessariamente restritivo.

O Laboratório de Produtos Florestais do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos publicou (JOHNSON et al, 1998; EUA, 2010, p. 4-1) equações[137] para determinar o *EMC* "típico" de uma amostra de madeira norte-americana, a partir de dados de temperatura e umidade relativa:

$$EMC = \frac{1800}{W*} \cdot \left[\frac{K_3 \cdot UR}{1 - K_3 \cdot UR} + \frac{(K_4 \cdot K_3 \cdot UR) + (2K_4 \cdot K_5 \cdot {K_3}^2 \cdot UR^2)}{1 + (K_4 \cdot K_3 \cdot UR) + (K_4 \cdot K_5 \cdot {K_3}^2 \cdot UR^2)} \right] \quad (35)$$

[137] Calculadores automatizados de EMC em função de T e UR podem ser encontrados no programa *DewPoint Calculator* do IPI e também em http://www.woodworkerssource.com/moisture.php (Acesso em 24/08/2012).

Onde a *UR* e dada em decimais [%/100] e W^*, K_3, K_4 e K_5 são coeficientes calculados como

$$W^* = 349 + 1{,}29T + 0{,}0135T^2 \quad (36)$$

$$K_3 = 0{,}805 + 0{,}000736T + 0{,}00000273T^2 \quad (37)$$

$$K_4 = 6{,}27 - 0{,}00938T - 0{,}000303T^2 \quad (38)$$

$$K_5 = 1{,}91 - 0{,}0607T - 0{,}000293T^2 \quad (39)$$

Onde *T* é dada em [ºC]. Na eq. (35), o primeiro termo representa a fração de água livre dissolvida, e os demais termos as frações de água presente como hidratos (ELEOTÉRIO et al, 1998). ZÍTEK e VYHLÍDAL (2009) apontam que as equações acima foram desenvolvidas para uso com temperaturas mais altas que a faixa a que os bens culturais normalmente estão sujeitos.

OSANYINTOLA e SIMONSON (2006) determinaram experimentalmente a isoterma de sorção para a madeira de abeto *(spruce plywwod)*, apontando o seguinte polinômio como representativo da curva:

$$EMC = \frac{a + c \cdot UR + e \cdot UR^2}{1 + b \cdot UR + d \cdot UR^2 + f \cdot UR^3} \quad (40)$$

Onde a= 0,00010147; b = 0,2339; c = 0,06754; d = -2,3603; e=-0,06574; f = 1,1329, e a *UR* e dada em decimais [% / 100].

BRATASZ (s.d., 2013a), BRATASZ et al. (2007a, 2011), BRATASZ e RACHWAL (2010) e RACHWAL et al. (2012a, 2012b) estudaram numericamente o comportamento, perante flutuações de umidade relativa e temperatura, de camadas pictóricas sobre painéis de madeira. Eles utilizaram a seguinte expressão para a isoterma de sorção, baseada no modelo GAB[138]:

$$EMC = \frac{M_0 \cdot C \cdot K \cdot UR}{(1 - K \cdot UR) \cdot (1 + (C - 1) \cdot K \cdot UR)} \quad (41)$$

Onde M_0, *UR*, *C*, *e K* são definidos conforme a eq. (30).

[138] Vide nota 127 acima.

A Figura 144 apresenta curvas de *DC* para várias espécies de madeira, em função de *UR*, destacando em vermelho a da tília (*lime wood)* considerada por BRATASZ e RACHWAL (2010) como madeira “típica’:

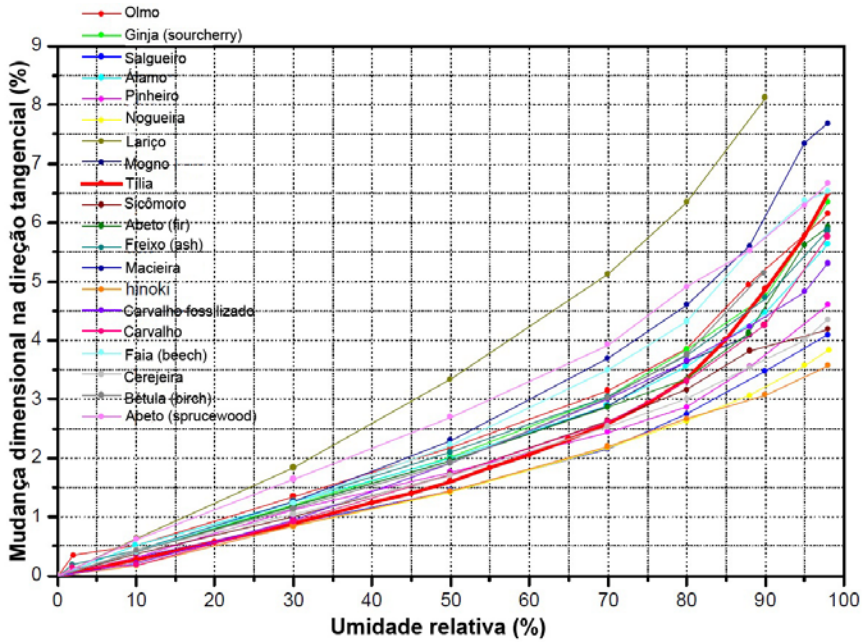


Figura 144 – Mudança dimensional tangencial em função de UR, para madeiras diversas. Destacada em vermelho a curva da tília (*lime wood)* Fonte: (BRATASZ e RACHWAL, 2010).

DIONISI-VICI et al. (2006) citam a seguinte expressão empírica para o cálculo do *EMC* “típico” da madeira, proposta por Giordano:

$$EMC = 100 - [\ -0{,}0991 \tanh(-10{,}0529\ UR + 0{,}0034\ T + 9{,}9498) + 16{,}0049 \tanh(0{,}5071\ UR - 0{,}0014\ T - 2{,}8132) + 16{,}0152] \quad (42)$$

BERNARDI (2008, p. 85) também destaca que o modelo de Giordano foi construído particularmente para madeira e afirma que seguindo esse modelo, o *EMC* poderia ser, em média, para temperaturas “normais” e *UR* entre 30 e 80%, calculado aproximadamente como

$$EMC = UR / 5 \quad (43)$$

BERNARDI (2008, p. 86) apresenta ainda o modelo de Henderson para o cálculo de *EMC*:

$$EMC = K_6 \cdot \frac{(-\ln(1-UR))}{K_7 \cdot (T+K_8)} \quad (44)$$

Onde K_6, K_7 e K_8 são coeficientes específicos para cada material. Para madeira, seus valores são aproximadamente K_6 =0,667, K_7 = 0,247ºC^{-1} e K_8 = 95,83ºC.

BRATASZ (2013a) compara as isotermas de sorção do modelo de Giordano com o de Simpson e TenWolde e com isotermas utilizando o modelo GAB (vide nota 127).

Para camadas de preparação em gesso-cola, utilizada na pintura sobre painéis de madeira, RACHWAL et al (2012b) propõem o seguinte polinômio como representativo da isoterma:

$$EMC_{(gesso)} = 6649 - 102{,}43 * UR + 1{,}8 * UR^2 - 0{,}018 * UR^3 \quad (45)$$

O programa *Energy Plus* © utiliza, opcionalmente, no algoritmo de solução do balanço de energia, o modelo *EMPD - Effective Moisture Penetration Depth* (AFONSO, 2011; KARAGIOZIS e GU, 2004; MENDES, 1997; WOODS et al., 2013), que modela o *EMC* por meio da expressão

$$EMC = a \,.\, UR^b + c \,.\, UR^d \quad (46)$$

Onde a *UR* é dada em decimais, e *a, b, c* e *d* são coeficientes específicos da superfície dos materiais. AFONSO (2011) e STEEMAN (2009) comparam o modelo EMPD com outros modelos na simulação do comportamento higroscópico de materiais utilizados em bens culturais móveis.

BOU SAID (2003, p. 45) e CHASSAGNE et al. (2005, p. 214) propõem a seguinte equação para o cálculo da umidade relativa de equilíbrio da madeira, baseada em (AVRAMIDIS, 1989):

$$UR_{eq} = 0.01 \left[\frac{-T \ln(1 - UR/100)}{0.13(1 - T/647.1)^{-6.46}} \right]^{\frac{1}{110 \cdot T^{-0.75}}} \quad (47)$$

Onde *T* é a temperatura absoluta, dada em [K].

ROSADO (2004) estudou as alterações de natureza mecânica ocorridas em esculturas em madeira policromada como função da flutuação da umidade relativa do ambiente. Rosado obteve experimentalmente isotermas de sorção para o cedro nu e recoberto por diferentes camadas de revestimento, e comparou os resultados com isotermas de sorção para outras madeiras disponíveis na literatura. Rosado discute as limitações da eq. (35) e a estimativa do

EMC para madeiras em geral, preconizada pela norma NBR 7190 para o projeto de estruturas de madeira (ABNT, 1997). Rosado aponta, citando Uzelli (p.79), que no intervalo de *EMC* entre 30 e 32% podem ocorrer deformações plásticas de empolamento por adsorção, uma vez que a maioria das madeiras atinge a saturação nessa faixa. Rosado propôs para as esculturas em cedro uma zona de segurança mecânica, em termos de *UR*, de 45 a 65% (p. 116).

Cabe destacar, com relação às referências citadas neste apêndice, a inclusão de parâmetros baseados no comportamento físico-mecânico de madeiras "tipicamente" utilizadas em esculturas policromadas, que pode apresentar diferenças em relação ao comportamento físico-mecânico cedro utilizado nas esculturas abrigadas na Capela da Ceia.

O comportamento e as mudanças dimensionais da madeira de órgãos em igrejas monumentais, em função de sistemas de aquecimento artificial foram investigados por NEUHAUS e SCHELLEN (2007, 2010); SCHELLEN (2002); SCHELLEN e VAN SHIJNDEL (2007, 2011); VAN SCHIJNDEL et al. (2009).

Já os trabalhos de BRATASZ (s.d., 2013a), BRATASZ et al. (2007a, 2011), BRATASZ e RACHWAL (2010) e RACHWAL et al. (2012a, 2012b) e JAKIELA et al. (2008) utilizam simulações numéricas através de métodos de elementos finitos para estudar o comportamento de camadas pictóricas sobre suportes de madeira, perante flutuações climáticas. Seus resultados incluem a determinação de zonas de risco de fissuração em relação às flutuações.

Conforme sugere NISHIMURA (s.d.), a mudança dimensional DC pode ser calculada utilizando a seguinte equação para o cálculo do encolhimento da madeira, que aproxima uma isoterma "típica" de dessorção na direção tangencial (paralela às fibras), apresentada por EUA (2010, p. 4-7) e GORMAN (1998):

$$S_{EMC} = S_0 \left(1 - \frac{EMC}{EMC_s}\right) \tag{48}$$

Onde

S_{EMC} é o encolhimento tangencial típico da madeira, em função do *EMC* calculado pela eq. (35), [%];

S_0 é o encolhimento tangencial da madeira seca [%];

EMC_s é o teor de umidade nas condições de saturação, em média fica em torno de 30% (EUA, 2010, p.4-7).

Inspecionando-se a isoterma típica de dessorção mostrada na Figura 145, verifica-se que o S_0 típico é de 7%. Com essas suposições, a eq. (48) pode ser aproximada por uma relação linear (CAMUFFO, 1998, p. 63; SCHELLEN, 2002, p. 3-63) e reescrita como

$$S_{EMC} = 7 - 0{,}233 \cdot EMC \tag{49}$$

Representada na reta vermelha destacada na Figura 145:

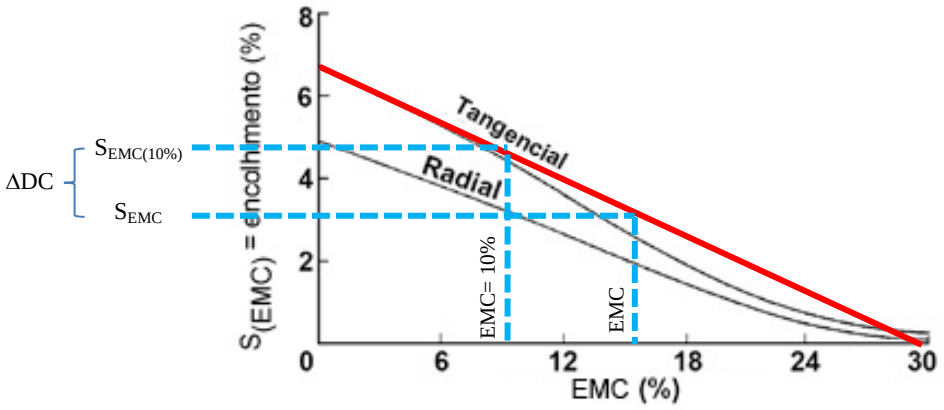


Figura 145 – Isotermas típicas de dessorção de madeira, em função do *EMC*. A reta vermelha representa a aproximação linear descrita pela eq. (49). Fontes: (CARLL e WIEDENHOEFT, 2009, p. 65; EUA, 2010; RACHWAL et al., 2012a, p. 370).

PADFIELD (2005, p. 9) relaciona as isotermas mostradas na Figura 145 com a umidade relativa de equilíbrio, em função do *EMC*:

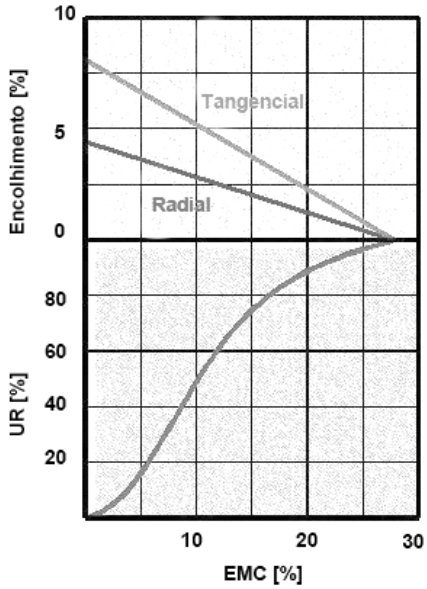


Figura 146 – Isotermas típicas de dessorção de madeira, em função do *EMC* e da *UR*.
Fonte: (PADFIELD, 2005, p. 9).

Os coeficientes angulares obtidos em laboratório por SCHELLEN (2002, P. 3-63) para a Eq.(49) são ligeiramente diferentes:

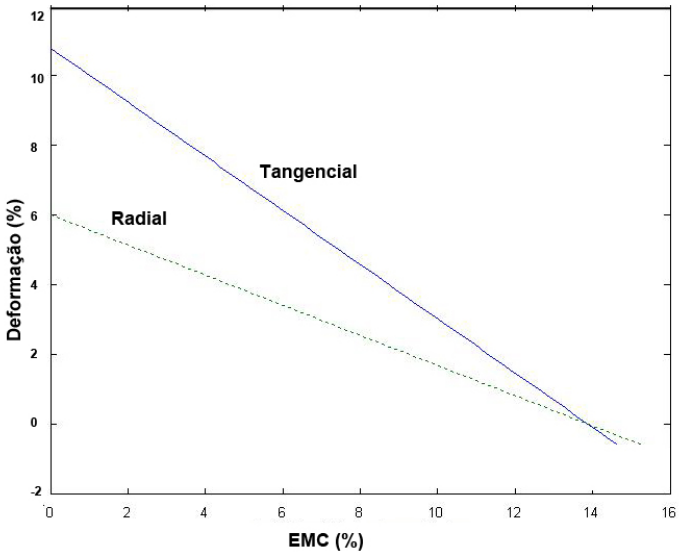


Figura 147 – Isotermas típicas de dessorção de madeira. Fonte: (SCHELLEN, 2002, p. 3-63).

Segundo se pode deduzir de NISHIMURA (s.d.), a métrica *DC* é calculada tendo como referência o encolhimento correspondente a *EMC*=10% (S_0 = 4,666%, pela eq. 49). Reescrevendo a Eq.(49):

$$\Delta DC = \left|S_{EMC} - S_{EMC(10\%)}\right| = \left|(2{,}333 - 0{,}233 \cdot EMC)\right| \quad (50)$$

O valor *ΔDC* é registrado para cada par de temperatura e umidade relativa medido no monitoramento ambiental e a métrica de mudança dimensional é finalmente obtida como

$$DC = max\Delta DC - min\Delta DC \quad (51)$$

Para interpretação do *EMC* e *DC* como métricas de preservação, é necessário, a partir do monitoramento de temperatura e umidade relativa, calcular a *DC* e compará-la simultaneamente com os valores mínimo (*minEMC*) e máximo (*maxEMC*) absolutos, conforme limites mostrados no Quadro 5.

NISHIMURA (s.d., p. 10) aponta que as métricas descritas acima são baseadas na amplitude entre a máxima e mínima mudança dimensional observada ao longo do período de monitoramento. Assim consideradas, elas estão relacionadas ao conceito de umidade "provada" pelos materiais, discutido acima. De acordo com Nishimura, a idéia é ter um índice que indique risco potencial de dano físico-mecânico em objetos compostos de materiais

orgânicos, em função dos objetos estarem muito úmidos, muito secos ou sofrerem demasiada mudança dimensional. Contudo, como Nishimura também aponta, a *taxa* de mudança não foi incorporada ao índice, sendo que esta última estaria relacionada com o tempo de resposta de cada material às flutuações ambientais. Para tentar suprir essa deficiência o IPI propõe a utilização de médias móveis de *T* e *UR* no cálculo de *DC*. Os resultados obtidos nesta pesquisa indicaram a necessidade de propor modificações na interpretação destas métricas (vide seção 5.4.2.4).

A.5- Fator de risco de mofo (*MRF*)

O risco de infestação biológica por micro-organismos em coleções é um problema muito comum, principalmente naquelas constituídas de materiais orgânicos. As espécies mais comuns de fungos encontrados em acervos são dos gêneros *Aspergillus*, *Penicillium*, e *Cladosporium* (STERFLINGER, 2010). Os fatores determinantes do crescimento do mofo são a temperatura, a umidade, o tipo de substrato e o tempo de exposição. Quanto mais higroscópico o substrato, menor a umidade relativa crítica para o crescimento do mofo (BLOCK, 1953). CLARKE et al. (1996) fazem uma revisão detalhada sobre o crescimento de mofo em materiais de construção. SCOTT (2001) analisa os diversos fatores que influenciam na germinação, a partir de dados experimentais.

Os temas estudados neste trabalho guardam uma relação fundamental com este agente de deterioração, na medida em que as condições de ventilação são determinantes não só da temperatura e umidade ao nível do microclima, mas também das condições de deposição de particulados e micro-organismos que são carreados pelo ar em movimento (BERNARDI, 2008, seções 3.4 e 4.3; CAMUFFO, 1998, cap. 8). Quanto menor a taxa de renovação do ar em um microclima, maior a chance de eventuais esporos se depositarem sobre os objetos e aí permanecerem até a sua germinação (VALENTIN, 2007). KUNZEL (apud SEDLBAUER, 2001, p. 52) afirma que a ventilação é o método mais eficaz para remover a umidade de uma sala. VALENTIN (2007) aponta que a ventilação natural é o meio mais fácil e seguro de controlar de controlar a taxa de atividade microbiana, por meio do controle e estabilização das variáveis ambientais. O autor apresenta resultados demonstrando a eficiência de um sistema de ventilação na redução da contaminação ambiental por fungos e bactérias. A Tabela 24 sumariza suas recomendações. HARTMANN (apud SEDLBAUER, 2001, p. 52) considera

taxas de renovação da ordem de 0,15 a 0,7h^{-1} como suficientes para prevenir o crescimento de mofo. UCCI et al (2004, p. 2) consideram 0,5h^{-1} como o mínimo necessário[139]. MAEKAWA (2007b, p. 3) aponta uma taxa de 0,48 a 1,2h^{-1}. Obviamente, fatores antrópicos como as rotinas de inspeção e limpeza também são determinantes.

Tabela 24– Condições necessárias p/ diminuir contaminação microbiana ambiental. Fonte: (VALENTIN, 2007).

Tipo de amostra e espaço analisado	**Taxa de ventilação (ren/h)**	***UR* (%)**	***T* (ºC)**	**Tempo de exposição**	**Volume do espaço (m^3)**
Amostra de ar em vitrine experimental	0,48 – 1,2	55-85	20-24	25h	0,5
Amostras de papel em vitrine experimental	0,48 – 1,2	55-85	20-24	25h	0,5
Amostra de ar em sala experimental	0,2 – 1,5	55-65	24-26	24h	3
Amostra de ar em sala experimental	0,2 – 1,5	65-75	24-26	48h	3
Amostra de ar em sala experimental	0,2	65-75	18-20	96h	3
Amostras de papel em vitrine experimental	0,4	55-60	20-22	48h	3
Amostra de ar em reserva técnica de arquivo	6	70	19 ± 1	1 mês	66
Amostra de superfície em reserva técnica de arquivo	6	70	19 ± 1	3 meses	66
Amostra de ar em reserva técnica de museu	8	65	21	2 meses	437
Amostra de ar em sala padrão	6 – 8	50	20	-	50

O IPI (NISHIMURA, s.d.) indicou as referências que serviram de base para o cálculo do risco de crescimento de mofo – *MRF* (*mold risk factor)*, mas não publicou equações utilizadas. Nos programas disponibilizados pelo Instituto, é possível calcular o *MRF* instantâneo para condições estáticas de temperatura e umidade relativa. Segundo NISHIMURA (s.d.), há uma combinação ótima desses fatores, na qual a germinação dos esporos será mais rápida e, à medida que as condições ambientais se afastam deste ponto ótimo, a taxa de crescimento diminui. AYERST (1969, p.133) apresenta os valores ótimos de *T* e *UR* para a germinação de dezesseis diferentes espécies de fungos. Nos dados apresentados por Ayerst, a temperatura ótima variou entre 23 e 40ºC, em média 30ºC, que é o valor considerado no modelo do IPI. Nessa temperatura, a atividade aquosa necessária para o crescimento do mofo é mínima. Em termos de *UR* ótima, os estudos de Ayerst mostraram valores de 93 a 98%, em média 97%. A Figura 148 ilustra estes conceitos.

[139] Considerando requisitos de saúde humana, a ASHRAE recomenda, para ambientes insalubres, como quartos de hospital a taxa de 13L/pessoa.s.

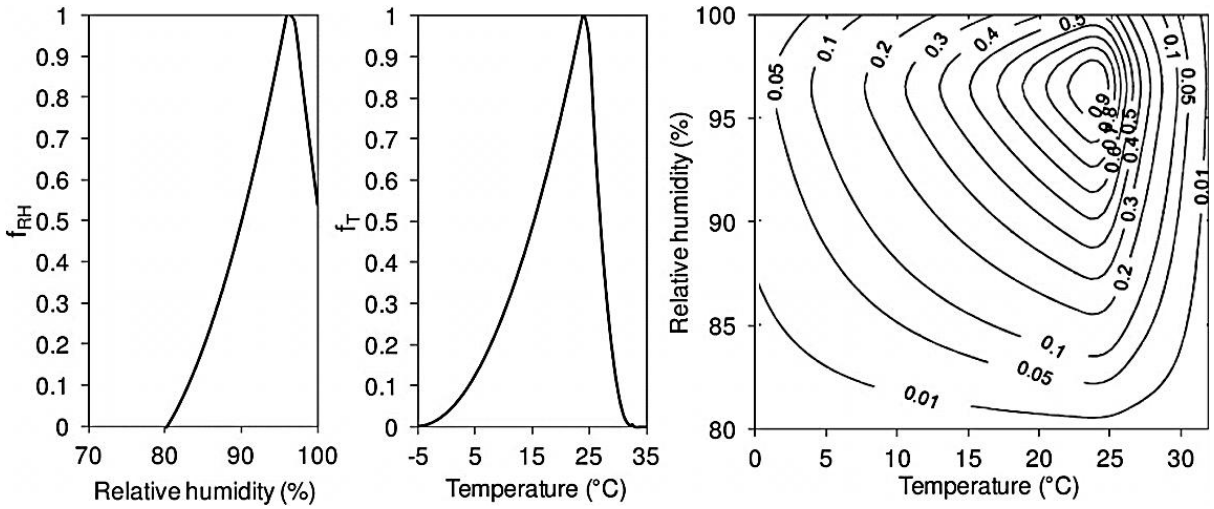


Figura 148 – Isopletas de taxa de crescimento de *Cladosporium spp* em função de *T* e *UR*. Fonte: (JOHANSSON et al, 2010).

O mofo ativo precisa de água para sobreviver, mas os esporos são bastante resistentes à ausência de umidade. O modelo do IPI supõe que o mofo ativo não sobrevive mais de 24h com a umidade abaixo de 65%, e que os esporos podem resistir por um tempo indeterminado, a condições desfavoráveis. O modelo do IPI não considera um possível "atraso" na reativação dos esporos, nem que uma umidade relativa muito alta (acima de 95%) poderia retardar a taxa de crescimento. Isso é criticado por VEREECKEN e ROELS (2012, p.300). Tais suposições devem ser interpretadas – bem como outras adotadas pelo IPI – como cautelosas, na medida em que podem levar a uma superestimação do *MRF*.

A maioria dos modelos de crescimento de mofo consideram uma umidade relativa crítica para ativação entre 70 e 80% (vide Tabela 25). Ao escrever o capítulo sobre museus, galerias, arquivos e bibliotecas para o manual de aplicações da ASHRAE (2007) Stefan Michalski inseriu isopletas considerando umidades relativas críticas de até 60%, pois alguns fungos podem germinar mesmo com essa *UR* crítica mais baixa, em cerca de três anos. (ERHARDT e MECKLENBURG, 1994; PADFIELD, 2005, p. 12). A linha espessa na Figura 149 representa a isopleta limite para o crescimento do mofo (*LIM – Lowest Isopleth for Mould).*

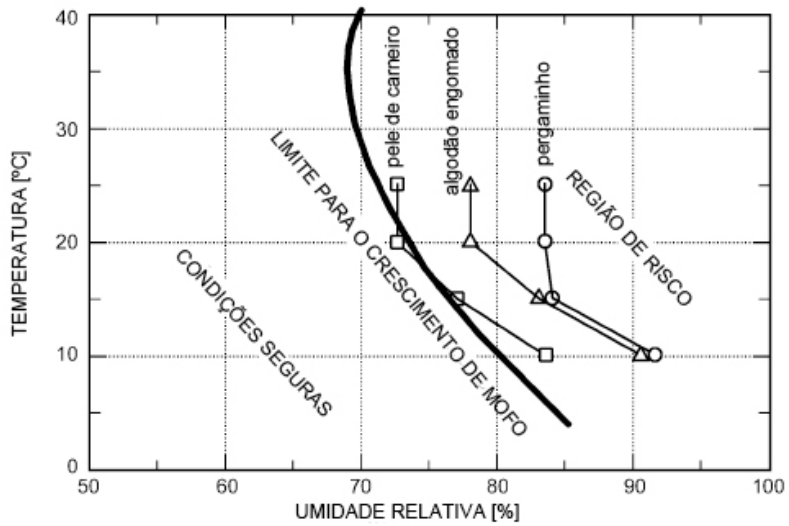


Figura 149 – Isopletas limite para germinação de mofo em um período de 100 a 200 dias, em função de *T* e *UR*. (Supõe condições de aumento na umidade relativa). Fonte: (ASHRAE, 2007).

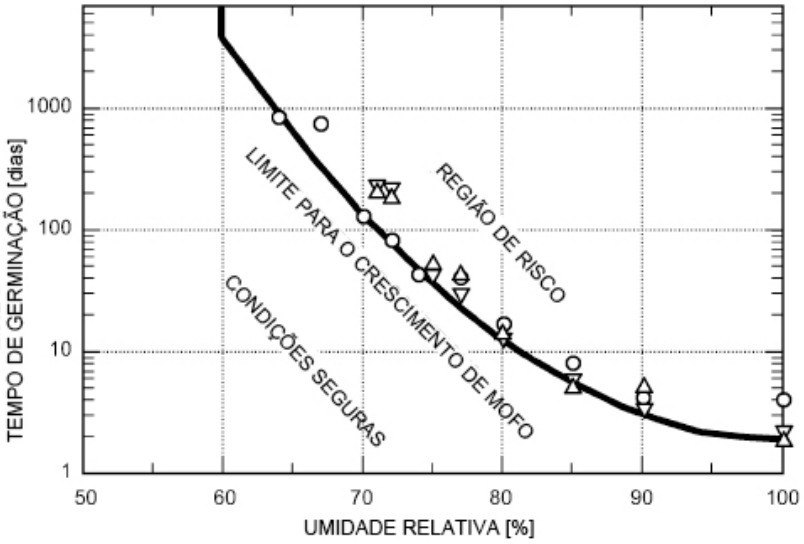


Figura 150 – Tempo de germinação de mofo em função da *UR*, considerando substrato altamente suscetível, 25ºC, condições de aumento na umidade relativa. Fonte: (Snow et al apud ASHRAE, 2007).

O algoritmo do modelo do IPI, descrito por NISHIMURA (s.d.), consiste resumidamente nos seguintes passos: (i) Para cada intervalo de medição do monitoramento ambiental verifica-se se $UR > 65\%$, se $2ºC < T < 45ºC$, e se há condições de crescimento de mofo, acima da isopleta limite da Figura 151; (ii) As médias móveis de temperatura (24h anteriores) e umidade relativa (30 dias anteriores) são comparadas uma tabela derivada das isopletas de crescimento da Figura 151, de onde é extraído o número de dias para germinação para cada par de *T* e *UR* monitorado; (iii) Esse número de dias para germinação é convertido em uma fração do *MRF*, dependendo do intervalo de medição. P. ex.: nesta pesquisa o intervalo de medição foi de 15 minutos. Se o número de dias para crescimento obtido da

Figura 151 é 8 dias, a fração correspondente de *MRF* é igual a 15 / (24 x 60 x 8); (iv) As frações são sucessivamente somadas, obtendo-se o *MRF*, e considera-se que foi atingido o tempo de germinação quando *MRF* ≥ 1 (mofo ativo). O *MRF* só é zerado se as condições ambientais deixarem de favorecer o crescimento por mais de 24h.

O *MRF* expressa, portanto, o tempo de exposição a esporos ativos, como uma fração do tempo necessário para a germinação. Com o algoritmo descrito acima, pode-se facilmente calcular quanto tempo falta para germinação (mantidas as condições de *T* e *UR*) e se o *MRF* ultrapassar o valor 1, por quanto tempo o mofo está ativo ou quanto tempo se passou desde a última vez em que esteve ativo. Todas essas informações são úteis para os conservadores e mais facilmente interpretáveis que gráficos brutos de temperatura e umidade relativa.

GIBSON e HOCKING (1997) comentam sobre os princípios para o modelamento matemático do crescimento de mofo e revisam a literatura sob esse aspecto. VEREECKEN e ROELS (2012), MOON (2005), MOON e AUGENBROE (2003) e SEDLBAUER (2001) revisaram e compararam os resultados de diversos modelos de estimativa de risco de crescimento de mofo, classificando-os em modelos de isopletas (como o utilizado pelo IPI), de simulação biohigrotérmica e empíricos. Alguns deles foram incluídos nas diretrizes da Organização Mundial da Saúde para a qualidade do ar interior (WHO, 2009). VEREECKEN e ROELS (2012) chamam a atenção para as diferenças entre os modelos, devidas às simplificações e suposições adotadas. Eles demonstram que o comportamento dos modelos é dependente da espécie para a qual foram desenvolvidos. MOON (2005) investiga as incertezas embutidas nos modelos.

Dentre os modelos revisados por esses autores, a seguir são descritos os que podem ser mais facilmente implementados em programas de simulação computacional higrotérmica ou fluidodinâmica:

Modelo IEA. Baseado em um critério determinístico que considera $T_{s,min}$ - temperatura mínima na parede interna e T_i e $T_{e,}$ respectivamente temperaturas do ar interno e externo [ºC]. VEREECKEN e ROELS (2012) criticam o fato do modelo não considerar a umidade e ser definido com base em dados climáticos belgas.

$$\tau = \frac{T_{s,min} - T_e}{T_i - T_e} \geq 0{,}7 \qquad (52)$$

Modelo TOW (Time of wetness). Trata-se de um índice de desempenho que considera como critério a razão entre o somatório de tempo em que a umidade fica acima do valor crítico e o tempo total de medição. ADAN (apud VEREECKEN e ROELS, 2012) propõe uma umidade relativa crítica de 80% e considera que uma **razão abaixo de 0,5** reduz o risco de crescimento de mofo. JOHANSSON et al. (2010, p. 1157) criticam os modelos que adotam somente a umidade relativa crítica, sem considerar a temperatura. O modelo é comentado também por SEDLBAUER (2001, p. 65). Sedlbauer indica que o índice deve ser calculado como fração diária, isto é, quantas horas por dia a *UR* permanece acima de 80% e indica que o limite de 0,5 é válido para a espécie *Penicillium chrysogenum* sobre um substrato de argamassa. Com base nas indicações de Sedlbauer, ao tratar-se os dados obtidos nesta pesquisa, o índice TOW foi calculado para cada intervalo de tempo, como **a fração total das últimas 24h na qual a *UR* permaneceu acima de 80%.**

Modelo de Johansson. (JOHANSSON et al., 2010). Índice de desempenho que expressa, de uma maneira similar ao *MRF* e ao modelo *TOW*, a **fração de tempo em que a umidade relativa é igual ou superior à umidade relativa crítica para germinação** (80%). Utiliza como dados adicionais de entrada as funções de temperaturas e umidades relativas ótimas mostradas na Figura 148.

Modelo de isopletas de AYERST. (AYERST, 1969; SMITH e HILL, 1982). O trabalho de Ayerst, dentre os trabalhos sobre simulação de crescimento de mofo revisados para esta pesquisa, foi a referências mais citada. Smith e Hill redesenharam as isopletas de Ayerst (Figura 151), separando o tempo de germinação e taxas de crescimento. Para utilizar essas isopletas em programas de simulação, visando obter o *MRF*, foi necessário transformá-las em uma tabela comparativa. MOON e AUGENBROE (2003) propõem um método utilizando esse processo, que é utilizado nos programas do IPI e foi adotado nesta pesquisa.

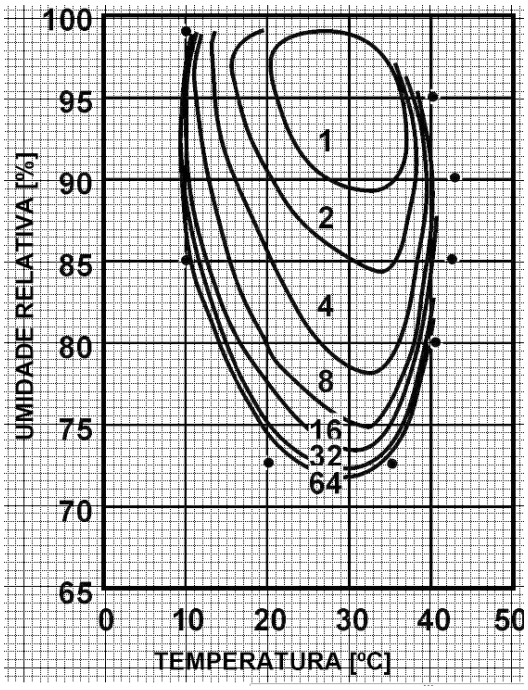


Figura 151 – Isopletas de tempo de germinação (dias) para *A. restrictus*, em função de *T* e *UR*. Adaptado de SMITH apud SEDLBAUER, 2001.

***Modelo de Isaksson*.** ISAKSSON et al. (2010) investigaram o tempo necessário para germinação em diferentes espécies de madeira, sob umidade e temperatura constantes, fornecendo as seguintes expressões empíricas para o seu cálculo:

$$t_g = (\exp(-0{,}74 ln\ T - 15{,}5 ln\ UR + 75{,}736) \text{ para alburno (}sapwood\text{)} \quad (53)$$

$$t_g = (\exp(-0{,}67 ln\ T - 13{,}25 ln\ UR + 64{,}546) \text{ para abeto (}spruce\text{)} \quad (54)$$

Onde t_g é o tempo de germinação crítico em dias.

Modelo de isopletas ESP-r. (CLARKE et al., 1999, 1997, 1996; ROWAN et al., 1999; SEDLBAUER, 2001). O ESP-r é um programa de simulação de desempenho higrotérmico de edificações, que resolve simultaneamente balanços termoenergético, de umidade e fluxo de ar. O modelo aproxima as isopletas de umidade relativa crítica por meio de polinômios de terceiro grau para seis espécies de fungos, considerados como representativos de suas categorias, mostradas na Figura 152. VEREECKEN e ROELS (2012, p. 302) criticam o modelo por **não incorporar o tempo de exposição**, portanto ele se presta apenas a determinar ou não a possibilidade de crescimento de mofo em função da umidade relativa crítica estimada pelas isopletas. Outra restrição é que as isopletas foram desenvolvidas para o meio de cultura **agar** e para T>5ºC. CLARKE et al. (1996) detalham como lidaram com as incertezas embutidas no método. A curva “A” na Figura 152 corresponde à isopleta limite e

pode ser aproximada pelo polinômio da eq. (55), apresentado para *E. herbariorum* em (ROWAN et al., 1999):

$$UR_{crit} = -0{,}0011T^2 + 0{,}1005T + 98{,}171 \quad (55)$$

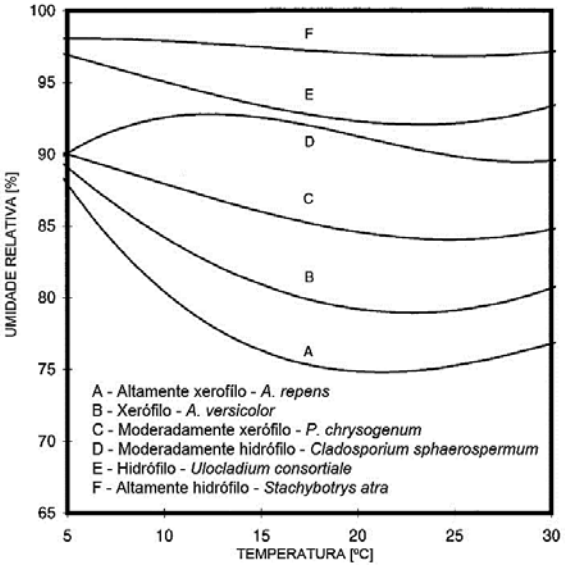


Figura 152 – Isopletas limite de germinação para seis categorias de fungos, em função de *T* e *UR*. Fontes: (CLARKE et al., 1999, 1997; ROWAN et al., 1999):

Modelo VTT / LATENITE [140]**.** Modelo empírico que propõe um **índice de mofo**, o qual, segundo VEREECKEN e ROELS (2012, p. 299) pode ser usado como critério de projeto. Geralmente nos índices utilizados nos modelos, inclusive o *MRF* do IPI, considera-se o valor 1 como sendo o máximo tolerável, correspondendo ao início da germinação. No modelo *VTT*, o índice de mofo usa várias categorias, variando entre 0 e 6, em termos de intensidade de crescimento e área de cobertura da camada de mofo sobre o substrato. Para o cálculo são utilizados como dados de entrada a temperatura, a umidade relativa crítica (80% se *T*> 20ºC), e o tipo de substrato (abeto ou pinho). O modelo usa um conjunto de equações (VEREECKEN e ROELS, 2012, p. 299; MOON, 2005, p. 33) para calcular frações do índice de crescimento por hora, possibilitando assim o cálculo do tempo de germinação a partir dos dados de entrada. VEREECKEN e ROELS (2012, p.300) afirmam que **o fato do modelo não considerar um declínio no crescimento em períodos de 6 a 24h de condições desfavoráveis é fisicamente não realístico. Essa suposição também é adotada pelo**

[140] (VIITANEN, 2011; VIITANEN et al., 2010, 2008; VIITANEN e OJANEN, 2007; HUKKA e VIITANEN, 1997; MOON, 2005; SEDLBAUER, 2001).

modelo *MRF* do IPI. Outra restrição apontada é que o modelo é baseado em experimentos com substratos de madeira. A Figura 153 mostra isopletas de germinação do modelo VTT:

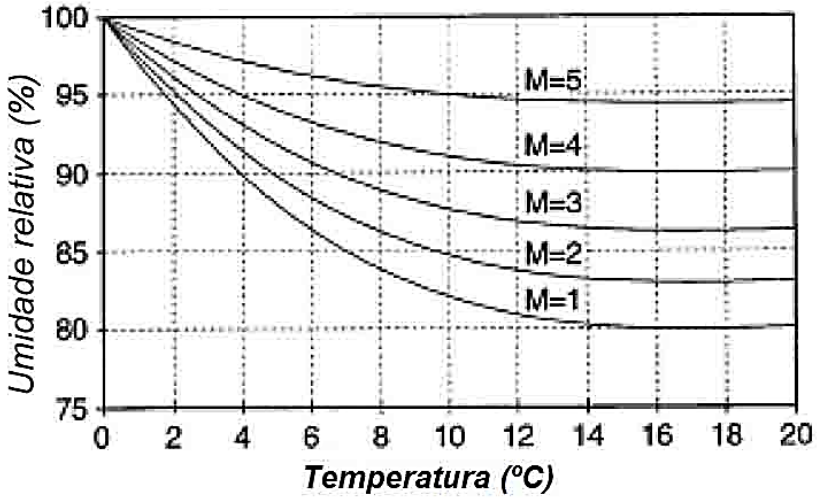


Figura 153 – Isopletas limite de germinação do modelo VTT. Adaptado de: (MOON, 2005).

Modelo biohigrotérmico de Sedlbauer e Krus. (KRUS et al., 2010, 2007; SELDBAUER, 2002, 2001; SEDLBAUER et al., 2001) – O modelo estabelece um método de cálculo do risco de crescimento de mofo sobre superfícies internas aos edifícios, em regime transiente. Eles simularam o esporo como uma "parede biológica", investigando o balanço higrotérmico e obtendo isopletas limite (LIM) para diversas espécies de fungos representativos de suas categorias, em função da temperatura e umidade relativa ambientais. O modelo parte de funções semelhantes às propostas por Johansson (Figura 148), mas inclui também funções para caracterizar a propensão à contaminação em diferentes categorias de substrato e a fração de tempo em que as condições são favoráveis ao crescimento. Os substratos são divididos em três categorias: meio de cultura ótimo, materiais biodegradáveis (papel de parede, silicones, etc.) e materiais parcialmente biodegradáveis, com estruturas porosas (algumas espécies de madeira, lãs e espumas para isolamento térmico).

O resultado são isopletas de tempo de germinação e de taxa de crescimento das camadas sobre o substrato, em [mm/dia]. As isopletas limite (LIM) mostradas na Figura 152 resultam da comparação entre isopletas obtidas para diversas espécies, adotando-se as mais baixas.

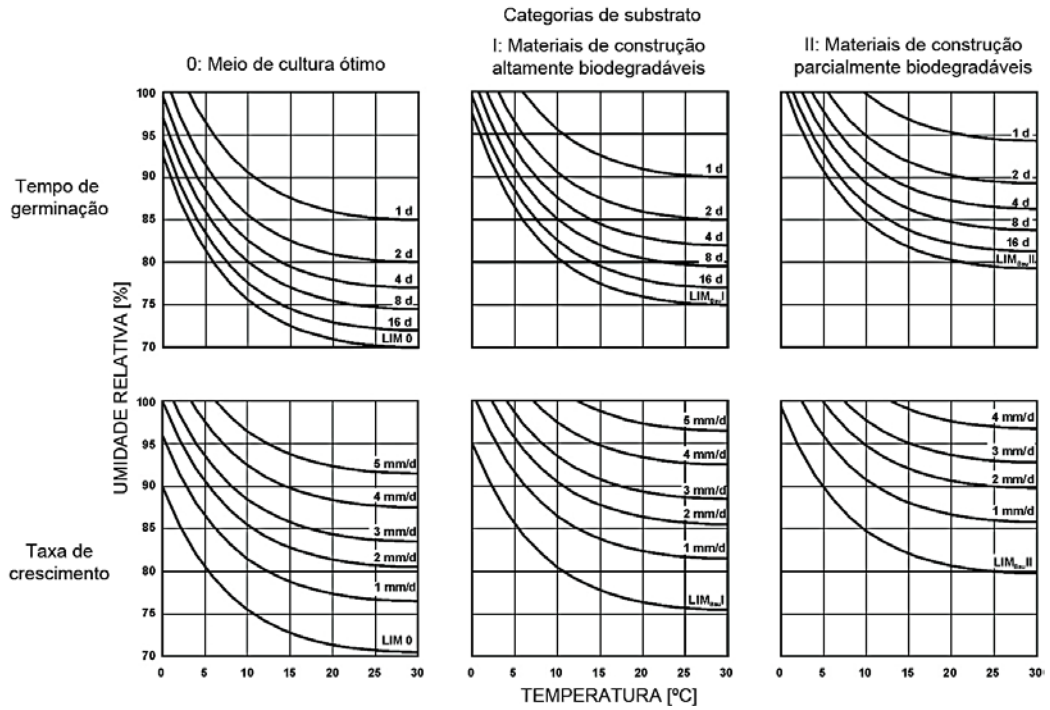


Figura 154 – Isopletas limite de germinação do modelo Sedlbauer-Krus. Fonte: (CLARKE et al., 1999).

Em sua tese de doutorado e publicações sequentes, Sedlbauer não publicou as equações das isopletas, apenas informou o seu formato - uma função hiperbólica da temperatura e umidade relativa ótimas para o crescimento - e descreveu o método gráfico utilizado em sua obtenção (SEBLBAUER, 2001, p. 78 e 214). Em 2003 Sedlbauer e Krus entraram com um pedido de patente de seu método nos Estados Unidos[141]. Para contornar essa dificuldade, JOHANSSON (2012, p. 28) propôs aproximar a isopleta por meio de uma parábola com coeficientes estimados a partir de testes de laboratório.

A partir do modelo de Sedlbauer e Krus foi desenvolvido um programa, o *WUFI-BIO*[142], pensado como módulo específico do programa *WUFI*, de simulação de desempenho higrotérmico de edificações. O programa *WUFI-BIO* pode ser utilizado com outros programas de simulação, pois permite a importação de dados de entrada. KRUS et al. (2010) demonstram a aplicação do programa e comparam os resultados com os do modelo VTT.

MARTENS (2012) utilizou o modelo de Sedlbauer e Krus para calcular um **fator de germinação**, com definição e algoritmos semelhantes aos propostos por NISHIMURA (s.d.),

[141] http://www.google.com/patents/US20030187579 (Acesso em 30/08/2012).

[142] http://www.hoki.ibp.fhg.de/wufi/wufibioinfo_e.html (Acesso em 30/08/2012).

sem considerar, entretanto, a cessação do processo de germinação quando as condições desfavoráveis perduram por mais de 24h.

A Tabela 25 resume as umidades relativas críticas apresentadas nos diversos modelos estudados acima, na ordem em que foram citados:

Tabela 25– Umidade relativa crítica para germinação de fungos.

Modelo / autor	Umidade relativa crítica (%)	Observações
Johansson, S. (2010)	80 a 95	Variável em função da temperatura
Johansson, P. (2012)	75 a 95	Variável em função da temperatura
IPI / Reilly / Nishimura	65 a 95	
ASHRAE / Michalski	70 a 90% (isopletas) 75% nas classes de controle C e D (vide Quadro 2)	70% corresponde a um tempo de germinação de 100 dias, 90% a 3 dias. Para um tempo de germinação longo (1000 dias) é considerada uma *UR* crítica de 60%.
TOW / Adan	80	
VTT / Viitanen	80 a ~95	Variável em função da temperatura
Ayerst / Moon e Augenbroe	70	Variável em função da temperatura
ESP-r / Clarke	~75 a 85	Variável em função da temperatura
Sedlbauer / Krus	~70 a 90	Variável em função da temperatura e do substrato

A.6- Risco de corrosão

Modelos realísticos para simular e avaliar a corrosão dos metais são bastante complexos, a começar pela composição química extremamente diversificada das ligas metálicas presentes nos bens culturais. Os fatores ambientais de deterioração discutidos anteriormente – principalmente os **contaminantes atmosféricos** - bem como os fatores ligados aos diversos níveis de controle mostrados na Figura 2 influenciam nos mecanismos de corrosão. Essa área constitui um campo específico tanto da Engenharia quanto da Química, cujas interfaces convergem na Engenharia de Corrosão, que, via de regra, vai se preocupar com o gerenciamento da corrosão em grandes e diversas estruturas. Excetuando-se os casos dos monumentos e dos componentes construtivos dos edifícios, principalmente os chamados históricos, os problemas de corrosão, no âmbito da preservação dos bens culturais dizem respeito aos bens móveis. BRADLEY (2000) chega a salientar que cientistas “passam suas vidas tentando descobrir e compreender reações complexas de corrosão e pode haver uma maneira mais apropriada de classificar os ambientes para objetos“

A umidade relativa desempenha um papel central no mecanismo da corrosão dos metais, determinando a ocorrência e velocidade do processo. Em termos do monitoramento e controle desta variável, dada a diversidade comentada acima, não há como estabelecer um limite inferior de segurança para ela.

O IPI propõe que o risco de corrosão seja avaliado por meio do *EMC* máximo (*maxEMC*), registrado durante o monitoramento ambiental, seja interpretado de acordo com o Quadro 5. É avaliado também o número de dias em que a umidade relativa permanece acima de 55%. **A adequação metodológica desta métrica é questionável**, na medida em que o cálculo do *EMC* é baseado no comportamento de um material orgânico – a madeira. Por outro lado, ZÍTEK e VYHLÍDAL (2009) lembram que o *EMC* de vários materiais encontrados em bens culturais, inclusive alguns inorgânicos, como gesso e argamassas, pode representar as condições de equilíbrio com a umidade do ar circundante.

Os métodos mais comuns utilizados atualmente para o gerenciamento ambiental da corrosão envolvem o monitoramento ou a estimativa da **corrosividade**, ao nível do microclima (sala, mobiliário ou embalagem) onde si situam os objetos (JOHANSSON et al., 1998). O monitoramento é feito utilizando fitas padronizadas de metais como prata, cobre, zinco e aço-carbono, nas quais se mede perdas ou ganhos de massa, para determinar a categoria de corrosividade, a partir da taxa de corrosividade (*CR*) em curto (um ano) ou longo prazo (vinte anos) conforme a norma ISO 9223 (ISO, 2012):

Tabela 26– Categorias de corrosividade, de acordo com a norma ISO 9223 (ISO, 2012).

Categoria	Aço	Cobre	Alumínio	Zinco
$\mathbf{C_1}$	$CR <= 10$	$CR <= 0.9$	desprezível	$CR <= 0.7$
$\mathbf{C_2}$	$10 < CR <= 200$	$0.9 < CR <= 5$	CR <= 0.6	$0.7 < CR <= 5$
$\mathbf{C_3}$	$200 < CR <= 400$	$5 < CR <= 12$	$0.6 < CR <= 2$	$5 < CR <= 15$
$\mathbf{C_4}$	$400 < CR <= 650$	$12 < CR <= 25$	$2 < CR <= 5$	$15 < CR <= 30$
$\mathbf{C_5}$	$650 < CR$	$25 < CR$	$5 < CR$	$30 < CR$

No Brasil, o estado da arte da pesquisa nesse campo envolve o desenvolvimento de microbalanças de quartzo constituídas de cristais piezoelétricos, capazes de alertar sobre a agressividade de um microclima em tempo de resposta bem mais curto se comparado ao dos cupons metálicos citados acima. O sensor pode ser integrado a um sistema de monitoramento de *T, UR* e luminosidade (CAVICCHIOLI et al., 2008, 2010; PUGLIERI et al., 2013).

OTADUY e KARAGIOSIS (2010) desenvolveram um modelo de estimativa da corrosividade baseado no modelo apresentado na norma, utilizando regressão multivariada e inferência nebulosa, para ser incorporado a programas de simulação higrotérmica. SAHEB e DUBUS (2006) compararam as categorias da ISO 9223 com outras normas e também

comentam a respeito dos métodosde medição da corrosividade. No tocante à proteção dos monumentos, o projeto CULT-STRAT[143] produziu estimativas do ciclo de vida de metais utilizados em bens culturais, com base em medições climáticas e de poluentes em diversas cidades européias. Na página de internet do projeto MUSECORR[144] é possível encontrar referências que refletem o estado da arte na pesquisa sobre corrosão aplicada à preservação dos bens culturais, como por exemplo o desenvolvimento de sensores específicos para monitoramento ambiental de corrosão. ERHARDT e MECKLENBURG (1994) recomendam a manutenção de uma umidade relativa abaixo de 46% para prevenir a corrosão ativa do bronze.

TETREAULT (2003a, 2003b, 2004, 2008) desenvolveu uma métrica de preservação para estimar o dano causado a bens culturais por contaminantes atmosféricos, baseada numa abordagem de gerenciamento de riscos. O **potencial de dano (D_m)** é calculado em função da concentração do poluente e dos parâmetros ***LOAE (Lowest Observable Adverse Effect), LOAED (Lowest Observable Adverse Effect Dose*** e ***NOAEL* (*No Observable Adverse Effect Level*).** Para calcular o dano produzido por vários poluentes simultaneamente, Tetreault utiliza um conceito de média harmônica, similar ao adotado pelo IPI para o índice *TWPI.* (GLASTRUP, 2004; GRZYWACZ, 2006).

TETREAULT (2008) fornece a seguinte expressão para o cálculo de D_m:

$$D_m = 1 - e^{-t \cdot LOAE \cdot C \,/\, LOAED} \tag{56}$$

Onde

D_m é o dano, como fração de mudança de uma determinada propriedade dos objetos (p. ex. esmaecimento de um corante), adimensional; t é o tempo [anos]; *LOAE* é adimensional; C é a concentração do poluente [μg / m^3]; *LOAED* é dada em [μg / m^3. ano];

RYHL-SVENDSEN (2006) discute as limitações do índice proposto por Tetreault, que foi incluído no capítulo sobre museus, arquivos e bibliotecas do manual de aplicações da ASHRAE (2007).

---

[143]http://www.corr-institute.se/cultstrat/getfile.ashx?cid=59101&cc=3&refid=4 (Acesso em 27/08/2012).

[144] http://www.musecorr.eu/project.html (Acesso em 27/08/2012).

APÊNDICE B

ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA E INTERFACES ENTRE CONFORTO AMBIENTAL HUMANO E PARA COLEÇÕES

Bons projetos arquitetônicos empregam estratégias bioclimáticas como recursos para maximizar o conforto ambiental humano e a eficiência energética nos edifícios. Este Apêndice Aprofunda questões relativas ao papel de filtro protetor, exercido pelos edifícios que abrigam coleções, introduzido na seção 2.3, em termos das implicações e interfaces entre o conforto ambiental humano e para coleções. O **Apêndice C** procura descrever as peculiaridades da aplicação da ventilação natural de edifícios que abrigam coleções, em diferentes contextos climáticos. Nele são comentados exemplos construídos que incorporam o uso da ventilação natural e outras estratégias bioclimáticas.

Edifícios em climas quentes e úmidos tendem a ser mais abertos, com ventilação cruzada, janelas amplas e uso do efeito chaminé na ventilação. Também são frequentes dispositivos de sombreamento das fachadas, que permitam a passagem do vento. Já os edifícios adaptados aos climas quente-secos geralmente são construídos com envoltórias espessas e poucas aberturas, em função da grande amplitude térmica entre o dia e a noite É comum o uso de pátios internos, em ambas as tipologias climáticas. A correta escolha dos materiais de construção representa um papel fundamental para um bom desempenho térmico dos edifícios (PARK, 1999).

Sobre a arquitetura bioclimática de museus, arquivos, bibliotecas e outros edifícios que abrigam coleções recomenda-se consultar, além dos princípios de projeto introduzidos na seção 2.3, os trabalhos de ANTUNES (2011), EDWARDS (2011), FRANTZ (2007), PADFIELD e LARSEN (2004), RIBEIRO (2010), SANDS (2004), SCHAPER e SCHERER (2012), TOLEDO (1999b, 2006, 2007, 2010), TOMBAZIS et al. (2004).

B.1- Arquitetura bioclimática e estratégias arquitetônicas passivas visando o conforto ambiental humano e a eficiência energética dos edifícios

Cronologicamente, os irmãos Olgyay (1963) foram os primeiros a aprofundar a noção de conforto térmico e tentar estabelecer relações deste conforto com os ambientes interiores nos edifícios. Foram eles que introduziram o termo **projeto bioclimático**, bem como um

diagrama bioclimático (Figura 155) no qual foi indicada uma **zona de conforto humano** sobre um gráfico de temperatura de bulbo seco em função da umidade relativa.

Em torno da zona de conforto, os irmãos Olgyay indicaram procedimentos necessários para fazer com que as condições do ambiente pudessem atingi-la, modificando: velocidades do ar, potências de radiação, razão de umidade, temperaturas radiantes médias das paredes e um limite a partir do qual é desejável o uso de estratégias de sombreamento. Esses procedimentos são denominados **estratégias bioclimáticas**.

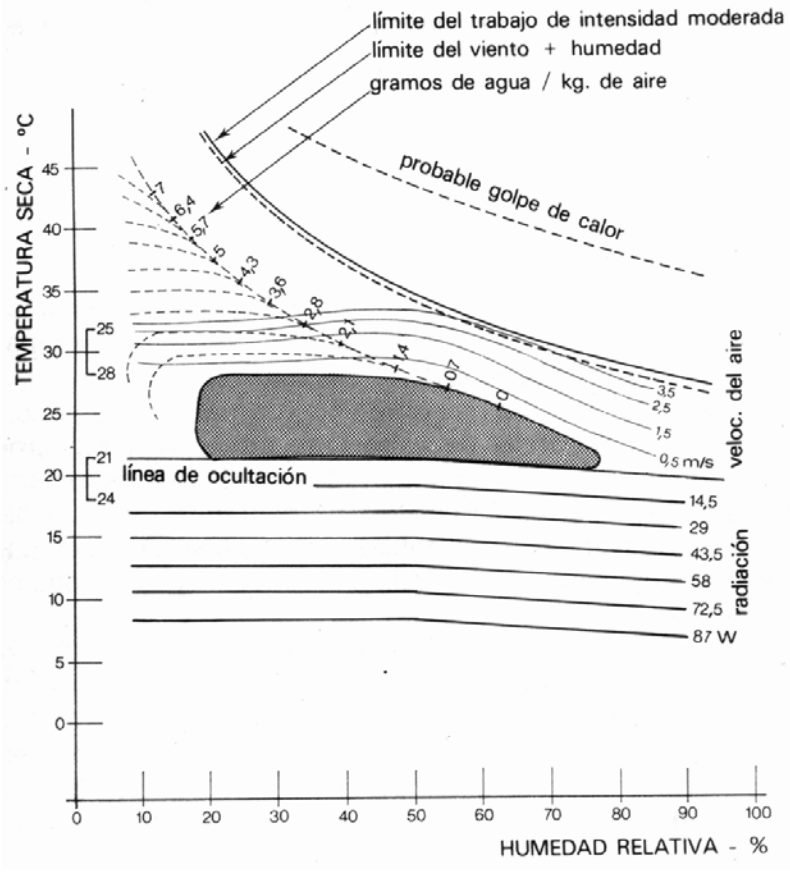


Figura 155 – Diagrama bioclimático de Olgyay indicando condições que se deve cumprir para devolver o ambiente à zona de conforto (estratégias bioclimáticas). Fonte: (IZARD e GUYOT, 1980).

A idéia do diagrama bioclimático, desenvolvida originariamente pelos Olgyay, foi aperfeiçoada por GIVONI (1976, 1981). Desenvolvido em Israel, o **diagrama bioclimático de Givoni** é construído sobre uma carta psicrométrica (Figura 156), onde estão traçados os limites da zona de conforto. As condições de conforto são estabelecidas a partir de um **índice de fadiga térmica**, definido pelo autor, que fornece o grau de transpiração necessário, em kcal/h, para atingir o equilíbrio térmico. O índice é calculado em função do metabolismo e das diversas trocas térmicas entre o corpo e o ambiente. A Figura 156 apresenta os limites da zona

de conforto (zona 1) e diversas estratégias bioclimáticas, baseadas em pesquisas mais recentes do autor, considerando a aclimatação das pessoas em países de clima quente e em desenvolvimento (GIVONI, 1992).

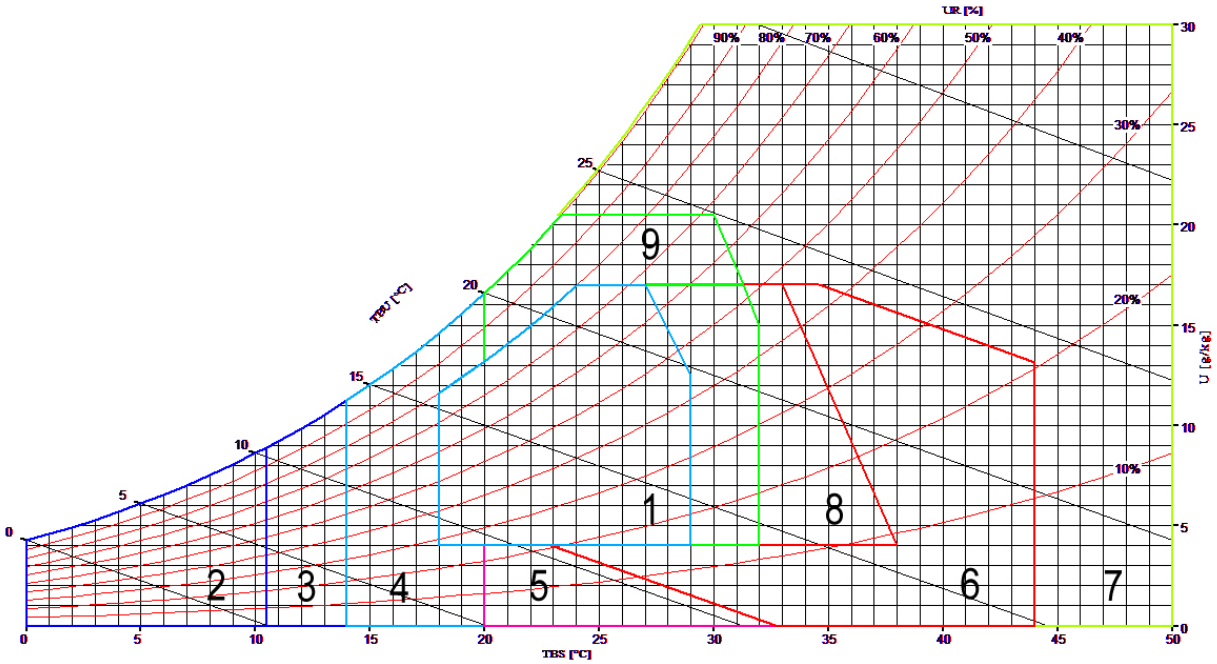


Figura 156 – Diagrama bioclimático de Givoni com limites da zona de conforto ampliados para países de clima quente (1) Zona de Conforto; (2) Zona de aquecimento artificial; (3) Zona de aquecimento solar passivo; (4) Zona de massa térmica e aquecimento solar passivo; (5) Zona de umidificação; (6) Zona de resfriamento evaporativo; (7) Zona de resfriamento artificial; (8) Zona de massa térmica para resfriamento; (9) Zona de ventilação; Fonte: programa *Analysis Bio*.

Como o diagrama está desenhado sobre uma carta psicrométrica, podem-se usar como dados de entrada a temperatura de bulbo seco, a temperatura de bulbo úmido, a umidade relativa ou a umidade absoluta. Tendo em mãos os valores das variáveis de entrada, o diagrama, que é um dos mais utilizados para análise de desempenho térmico dos edifícios, permite julgar se uma determinada solução arquitetônica é adequada ou não ao clima do local em estudo, e que providências devem ser tomadas para atingir a zona de conforto, se for o caso. FERNANDES (2009) compilou o Quadro 6, explicando a aplicação das estratégias detalhadas por GIVONI (1976, 1981).

Quadro 6 – Detalhamento das estratégias bioclimáticas propostas por Givoni. Fonte: (FERNANDES, 2009).

VARIÁVEL	APLICAÇÃO
Ventilação	Para situações onde a temperatura do ar ultrapassar os 29°C ou a umidade relativa do ar for superior a 80%, aplicável até o limite de temperatura exterior de 32°C. A ventilação é uma estratégia de resfriamento natural do ambiente construído a partir da substituição do ar interno (mais quente) pelo externo (mais frio).
Resfriamento Evaporativo	Para situações onde a temperatura de bulbo úmido (TBU) máxima não exceda os 24°C e a temperatura de bulbo seco (TBS) máxima não ultrapasse os 44°C. O resfriamento evaporativo é uma estratégia utilizada para aumentar a umidade relativa do ar e diminuir a sua temperatura. O resfriamento evaporativo pode ser obtido de forma direta ou indireta. O uso de vegetação, de fontes d'água ou de outros recursos que resultem na evaporação da água diretamente no ambiente que se deseja resfriar constituem-se em formas diretas de resfriamento evaporativo. Uma forma indireta pode ser obtida por meio de tanques d'água sombreados executados sobre a laje de cobertura.
Massa Térmica para Resfriamento	Para situações onde as condições de temperatura são elevadas e umidades relativas baixas ou intermediárias. A utilização de componentes construtivos com inércia térmica (capacidade térmica) superior faz com que a amplitude da temperatura interior diminua em relação à exterior, ou seja, os picos de temperatura verificados externamente não serão percebidos internamente. Componentes construtivos com elevada capacidade térmica são indicados para climas quente e seco onde a temperatura atinge valores muito altos durante o dia e extremamente baixos durante a noite. Nestes casos, a capacidade térmica do componente permite o atraso da onda de calor fazendo com que este calor incida no ambiente interno apenas no período da noite, quando existe a necessidade de aquecimento.
Umidificação	Quando a umidade relativa do ar for muito baixa (inferior a 20%) e a temperatura inferior a 27°C. Recursos simples, como recipientes com água colocados no ambiente interno podem aumentar a umidade relativa do ar. Da mesma forma, aberturas herméticas podem manter esta umidade, além do vapor d'água gerado por atividades domésticas ou produzido por plantas.
Massa Térmica para Aquecimento	Para situações de temperatura entre 14°C e 20°C. Neste caso, pode-se adotar componentes construtivos com maior inércia térmica, além de aquecimento solar passivo e isolamento térmico, para evitar perdas de calor.
Aquecimento Solar Passivo	Para situações com baixa temperatura do ar, entre 10,5°C e 14°C, com isolamento térmico mais rigoroso. Recomenda-se que a edificação tenha superfícies envidraçadas orientadas para o sol e aberturas reduzidas nas fachadas que não recebem insolação para evitar perdas de calor. Esta estratégia pode ser conseguida a partir da orientação adequada da edificação e de cores que maximizem os ganhos de calor, por mieo de aberturas zenitais ou de coletores de calor colocados no telhado.

PEREIRA e ASSIS (2010) compararam três estudos de índices de conforto térmico feitos no Brasil, para as cidades de Natal, Florianópolis e Belo Horizonte (este último realizado pelo autor desta tese), indicando as respectivas zonas de conforto humano encontradas sobre o diagrama bioclimático de Givoni, conforme mostrado na Figura 157. Pereira e Assis comparam quatro diferentes modelos adaptativos de conforto térmico com os resultados obtidos pelos autores brasileiros, por meio de simulação computacional, sendo que

a curva de conforto adaptativa de HUMPHREYS (1978) foi a que melhor se adequou aos três casos comparados. As autoras apontam, contudo, que essa adequação se reduz para cidades com grande amplitude térmica diária.

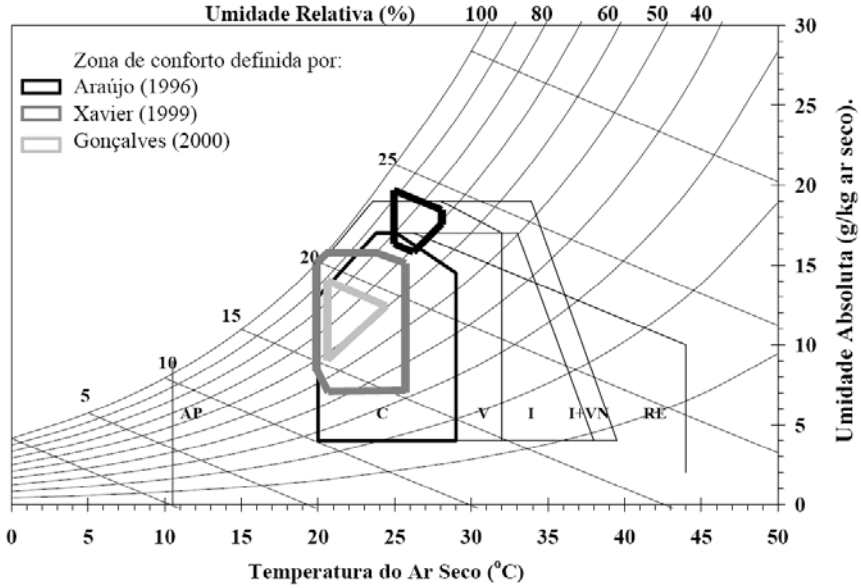


Figura 157 – Zonas de conforto térmico humano para as cidades de Natal (Araújo), Florianópolis (Xavier) e Belo Horizonte (Gonçalves). Fonte: (PEREIRA e ASSIS, 2010).

Há vários programas computacionais para auxílio às fases iniciais de projeto que utilizam o diagrama bioclimático de Givoni. Dentre eles podemos citar o *Climate consultant* elaborado pelo Departamento de Arquitetura e Desenho Urbano da Universidade da Califórnia[145], o *Climaticus 4.2*, elaborado pelo Laboratório de Conforto Ambiental da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP[146] e o *Analysis Bio*, elaborado pelo LabEEE/UFSC[147], utilizado neste trabalho.

A Escola de Engenharia de São Carlos disponibiliza um diretório[148] de ferramentas computacionais auxiliares às fases iniciais de projeto, em sua maioria, nacionais. Já o diretório de ferramentas computacionais de uso de energia em edifícios do Departamento de

[145] http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/

[146] http://www.usp.br/fau/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/index.html (Acesso em 18/08/2011)

[147] http://www.labeee.ufsc.br/downloads/softwares/analysis-bio (Acesso em 18/08/2011)

[148] http://www.arquitetura.eesc.usp.br/sap0649/index.html (Acesso em 18/08/2011)

Energia dos Estados Unidos[149], traz informações detalhadas sobre cerca de quatrocentos programas, tanto de uso livre, quanto comerciais.

Steven Szokolay (1995a, 1995b, 1995c) propõe o uso de cartas bioclimáticas como ferramentas indicativas de estratégias de projeto, enfatizando a importância deste uso nas fases iniciais do projeto. Em 1987, Szokolay (1995a, 1995b) desenvolveu o método CPZ (*Control Potential Zone*) para análise do clima e recomendações de projeto, o qual é similar ao método de Givoni. Com base nos dados climáticos são recomendadas estratégias bioclimáticas a partir de um diagrama desenhado sobre a carta psicrométrica. No diagrama de Szokolay, entretanto, a zona de conforto é marcada a partir de uma **temperatura neutra**, que é variável conforme o clima. Esta temperatura guarda relação com a temperatura média mensal externa do local em questão. GONÇALVES (2000) discute em detalhes a metodologia proposta por Szokolay.

AMORIM e BRAGA (2009) resumem os métodos e técnicas do conforto ambiental aplicados à reabilitação do ambiente construído. ROMERO (2001, p. 147) apresenta quadros comparativos de variáveis elencadas por diversos autores clássicos para análise do desempenho ambiental dos edifícios e do ambiente urbano.

B.2- Conforto ambiental humano *versus* conforto ambiental para coleções

Em termos de conforto térmico, **as pessoas são mais sensíveis à flutuação da temperatura**, ao passo que a **maioria dos objetos encontrados em museus, arquivos e bibliotecas – principalmente aqueles que possuem materiais orgânicos em sua composição - é mais sensível à flutuação da umidade** (CASSAR, 1995). Quando seu microclima oscila, muitos objetos se deterioram com grande rapidez, porque **suas margens de tolerância e capacidade de adaptação climática são bem menores que as dos seres humanos** (ORESZCZYN apud GCI 2007, p. 28).

Contudo, ao se priorizar questões de eficiência energética, e o impacto das demandas de conforto ambiental humano perante as mudanças climáticas, a temperatura seria o fator mais importante (CAMUFFO e DELLA VALLE, 2007; GCI, 2007; HENRY, 2007a).

[149] http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/

No projeto para o sistema de ventilação da Fundação Casa de Rui Barbosa, MAEKAWA et al. (2009a, 2009b) consideraram requisitos de conforto ambiental humano. Embora um ambiente possa apresentar condições de conforto térmico para os usuários, isso não significa que essas condições sejam adequadas para o acervo (ASSIS e BASTOS, 2007; BERNARDI, 2008, seção 3.9; PARK, 1998; TOLEDO, 2007). **A zona de conforto ambiental humano pode abranger um intervalo em que o índice de permanência de uma coleção pode variar por um fator de até seis vezes** (SEBERA, 2001, p. 18). Por outro lado, em certos casos, as necessidades dos objetos/edifícios não são tão diferentes das necessidades dos ocupantes/visitantes e até apresentam certa coincidência (BOTTIGLIONI, 2004; HENRY, 2007b; MICHALSKI, 1998, p. 13). Na literatura encontram-se propostas interessantes de integração de variáveis para obtenção de modelos de cálculo da **satisfação** dos visitantes de museus (JEONG e LEE, 2006; DE ROJAS e CAMARERO, 2008). Encontram-se também indicações de que a solução a ser adotada não passa tanto por adaptar as necessidades da coleção e do edifício às necessidades dos usuários ou vice-versa, mas adaptar as necessidades da coleção ao que é realmente possível em um edifício histórico, ou mesmo num edifício construído especificamente para ser um museu, a um custo razoável[150].

Quadro 7 - Comparação das necessidades ambientais de pessoas, coleções e edifícios. As células sombreadas mostram as necessidades mais difíceis de conciliar. Adaptado de MICHALSKI (1998) e ORESZCZYN et al., (1994). As células sombreadas indicam os conflitos que exigem mais esforços para sua solução.

Parâmetro		Pessoas	Coleções	Edifício
Temperatura	Desejos	*T* constante e moderada, sem flutuações	*T* constante e moderada, sem flutuações, T baixa em arquivos com materiais sensíveis	*T* constante e moderada, com o uso mínimo de sistemas de climatização
	Necessidades	Mediante adaptação, podem tolerar uma faixa ampla	Podem tolerar uma faixa ampla, mas o uso de aquecimento acelera a deterioração química	Resfriamento somente até o ponto de orvalho, para evitar condensação
Umidade relativa	Desejos	*UR* constante e moderada, mas grandes flutuações podem passar despercebidas	*UR* constante e moderada, sem flutuações	*UR* constante e moderada, com o uso mínimo de sistemas de climatização
	Necessidades	Toleram valores altos, na presença de ventilação, considerar o risco de mofo	*UR* média moderada com flutuações de acordo com a sensibilidade e vulnerabilidade de cada material	Não deve ser tão baixa que cause eflorescência, nem tão alta que cause condensação

[150] (BERNARDI, 2008, seção 3.9; CAMUFFO, 1998, seção 1.7; CASSAR e YOUNG, 2001; COSTANZO et al., 2007; D'AGOSTINO, 2006, p. 11; ENGLISH HERITAGE, 2008b; MICHALSKI, 1998).

MICHALSKI (1998) sintetiza no Quadro 7 o que seriam, em sua opinião, as diferenças entre os desejos e a necessidades desses três grupos, em termos das variáveis temperatura e umidade relativa, contribuindo para uma compreensão global da questão. Ele aponta que, em ordem de prioridade, as soluções seriam: (i) evitar os sistemas ativos e **usar a ventilação natural ou forçada;** (ii) usar aquecimento umidostático (vide seção 2.4.2); (iii) usar sistema de climatização (MICHALSKI, 1998, p. 13).

GONÇALVES (2000) revisou o modelamento físico-matemático do conforto térmico humano e estudou a aplicabilidade de diversos índices de conforto ambiental humano na região de Belo Horizonte, MG mediante pesquisa de campo com população universitária.

LA GENNUSA et al. (2008) propuseram a utilização de um índice de desempenho para medir o quanto as necessidades das coleções e dos usuários são atendidas simultaneamente. Para isso eles compararam os limites de segurança para alguns tipos de coleções propostos na norma italiana UNI 10969 (UNI. 2002) com a zona de conforto humano da norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2004) e com o índice *PMV* (*Predicted Mean Vote) / PPD* (*Percentage of People Dissatisfied),* introduzido por Fanger[151].

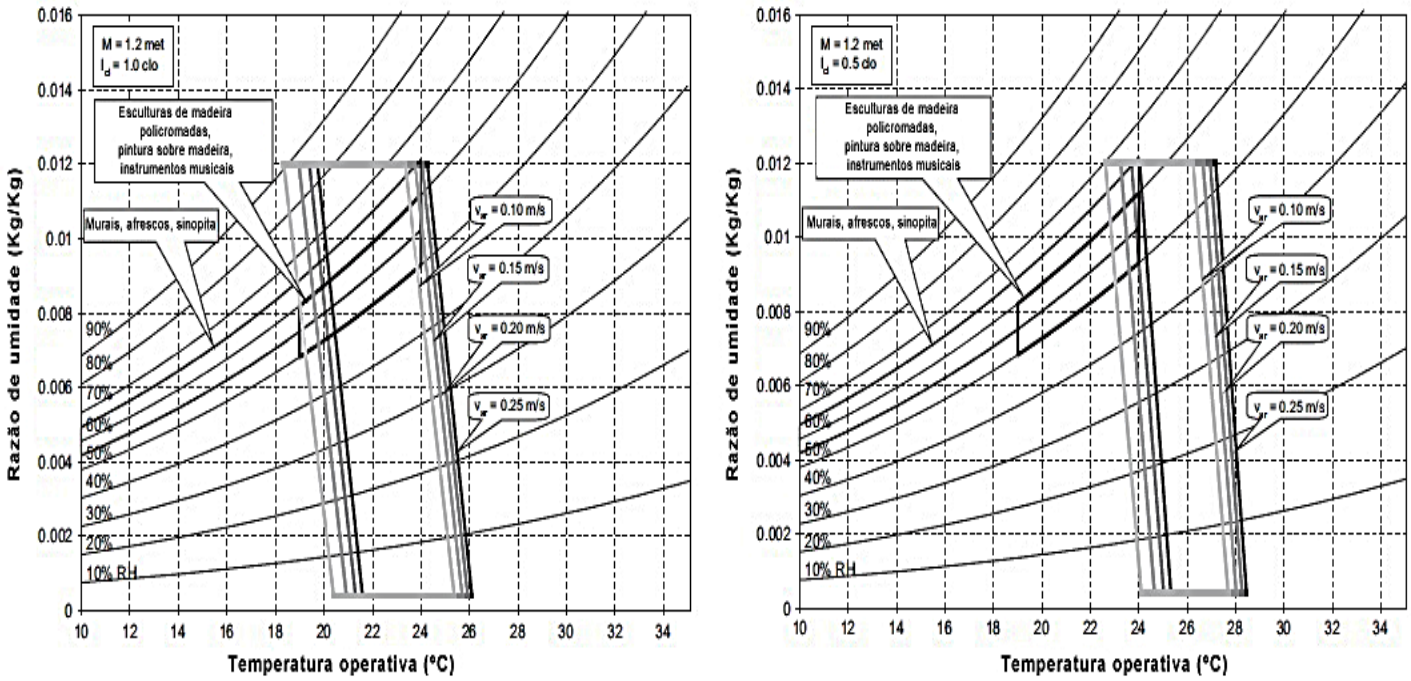


Figura 158 – Comparação entre zona de segurança ambiental para artefatos de madeira, murais e afrescos e a zona de conforto humano. Adaptado de: LA GENNUSA et al. (2008)

[151] Para mais detalhes sobre esses e outros índices de conforto térmico humano usuais, vide GONÇALVES (2000).

Considerando simultaneamente as duas categorias mostradas na Figura 158 (materiais orgânicos e inorgânicos) os autores encontraram índices de simultaneidade em torno de 12% para as condições de inverno e entre 0,4 e 2,5% para condições de verão. Esse resultado reforça as observações acima quanto ao **conflito potencial entre os requisitos de conforto humano e os requisitos de conservação das coleções.** Cabe ainda destacar a dificuldade de obter resultados similares considerando as zonas de conforto da população brasileira, devido a sua grande variabilidade, como demonstra a Figura 157.

KRUGER e DINIZ (2010) discutem a relação entre o *IETP* (vide seção A.3 do Apêndice A) e o *PMV* calculados a partir de monitoramento ambiental realizado em três arquivos brasileiros, encontrando uma relação inversamente proporcional entre eles, o que também vem a reforçar o conflito em potencial discutido acima. Os autores destacam o fato de grande parte do território brasileiro apresentar altos índices de umidade relativa ao longo do ano, combinados com altas temperaturas DINIZ e SOUZA (2002) discutem o conflito potencial entre a guarda e o acesso aos acervos por meio da investigação de um estudo de caso.

BERNARDI (2008, seção 3.9) compara zonas de segurança de coleções de papel com zonas de conforto humano proposta pela ASHRAE. LEHMBRUCK (1974) faz o mesmo, sem citar, contudo as fontes bibliográficas consideradas:

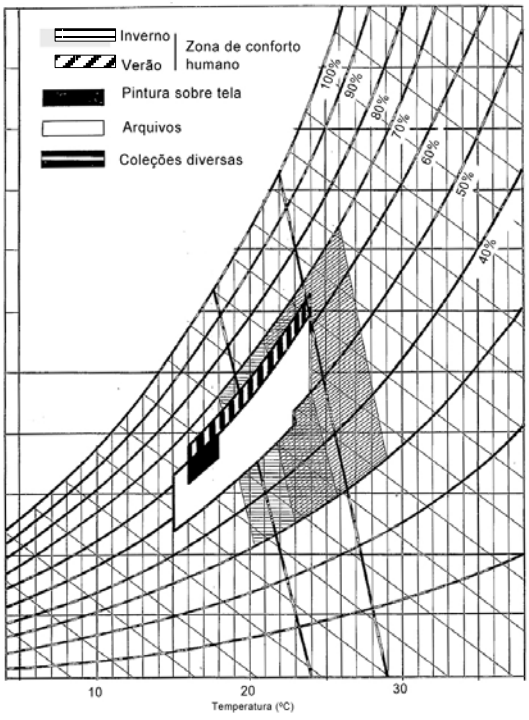


Figura 159 – Comparação entre zona de segurança ambiental para pinturas sobre tela, arquivos e coleções diversas com zonas de conforto humano. Adaptado de: (LEHMBRUCK, 1974, p.204).

Tabela 27 – Zonas de segurança ambiental propostas na literatura para coleções diversas e com artefatos de madeira.

Referência	***UR* segura (%)**	***UR* admis. (%)**	***T* (ºC)**	***T* admis. (ºC)**	**Observação**
ASHRAE (2007); MICHALSKI, 2007; MICHALSKI e GRATTAN, 2007		25-75			Prevenção de mofo, classe C
BROWN (2002)	45-65		18-24		Coleções diversas, climas temperados
BS 5454 (BSI, 2000)	45-60	40-65	16-19		Coleções diversas, uso frequente
ERHARDT E MECKLENBURG (1994)	40-70	30-80			
KERSCHNER (1992)	35-50		21-24		
LEHMBRUCK (1974)	60-65		16-24		Coleções diversas
MECKLENBURG E TUMOSA (1999)	35-60				Coleções diversas
MECKLENBURG (2007a, 2007b)	37-53	30-80	19-23	13-23	Parâmetros adotados na Smithsonian Institution
MECKLENBURG (2010)	30-70	20-80	19-23		Estabilidade mecânica
OGDEN (2001)	35-45	30-50		21	Coleções diversas
PADFIELD (s.d.a)	35-65				Coleções diversas
PAS 198 (BSI, 2011)	30-65	65	16-30	30	Estabilidade mecânica de materiais orgânicos com baixa vulnerabilidade
SEBERA (2001)		20-65			Ressecamento de papel, prevenção de mofo
THOMSON (1986)	50-60	40-70			
UNI 10829 (UNI, 1999)	50-60		19-24		
UNI EN 15757 (UNI, 2010)	60-83		16,6-22,6		7º. a 93º. percentil da amostra
Limites propostos com base no monitoramento da Capela da Ceia	**60-75**		**16-25**		

A Figura 160 e a Tabela 27 comparam diferentes limites de temperatura e umidade relativa considerados seguros para coleções com artefatos de madeira ou diversas, encontrados na literatura. Cabe lembrar, conforme se discutiu na seção 2.4.3, que o gerenciamento ambiental contemporâneo objetiva mais propriamente o controle das flutuações ambientais, de acordo com a classe de vulnerabilidade dos materiais, do que o estabelecimento de padrões rígidos (ASHRAE, 2007, p. 21.12; MICHALSKI, 1994, 2000; MICHALSKI e GRATTAN, 2007).

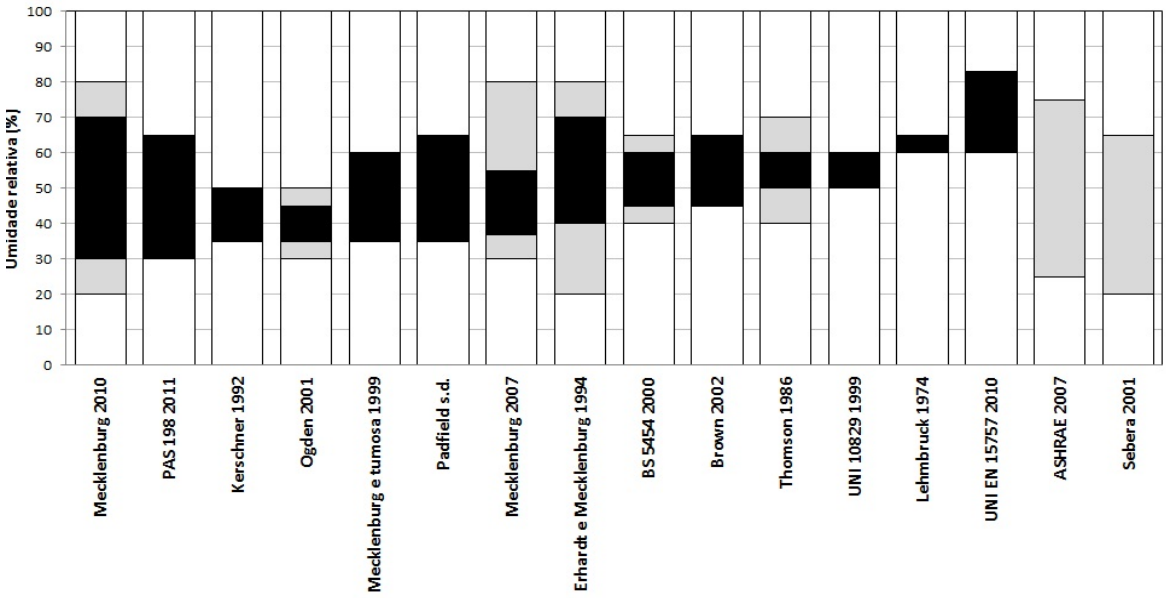


Figura 160 – Comparação de limites de *UR* "seguros" propostos na literatura para artefatos de madeira ou coleções diversas.

B.3- Estado da arte no Brasil

A ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído reúne a comunidade de pesquisadores de Conforto Ambiental em um Grupo de Trabalho específico, abrangendo diversos tópicos como conforto térmico, conforto acústico, conforto luminoso, ergonomia, e suas relações com a eficiência energética em edificações. Segundo a ANTAC[152], os Encontros Nacionais sobre Conforto no Ambiente Construído (ENCACs)

> foram sendo gradualmente consagrados como principal fórum brasileiro e um dos mais importantes latino-americanos em seu campo específico de conhecimento. Tal reconhecimento se deve à crescente qualidade acadêmica dos artigos, cursos e conferências apresentados nestes encontros e que proporcionam reais oportunidades de integração e atualização ao conjunto dos especialistas da área. O primeiro ENCAC foi realizado em Gramado, RS, em junho de 1990.

O GT de Conforto Ambiental da ANTAC vem trabalhando junto à ABNT para o estabelecimento de normas técnicas nacionais sobre conforto e eficiência energética nas edificações. Em 2005 entraram em vigor cinco normas técnicas na área de desempenho térmico de edificações: NBR 15220 (ABNT, 2005) e quatro na área de iluminação natural (NBR 15215). A norma de desempenho de edificações habitacionais, NBR 15575, foi

[152] http://www.antac.org.br/grupos/conforto-ambiental-e-eficiencia-energetica (Acesso em 28/05/2013).

publicada em maio de 2008 e entrou em vigor em março de 2013. SORGATO et al. (2012) avaliaram os impactos negativos desta última norma no desempenho térmico dos edifícios.

Nesse contexto, cabe enfatizar a contribuição dos laboratórios de Conforto Ambiental das universidades federais, destacando-se o LabEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC.

De acordo com KRUGER e DINIZ (2010), nos últimos anos houve um esforço considerável, de centros de pesquisa e programas governamentais para promover medidas de conservação de energia de conservação em vários sectores, no Brasil. Segundo eles, O PROCEL Edifica[153] é um dos principais programas que visam promover o uso racional de energia elétrica em edifícios. A trajetória do PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica foi registrada por (BRASIL, 2006). Os autores se referem ainda ao RTQ-C - Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (BRASIL, 2010). O RTQ-C especifica os requisitos técnicos necessários para a avaliação, bem como os métodos para classificação de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos quanto à Eficiência Energética.

B.4- Zoneamentos bioclimáticos como ferramenta de projeto

As metodologias de análise climática com vistas à obtenção de recomendações arquitetônicas são instrumentos importantes na fase de pré-projeto das edificações. Elas indicam ao arquiteto as estratégias bioclimáticas mais adequadas a serem adotadas nos edifícios, de acordo com o programa de atividades do mesmo e em função da caracterização climática do sítio (MACIEL, 2006).

Na fase inicial do processo de projeto, não é de uso comum uma avaliação detalhada dos dados climáticos por parte dos arquitetos, mesmo porque na grande maioria dos casos, não há dados climáticos detalhados disponíveis ou eles não são estritamente necessários. Geralmente, os projetistas têm acesso a dados médios mensais de temperatura, precipitação e umidade, gerados por estações meteorológicas nos principais centros urbanos e aeroportos.

[153]http://www.eletrobras.com/elb/main.asp?ViewID={F9A71E97-D6DA-4EB4-84DF-1097E8EC081D} (Acesso em 01/09/2012).

Desta forma, uma metodologia de análise climática na fase de pré-projeto busca fornecer, a partir de corpo resumido de dados, diretrizes simplificadas que possam orientar as decisões iniciais do projeto. Para isso, o método a ser adotado deve ser didático, não apenas resultando num rol de recomendações a serem seguidas, mas também explicando o porquê da sua adequação. Neste campo as ferramentas computacionais evoluíram pouco, em relação às ferramentas de simulação computacional do tipo CFD, que até mesmo por deficiências na formação tendem a ser encaradas pelos arquitetos como verdadeiras "caixas-pretas".

Visando a eficiência energética e o conforto dos usuários, zoneamentos climáticos têm se constituído em objeto de estudo de pesquisadores, na área de conforto e eficiência energética no ambiente construído, e vêm paulatinamente sendo incorporados a leis, normas, códigos e recomendações em nível nacional e regional. Os critérios de conforto e desempenho termoenergético variam de local para local. Via de regra, na Europa e na América do Norte, regiões de clima preponderantemente frio, o critério de desempenho termoenergético comumente adotado é o de “graus-dia” ou “graus-hora”.

O manual de fundamentos da ASHRAE (2009) em seu capítulo 14, que trata de informações climáticas para o projeto, explica que esses parâmetros são úteis em métodos que envolvem estimativas de consumo energético. Eles também são usados para classificar locais segundo as zonas climáticas definidas na norma ASHRAE 169. Para o cálculo dos “graus-dia” de refrigeração ou de aquecimento, é arbitrada uma *temperatura base (Tb).* O manual da ASHRAE apresenta dados para *Tb*=10ºC e 18,3ºC. A Temperatura média diária *(Ti_{med})* é considerada como sendo a média aritmética entre a máxima e a mínima diária. Os “graus-dia” de refrigeração são então definidos para cada mês, como o somatório das diferenças diárias (Ti_{med} - *Tb*) dentro daquele mês. Igualmente, os “graus-dia” de aquecimento são definidos como o somatório das diferenças diárias (*Tb* - Ti_{med}). Somando-se os “graus-dia” mensais, obtêm-se os “graus-dia” anuais. O conceito de “graus-hora” é análogo ao de “graus-dia”, porém considerando-se médias horárias, ao invés de médias diárias. Neste caso o manual da ASHRAE (2009) adota como base as temperaturas 23,3ºC e 26,7ºC.

O Código Internacional de Conservação de Energia (IECC)[154] utiliza essa metodologia para a definição das zonas climáticas nos Estados Unidos[155,156].

[154] http://reca-codes.org/pages/current_code.html (Acesso em 15/08/2011).

Na Europa, as iniciativas em termos de legislação convergem na Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD)[157,158], a qual exige que todos os países da União Europeia melhorem sua legislação de construção e executem ações de certificação energética de edifícios. A norma relativa ao desempenho energético dos edifícios (2002/91/CE) é o principal instrumento legislativo, nesse sentido. Os países membros devem aplicar os requisitos mínimos no que diz respeito ao desempenho termoenergético dos edifícios novos e existentes, garantir a certificação desse desempenho e realizar inspeção regular de instalações. Em 18 de Maio de 2010, uma reformulação da norma (2002/91/CE) [159] foi aprovada, a fim de reforçar os requisitos de desempenho termoenergético e para esclarecer e simplificar alguns dos seus dispositivos. ERHORN e KLUTTIG (2010) ao relatar as mudanças nos procedimentos nacionais necessárias para a implementação da EPBD, apontam que diferentes abordagens são utilizadas pelos países membros, sendo consenso o uso da norma ISO 13790 (2004).

No âmbito da CPBE foi publicado o livro de TOMBAZIS et al. (2004) que trata da **sustentabilidade e eficiência energética especificamente em edifícios que abrigam coleções** (vide seção 2.1).

Dentre as normativas europeias, destaca-se, em Portugal, o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado em 1990, e que vem sendo revisado regularmente (a última revisão foi em 2006) [160], o qual passou a regular projetos de novos edifícios e grandes reformas, em termos de condições de conforto térmico e do consumo energético em situações de verão e de inverno. A lei portuguesa inclui o zoneamento bioclimático do país, e critérios baseados no cálculo de “graus-dia” para cada

---

[155] O mapa de zoneamento climático americano proposto pelo IECC está disponível em http://reca-codes.org/pages/iecc2009.html (Acesso em 15/08/2011).

[156] Uma explicação mais detalhada da relação entre as zonas climáticas do IECC e a metodologia de “graus-hora” pode ser encontrada em http://mapawatt.com/2010/11/19/climate-zones-and-degree-days/ (Acesso em 15/08/2011)

[157] http://ec.europa.eu/energy/index_en.htm

[158] http://www.epbd-ca.org/index.cfm?cat=home

[159] Disponível em http://eur-lex.europa.eu/JOHtml.do?uri=OJ:L:2010:153:SOM:EN:HTML (Acesso em 15/08/2011)

[160] Disponível em http://www.adene.pt/NR/rdonlyres/AFFCB805-B160-43EA-A83C- 6EED4EB42945/ 43/Decretolein80_2006.pdf (Acesso em 15/08/2011)

zona. As estratégias bioclimáticas propostas estão baseadas no diagrama bioclimático de Givoni. É a ADENE – Agência Portuguesa de Energia que coordena a EPBD.

Na América Latina cabe citar como exemplo de propostas de zoneamento que utilizam essa metodologia, as legislações do Chile (2006) [161] e da Argentina (1996) [162].

B.5- Zoneamento bioclimático brasileiro

No Brasil, desde a década de 1980 desenvolvem-se estudos para aplicar os conhecimentos de conforto ambiental e arquitetura bioclimática à melhoria da eficiência energética das edificações.

Segundo BARBOSA et al (2003, p. 135) “as pesquisas no IPT[163] tiveram início em 1981 com o trabalho Formulação de Critérios para Avaliação de Desempenho de Habitações, realizado para o antigo Banco Nacional da Habitação”. Essa autora apresenta e comenta em sua tese de doutorado (BARBOSA, 1997, p. 8 e segs.) a cronologia de trabalhos do IPT nessa área, de onde são destacados a seguir aqueles em que constam zoneamentos bioclimáticos.

A apostila “Conforto higrotérmico: avaliação de desempenho de habitações térreas unifamiliares” (IPT, 1981) apresentava uma proposta de normalização para todo o território brasileiro, considerando onze zonas climáticas de verão e nove zonas climáticas de inverno. Para a definição das primeiras foi considerada a variável radiação solar.

Posteriormente, o IPT publicou um “Manual de procedimentos para avaliação do desempenho térmico de edificações habitacionais e escolares" (AKTSU et al, 1987), que propunha a divisão do estado de São Paulo em onze zonas climáticas, indicando para cada uma as estratégias de projeto adequadas para a melhoria do desempenho termoenergético das edificações. Neste trabalho, a referência considerada, em termos de conforto térmico humano foi a norma ASHRAE 55/81. Para a caracterização das condições climáticas, os autores propuseram uma metodologia de coleta e tratamento dos dados necessários para determinar dias típicos de verão e inverno.

---

[161] O programa chileno de regulamentação térmica de edificações começou a ser implantado em 1994.

[162] A norma argentina IRAM 11603 foi publicada pela primeira vez em 1978. CZAJKOWSKI et al (1997) discorrem sobre os seus antecedentes.

[163] Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Em 1993, AKUTSU e VITTORINO apresentaram uma nova proposta para definição dos critérios de desempenho de edificações, sendo indicados três níveis (A, B e C), formulados em função do comportamento das edificações nos períodos de inverno e verão. Nesta proposta a referência em termos de conforto térmico humano já é a norma ISO 7730.

SILVA (1994) propôs um zoneamento bioclimático brasileiro para fins de edificação, tendo sido publicado nos anais do III ENCAC – Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (SILVA et al., 1995). O zoneamento proposto foi baseado nas temperaturas máximas e mínimas mensais disponíveis nas normais climatológicas (BRASIL, 1992) de 204 cidades brasileiras, bem como no diagrama bioclimático de Givoni. Para obtenção das zonas mostradas na figura, Silva calculou as umidades relativas máximas e mínimas, usando algoritmos da ASHRAE. Depois considerou os desvios de temperatura em relação aos limites das seguintes zonas do diagrama bioclimático de Givoni: conforto, ventilação, massa térmica para resfriamento e resfriamento evaporativo (desvios menores que 0,5ºC foram considerados nulos). Desta forma, ele determinou quais estratégias do diagrama de Givoni seriam aplicáveis em cada um dos 204 pontos testados. Em seguida, obteve uma distribuição espacial das estratégias utilizando um **algoritmo de interpolação ótima (autocovariância),** em um programa de geoprocessamento. Para decidir que estratégia propor nos pontos onde mais de uma estratégia era aplicável, ele utilizou os seguintes critérios baseando-se no "custo e na complexidade arquitetônica": i) ventilação ou massa térmica = ventilação; ii) todas possíveis = ventilação; iii) massa térmica ou resfriamento evaporativo = massa térmica. A Figura 161 mostra o zoneamento obtido por Silva.

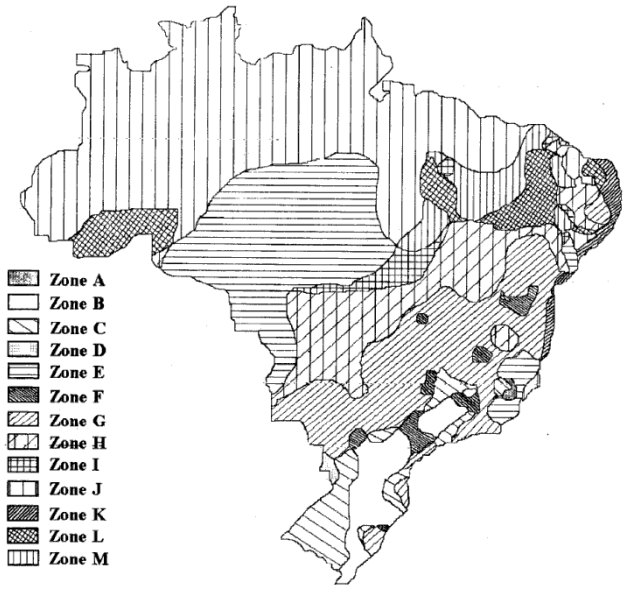


Figura 161 – Zoneamento bioclimático brasileiro proposto por SILVA et al. (1995).

AKUTSU et al. (1995) propõem um método de avaliação expedito, viável para usuários leigos, sem necessidade de cálculos por computador, aplicável a habitações populares, em que o território nacional é dividido em oito zonas climáticas. Segundo BARBOSA (1997), "a consulta aos quadros sínteses, por região climática e por estação (verão ou inverno), permite identificar o sistema construtivo mais adequado àquela região e a compatibilidade do sistema construtivo para o desempenho de verão e de inverno". Essa metodologia foi desenvolvida com recursos da FINEP e posteriormente inserida na publicação "Critérios mínimos de desempenho de habitações térreas de interesse social – texto para discussão" (AKTSU et al., 1998).

O zoneamento proposto por AKUTSU et al. (Figura 162) foi baseado no cruzamento das distribuições espaciais das temperaturas médias das máximas e médias das mínimas mensais (disponíveis nas normais climatológicas), da amplitude térmica anual média e da umidade relativa média anual. Esta proposta constituiu a primeira base para a discussão do projeto de norma técnica conduzido pelo LabEEE/UFSC, entre os anos de 1995 e 2005.

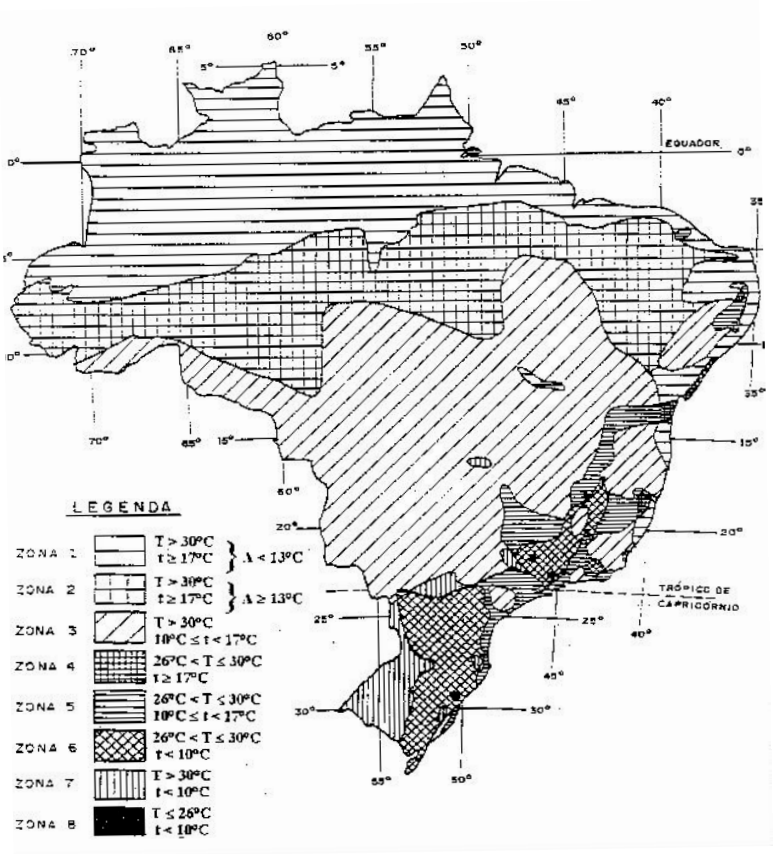


Figura 162 – Zoneamento bioclimático brasileiro proposto por AKUTSU et al. (1998).

Em 1998, o zoneamento proposto pelo IPT foi alterado, mantendo-se o número de zonas climáticas em oito, porém alterando-se a distribuição espacial, em função da inclusão, na metodologia, de um diagrama bioclimático de Givoni adaptado (Figura 164). A metodologia utilizada na norma é descrita detalhadamente por RORIZ et al. (1999a, 1999b, 2001). Inicialmente o território brasileiro foi dividido em 6500 células. As temperaturas médias de 330 cidades (Figura 163) disponíveis nas normais climatológicas (BRASIL, 1992) foram interpoladas considerando médias ponderadas entre quatro células vizinhas (acima, abaixo, à esquerda e à direita). Na ponderação, as células com dados medidos tiveram peso quatro e as demais, peso um. As umidades relativas para as 330 cidades foram calculadas utilizando algoritmos da ASHRAE (2009) e interpoladas pelo mesmo processo utilizado com as temperaturas. Em seguida o clima de cada uma das 6500 células foi classificado, plotando-se, sobre o diagrama mostrado na Figura 164, uma reta representativa de cada mês do ano, para cada célula. Uma vez definida a combinação de estratégias aplicáveis para cada célula, (vide como exemplo o Quadro 8), utilizou-se um programa de geoprocessamento para fazer a espacialização dos dados, resultando no mapa mostrado na Figura 165, o qual foi incluído na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005) vigente atualmente.

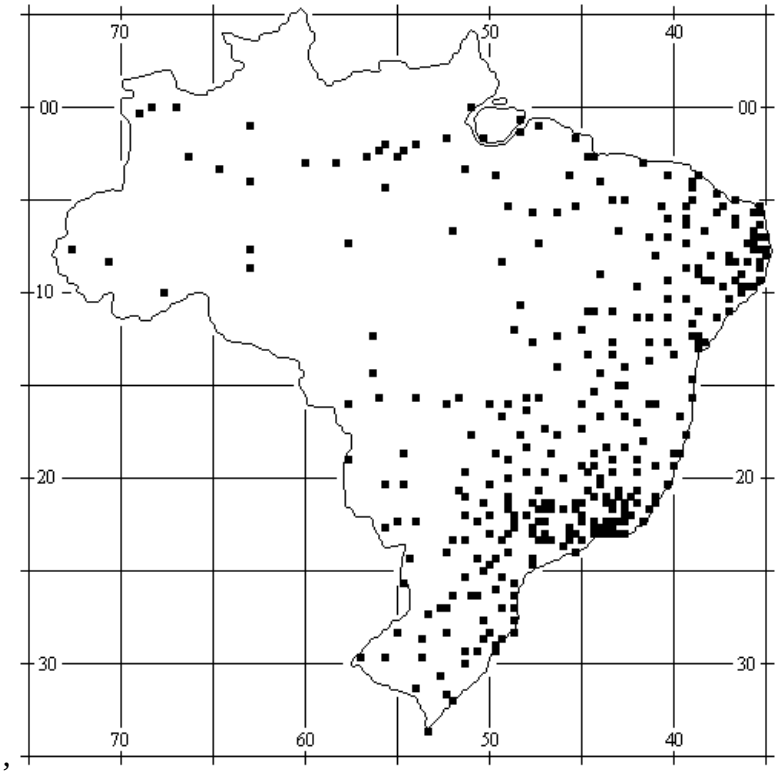


Figura 163 – Localização das cidades brasileiras com normais climatológicas disponíveis. Fonte: Anteprojeto da norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005). (Acesso em 16/08/2011)

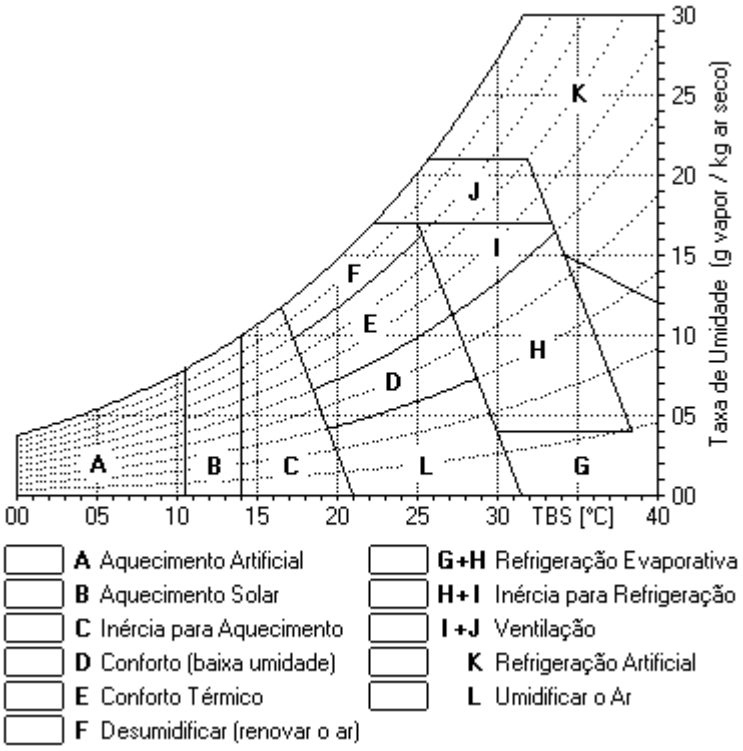


Figura 164 – Diagrama bioclimático de Givoni adaptado, utilizado na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005).
Fonte: http://roriz.dominiotemporario.com/doc/ZBBR.ZIP (Acesso em 16/08/2011)

A cronologia do processo de desenvolvimento da norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005), que propõe um zoneamento bioclimático brasileiro foi registrada detalhadamente e comentada por GHISI et al. (2003). Cabe destacar que o diagrama mostrado na Figura 164 foi adaptado a partir do diagrama bioclimático de Givoni, considerando elementos da metodologia de classificação climática desenvolvida por Carl Mahoney, discutida na próxima seção. A NBR 15220-3 indica para cada cidade classificada, as estratégias arquitetônicas aplicáveis, por meio de um código alfabético (Quadro 8).

Quadro 8 – Estratégias bioclimáticas aplicáveis a algumas cidades mineiras, segundo a NBR 15220-3. (ABNT, 2005)

Zona	Cidade	Estratégias
1	(*)Nenhuma cidade mineira foi classificada na Zona 1 (clima temperado)	ABCF
2	Ibirité, Itajubá, Machado	ABCFI
3	Barbacena, Belo Horizonte, Curvelo, Diamantina, Grão Mogol, Itabira, Itamarandiba	BCFI
4	Oliveira, Patos de Minas, Pirapora	BCDFI
5	Governador Valadares, Teófilo Otoni	CFIJ
6	Espinosa, Frutal, Januária, Montes Claros	CDFHI
7	Monte Azul	DFHI
8	(*)Nenhuma cidade mineira foi classificada na Zona 8 (clima tropical úmido)	FIJK

A norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005) apresenta o detalhamento das estratégias mostrado no Quadro 9:

Quadro 9 – Detalhamento das estratégias bioclimáticas propostas na norma NBR 15220-3. (ABNT, 2005)

Estratégia	Detalhamento
A	O uso de aquecimento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por frio.
B	A forma, a orientação e a implantação da edificação, além da correta orientação de superfícies envidraçadas, podem contribuir para otimizar o seu aquecimento no período frio por meio da incidência de radiação solar. A cor externa dos componentes também desempenha papel importante no aquecimento dos ambientes por meio do aproveitamento da radiação solar.
C	A adoção de paredes internas pesadas pode contribuir para manter o interior da edificação aquecido.
D	Caracteriza a zona de conforto térmico (a baixas umidades).
E	Caracteriza a zona de conforto térmico.
F	As sensações térmicas são melhoradas por meio da desumidificação dos ambientes. Esta estratégia pode ser obtida por meio da renovação do ar interno por ar externo por meio da ventilação dos ambientes.
G e H	Em regiões quentes e secas, a sensação térmica no período de verão pode ser amenizada por meio da evaporação da água. O resfriamento evaporativo pode ser obtido por meio do uso de vegetação, fontes de água ou outros recursos que permitam a evaporação da água diretamente no ambiente que se deseja resfriar.
H e I	Temperaturas internas mais agradáveis também podem ser obtidas por meio do uso de paredes (externas e internas) e coberturas com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite quando as temperaturas externas diminuem.
I e J	A ventilação cruzada é obtida por meio da circulação de ar pelos ambientes da edificação. Isto significa que se o ambiente tem janelas em apenas uma fachada, a porta deveria ser mantida aberta para permitir a ventilação cruzada. Também se deve atentar para os ventos predominantes da região e para o entorno, pois este pode alterar significativamente a direção dos ventos.
K	O uso de resfriamento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por calor.
L	Nas situações em que a umidade relativa do ar for muito baixa e a temperatura do ar estiver entre 21 e 30°C, a umidificação do ar proporcionará sensações térmicas mais agradáveis. Essa estratégia pode ser obtida por meio da utilização de recipientes com água e do controle da ventilação pois esta é indesejável por eliminar o vapor proveniente de plantas e atividades domésticas.

Uma versão eletrônica do zoneamento bioclimático brasileiro pode ser encontrada no programa *ZBBR*, desenvolvido por Maurício Roriz, da Universidade Federal de São Carlos[164].

[164] http://roriz.dominiotemporario.com/doc/ZBBR.ZIP ou http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/softwares/ZBBR.zip (Acesso em 18/08/2011)

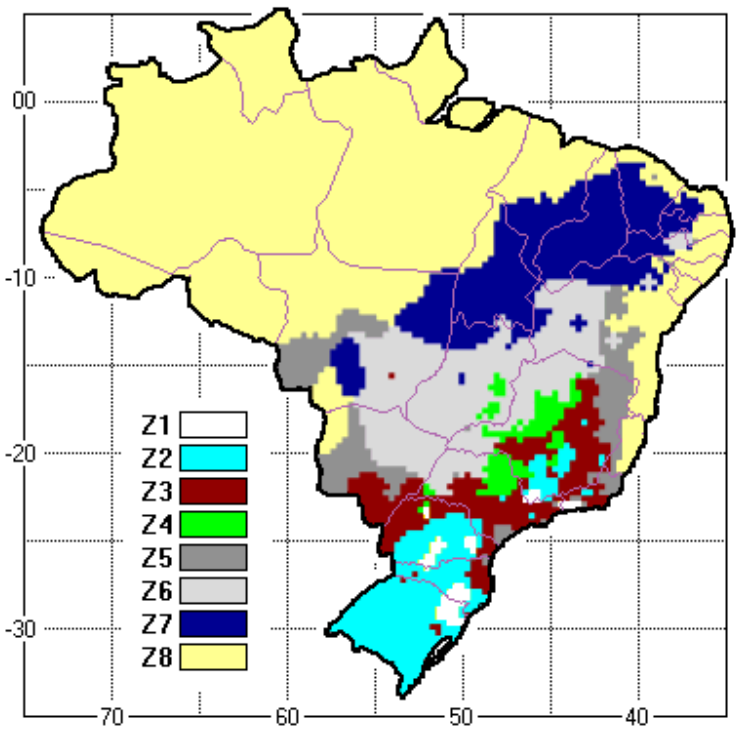


Figura 165 – Zoneamento bioclimático brasileiro proposto na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Fonte: http://roriz.dominiotemporario.com/doc/ZBBR.ZIP (Acesso em 16/08/2011)

B.5.1- Limitações e revisão do zoneamento bioclimático proposto na norma NBR 15220-3

Apesar de um período relativamente longo de discussão e elaboração, antes de sua publicação, algumas limitações da norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005) vem sendo apontadas em trabalhos científicos da área de conforto ambiental. PEREIRA e ASSIS (2005a, 2005b) verificaram algumas diferenças entre as recomendações da norma e o desempenho térmico passivo de edificações em Belo Horizonte, sobretudo no que diz respeito às características construtivas das envoltórias. Segundo as autoras,

> Esta divergência de resultados parece ser devida à extrapolação do diagrama de Givoni para todo o território nacional (mesmo que adaptado), proposta pelo Projeto de Norma, quando é sabido que este índice de conforto não poderia ser aplicado a populações adaptadas a climas úmidos, por exemplo, a climas tropicais úmidos. (...) Tais divergências acabam gerando recomendações diferentes para as construções em cada domínio climático, em função da aclimatação dos habitantes. (PEREIRA e ASSIS, 2005b, p. 1488).
>
> Com relação aos ambientes não residenciais, os resultados apresentados demonstraram que o mais adequado não seria recomendar o uso de determinados materiais nas envoltórias, mas sim de desempenho energético das edificações, visto que a solução que se mostrou mais adequada para ambientes residenciais (utilização de paredes com inércia e coberturas isoladas e refletoras) depende da relação entre carga térmica e o volume de ar do ambiente, ou seja, da baixa ocupação dos ambientes (PEREIRA e ASSIS, 2005a, p. 1496).

BASTOS et al. (2007) apontam que o zoneamento proposto na NBR 15220-3 (ABNT, 2005) não considerou a altitude e o regime de ventos específico de cada célula / zona, o que pode acarretar proposições errôneas de diretrizes arquitetônicas bioclimáticas. Os autores apresentam uma superposição do mapa mostrado na Figura 165 com um mapa de distribuição do potencial eólico no território brasileiro e analisam as diferenças encontradas em cada zona bioclimática. Eles chegam a afirmar (p. 179) que, em virtude das deficiências apontadas, o zoneamento da NBR 15220-3 não cumpre o seu propósito, sendo necessária uma revisão da mesma.

CÓSTOLA (2006) aponta que a norma não considerou aspectos de ventilação natural na classificação proposta. Já BOGO (2005) baseia sua crítica no fato do diagrama bioclimático de Givoni não indicar explicitamente estratégias de sombreamento, para o controle da insolação direta, uma das principais estratégias para melhoria do desempenho térmico das edificações nos períodos de calor, necessário para a maior parte do território brasileiro, dominantemente tropical. Em contraponto, cabe lembrar que a metodologia de Mahoney (discutida na próxima seção), também considerada no zoneamento bioclimático proposto na norma, incorpora essa indicação. Aliás, para a análise do rigor térmico de Santa Catarina, o autor emprega o método de Mahoney. Sobre isso, Bogo argumenta que

> **o Método das tabelas de Mahoney**, com diagnóstico do rigor climático para o clima local das cidades analisadas, assim como a definição de recomendações de projeto em nível de implantação da edificação no terreno, espaçamento, movimento do ar, tamanho e posição das aberturas, proteção das aberturas para Sol e chuva, diretrizes construtivas para paredes e coberturas, **consiste num método de apoio ao desenvolvimento do projeto de arquitetura de grande valia, pois trabalha claramente com as varáveis de concepção da arquitetura, sendo de fácil aplicação a partir de dados simplificados do clima local. No entanto, o rigor climático identificado segundo o método de Mahoney para algumas cidades localizadas em Santa Catarina, apresenta situações diferentes para alguns meses do ano quando comparado à sensação térmica experimentada in loco** (BOGO, 2005, p.335, grifos nossos).

Em outro texto, BOGO (2008) faz as considerações abaixo e novamente usa o método de Mahoney para obter recomendações arquitetônicas para seis diferentes estados brasileiros e compará-las com as recomendações provenientes da norma NBR 15220-3.

> A norma brasileira recentemente aprovada em 2005, em parte tem limitações por não contemplar algumas diretrizes construtivas e estratégias de condicionamento térmico passivo para cidades com clima subtropical, com exigências de desempenho térmico de controle solar para o verão; por definir como um dos parâmetros de diretrizes construtivas (no anexo informativo) o fator de calor solar somente de elementos opacos (paredes; coberturas) para cada uma das zonas bioclimáticas, sem menção ao fator de calor solar de elementos transparentes (janelas), em geral mais importante para o estudo dos ganhos de calor numa edificação; e a definição de altos

> valores máximos admissíveis de transmitância térmica para coberturas, não representativos de situações de coberturas com isolamento térmico. (BOGO, 2008, p. 2)

RORIZ (2012c) destaca os seguintes aspectos: (i) o pequeno número de municípios com dados publicados nas Normais Climatológicas, que conduziu ao procedimento de interpolação; (ii) apesar do direcionamento da proposta para habitações unifamiliares, o zoneamento tem aplicado a outras tipologias, por ser o único disponível; (iii) pequena homogeneidade climática resultante do agrupamento de pontos com recomendações bioclimáticas semelhantes; (iv) críticas publicadas em eventos científicos nacionais, das quais grande parte se justificaria devido à imprecisão na classificação climática de cidades brasileiras.

RORIZ (2012c) propôs então uma revisão do zoneamento bioclimático brasileiro, com base em dados de 610 municípios, correspondendo a 11% do total de municípios brasileiros. De acordo com a proposta, para os demais municípios as temperaturas médias e mínimas anuais e mensais seriam calculadas por um modelo de regressão linear múltipla, cujos dados de entrada são latitude, longitude, altitude e distância até o oceano, medida sobre o paralelo de latitude. Para a espacialização dos dados o território brasileiro foi dividido em 233456 células com aproximadamente 6x6km e foi utilizado o método de interpolação *kriging* em um programa de geoprocessamento. Para o agrupamento dos pontos RORIZ (2012c) propõe critérios baseados nas temperaturas e amplitudes médias anuais, diferença entre a maior e menor temperatura média mensal e diferença entre a maior e menor amplitude térmica mensal, em cada ponto, determinando 20 diferentes zonas climáticas.

Para apoiar a discussão da revisão, foi disponibilizado em dezembro de 2012 o programa *RevZBBR*, na página de internet do LabEEE/UFSC[165].

[165] http://www.labeee.ufsc.br/downloads/softwares/revzbbr (Acesso em 28/08/2013).

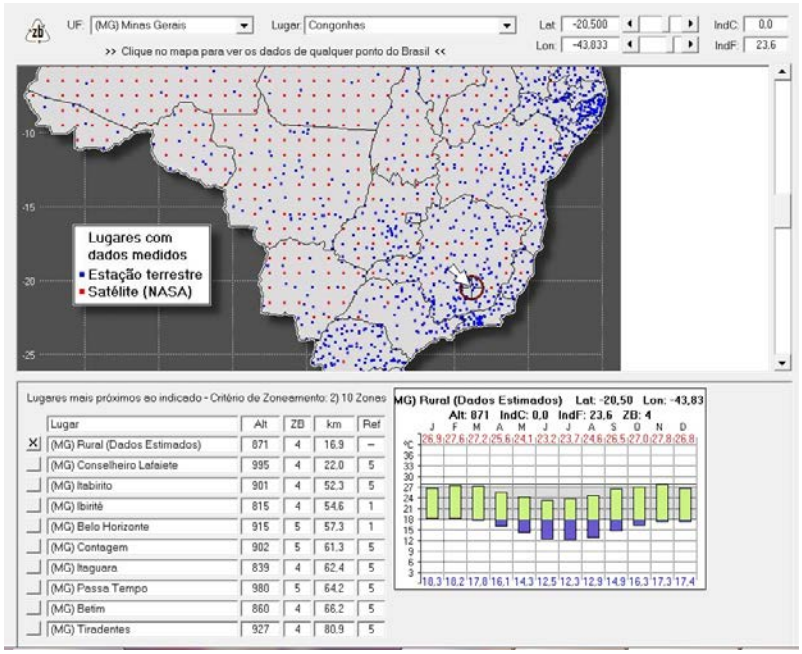


Figura 166 – Tela do programa *RevZBBR* mostrando as temperaturas estimadas para Congonhas pelo modelo de regressão linear múltipla do programa.

O programa permite estimar médias mensais de temperaturas mínimas e máximas para qualquer ponto do país. A base de dados utilizada abrange dados medidos em 1592 pontos, sendo 1116 em estações de solo e 476 obtidos por satélite (NASA). As temperaturas no resto do território foram estimadas por interpolação *kriging*. A Figura 167 mostra as três possibilidades diferentes de agrupamento dos pontos, com base nas temperaturas estimadas e no percentual de frio e calor com base em zona de conforto humano.

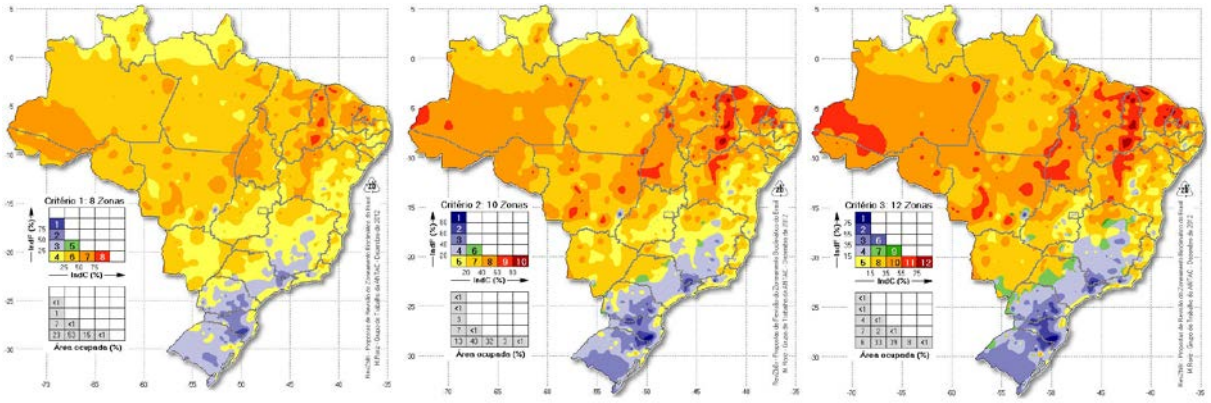


Figura 167 – Propostas de agrupamento para revisão do zoneamento bioclimático brasileiro, com oito, dez e doze zonas. Fonte: Programa *RevZBBR*.

B.5.2- As tabelas de Mahoney

O conceito inicial das **tabelas de Mahoney**[166] foi desenvolvido em 1969, quando os consultores Robert Mathew e Johnson Marshall elaboravam diretrizes para o projeto de escolas secundárias na Nigéria, com um financiamento do Banco Mundial. O arquiteto Carl Mahoney[167], da *Architectural Association School*, Londres, foi incorporado à equipe como responsável pelos estudos climáticos.

As tabelas foram desenvolvidas para responder a duas questões básicas apresentadas pela equipe de projetistas: (i) Como a arquitetura deveria mudar em resposta às flutuações climáticas? (O clima na Nigéria apresenta grande diversidade, variando de quente-úmido no litoral a quente-desértico na porção continental); (ii) Qual a região geográfica a que se aplicam as recomendações desenvolvidas a partir da análise climática?

O método desenvolvido por Mahoney vem sendo usado desde então, por cerca de trinta anos, em diversos países e contextos climáticos. Os dados disponíveis em normais climatológicas são anotados em planilhas específicas e comparados com limites de conforto pré-estabelecidos. Esta comparação permite identificar grupos de problemas climáticos dominantes e, para cada grupo, obter recomendações técnicas de projeto.

O trabalho foi publicado pela primeira vez em uma monografia da ONU (1971), cuja autoria Mahoney dividiu com os profs. Martin Evans e Otto Koenigsberger. Este trabalho já incluía os ajustes resultantes do teste da metodologia em mais de 50 contextos climáticos diferentes e trazia exemplos de recomendações em seis climas diferentes. Esta publicação original circulou principalmente entre os órgãos governamentais e teve uma distribuição reduzida nos meios acadêmicos e de pesquisa. Com a inclusão no *Manual of Tropical Housing* (KOENIGSBERGER et al., 1977), as tabelas tornaram-se bem mais conhecidas e foram publicadas em diversos idiomas.

---

[166] A nomenclatura mais adequada - contudo raramente encontrada na literatura - seria *quadros de Mahoney*, uma vez que a informação numérica predomina apenas nas três primeiras tabelas empregadas na metodologia, e a informação textual predomina nas demais. Entretanto, como a publicação original (ONU, 1971) utiliza o termo *tabela*, e esta é a terminologia mais comumente encontrada na bibliografia, ela foi mantida neste trabalho.

[167] A *home page* do escritório Carl Mahoney and associates é: cma.alphalink.com.au/index.html (Acesso em 16/08/2011).

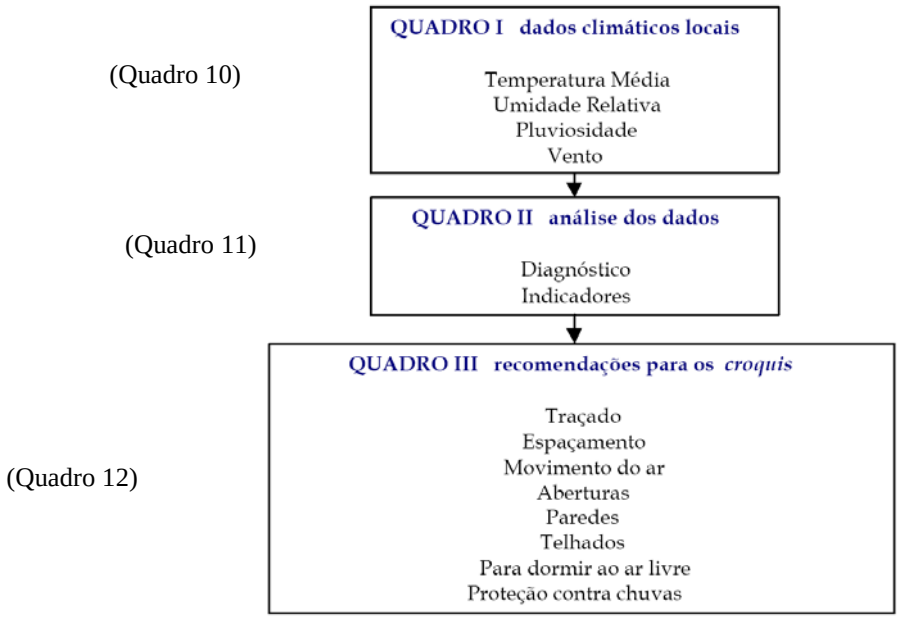


Figura 168 – Estrutura geral do método de Mahoney, segundo Koenigsberger (apud HARRIS, 2000).

EVANS (2007, p.4) aponta a utilidade de metodologias expeditas de análise climática, como a das tabelas de Mahoney, no estabelecimento de zoneamentos climáticos com base em critérios simples, e cita como exemplo a norma IRAM 11603 (ARGENTINA, 1996). No Brasil, além de ser empregada como base na formulação do zoneamento bioclimático proposto na norma NBR 15220-3, conforme se discutiu acima, as tabelas de Mahoney foram também consideradas como um auxiliar interessante para as fases iniciais de planejamento urbano, tendo sido incluídas no modelo proposto pelo IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal em seu guia para elaboração de código de obras e edificações (BAHIA, 1997).

Roteiro de preenchimento das tabelas

A seguir é apresentada uma descrição resumida do método, ilustrada na Figura 168. Descrições detalhadas podem ser encontradas em (ONU, 1971; KOENIGSBERGER, 1977; MASCARÓ, 1983; EVANS, 2007). As tabelas estão disponíveis também em formato de planilhas eletrônicas[168] e programas computacionais: *ARQUITROP* (Brasil)[169] e *ARCHIPAK* (Austrália).

[168] Veja-se, por exemplo, a versão em excel desenvolvida por Hans Rosenlund, da Universidade de Lund, disponível em http://www.arq.utfsm.cl/talleres/2011-01-avanzado-4/wp-content/blogs.dir/52/files_mf/1300974195hojaclim%C3%A1ticaValpara%C3%ADso.xls (Acesso em 18/08/2011)

[169] Uma descrição detalhada do programa pode ser encontrada em <http://www.arquitetura.eesc.usp.br/sap0649/Fichas_caracteriza%C3%A7ao/Fichas_arquitrop.html> e o

Quadro 10 – Método de análise climática de Mahoney – dados climáticos e diagnóstico

Localidade: 1 Altitude: Fonte:
Latitude: Longitude: Período:

A) Dados climáticos e diagnóstico

GH	12a TMA <15° Dia		TMA <15° Noite		15° < TM A < 20° Dia		15° < TM A < 20° Noite		TMA > 20° Dia		TMA > 20° Noite	
1	21	30	12	21	23	32	14	23	26	34	17	25
2	20	27	12	20	22	30	14	22	25	31	17	24
3	19	26	12	19	21	28	14	21	23	29	17	23
4	18	24	12	18	20	25	14	20	22	27	17	21

9a GH	UR (%)
1	<30
2	30-50
3	50-70
4	>70

Para TMA=			
Dia		Noite	
26	34	17	25
25	31	17	24
23	29	17	23
22	27	17	21

passo	VARIÁVEIS		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2	T média compensada													
3	T média mensal máx (GTe max)													
12	Limites de Conforto diurno	MÁX												
		MÍN												
13	Stress térmico diurno													
4	T média mensal mín (GTe min)													
14	Limites de Conforto noturno	MÁX												
		MÍN												
15	Stress térmico noturno													
6	AMM (GTe max - GTe min)													
8a	Umidade Relativa	MAX												
8b	Umidade Relativa	MIN												
8c	Umidade Relativa	MED												
9	Grupo Higrométrico													
10	Precipitação Pluviométrica													
11	Direção dos Ventos	DOM												
		SEC												

3a Tx máx

4a Tn mín

5 TMA

7 AMA

10a Total anual

1. Para iniciar o preenchimento do Quadro 10 é necessário ter em mãos os dados mensais médios de temperatura máxima, temperatura mínima, pluviosidade, e umidade relativa. Os dados de velocidade e direção dos ventos também são solicitados nos quadros, mas não são utilizados diretamente na metodologia, e servem como auxiliares na interpretação dos resultados. Inicialmente, anota-se a localidade, latitude, altitude, longitude, fonte e período dos dados utilizados.

2. Anotar na linha 2, a temperatura média mensal, em ºC;

3. Preencher a linha 3, com as temperaturas médias máximas mensais (GT_{emax}), em ºC, destacando, na célula 3a, à direita, a maior dentre as médias das máximas;

4. Preencher a linha 4, com os dados de temperaturas médias mínimas mensais (GT_{emin}), em ºC, destacando, na célula 4a, à direita, a menor dentre as médias das mínimas;

5. Calcular e anotar na célula 5, a Temperatura Média Anual (*TMA*) como sendo a média aritmética entre a maior média máxima e a menor média mínima.

programa pode ser baixado de <http://www.usp.br/fau/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/index.html> (Acesso em 18/08/2011)

6. Calcular e anotar na célula 7, a Amplitude Média Anual (*AMA*) como sendo a média aritmética das *AMM*.

7. Preencher as linhas 8a, 8b e 8c com os dados de umidade relativa (%). Quando somente a umidade relativa média estiver disponível, usá-la. Quando estiverem disponíveis a máxima e a mínima, calcular a *UR* média mensal como sendo a média aritmética entre elas;

8. Preencher a linha 9 com o grupo higrométrico do mês, em relação à umidade relativa média, considerando os limites informados nas células 9a;

9. Preencher a linha 10 com os dados de pluviosidade mensal (mm); Calcular e anotar a pluviosidade total anual (somatório dos valores mensais) na célula 10a.

10. Preencher a linha 11 com as direções dominante e secundária dos ventos; (dados auxiliares para a interpretação das recomendações arquitetônicas);

11. Preencher a linha 12, com os limites máximo e mínimo de stress térmico diurno, obtidos nas células 12a indicadas no Quadro 10, cruzando o grupo higrométrico de cada mês (linha 9) com a *TMA*.

12. Preencher a linha 13 com os indicadores de stress térmico, indicando "Q" (quente) se a Temperatura Média Máxima for maior que o limite máximo de stress térmico diurno, "F" (frio) se for menor que o limite mínimo de stress térmico diurno e "C"(conforto) se estiver entre os dois limites;

13. Preencher a linha 14, com os limites máximo e mínimo de stress térmico noturno, obtidos nas células 12a, cruzando o grupo higrométrico de cada mês (linha 9) com a *TMA* (célula 5).

14. Preencher a linha 15 com os indicadores de stress térmico, indicando "Q" (quente) se a Temperatura Média Mínima for maior que o limite máximo de stress térmico noturno, "F" (frio) se for menor que o limite mínimo de stress térmico noturno e "C"(conforto) se estiver entre os dois limites;

15. Preencher o Quadro 11 – indicadores, marcando um "X" no indicador quando ele ocorrer naquele mês. A aplicação dos indicadores H (umidade) e A (aridez) está condicionada à ocorrência simultânea de um ou mais fatores, por exemplo: para que ocorra um indicador H1 no mês, é necessário ocorrer a combinação do stress térmico

diurno quente com um grupo higrométrico 4 OU stress térmico diurno quente com grupos higrométricos 2 OU 3 E Amplitude Média Mensal menor que 10ºC.

Quadro 11 – Método de análise climática de Mahoney – indicadores climáticos

B) Classificação dos Indicadores

IND	ST	GH	AMM	CH
H1	Q_D	4		
	Q_D	2/3	< 10°	
H2	C_D	4		
H3				>200
A1		1/2/3	>10°	
A2	Q_N	1/2		
	Q_D/C_N	1/2	>10°	
A3	F_D			

Legenda:
IND - Indicadores
ST - Stress Térmico
GH - Grupo Higrométrico
AMM Amplitude Média Mensal
CH - Chuva (mm)

C) Indicadores

	INDICADORES	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	17 Σ
H1	VENTILAÇÃO é essencial													
H2	VENTILAÇÃO é desejável													
H3	Proteger contra a CHUVA													
A1	INÉRCIA TÉRMICA													
A2	Área p/ dormir ao AR LIVRE													
A3	Problemas na estação FRIA													

16. Anotar o somatório do total de indicadores obtidos no ano na coluna 17 e transferí-los para o topo do quadro de recomendações (Quadro 12);

17. Obter as recomendações arquitetônicas para cada situação construtiva (planta de situação, espaçamento, ventilação, aberturas, paredes cobertura e espaços exteriores), no Quadro 12, observando que a indicação se faz preferencialmente pelo indicador circulado em negrito:

18. Por exemplo: quanto à circulação de ar (linha R6), o julgamento se dá preferencialmente pela ocorrência do indicador H1. Se ocorrerem de 3 a 12, a indicação é dispor as edificações de maneira que haja circulação de ar permanente.

19. Ocorrendo 1 ou 2 indicadores H1, faz-se um julgamento pelo indicador A1: se ocorrerem de 0 a 5 A1, a indicação é igual à anterior; porém se ocorrerem mais de 5 indicadores A1, a circulação de ar deverá ser controlável (devido à possibilidade de uma estação seca com ventos empoeirados);

20. Se não ocorrer nenhum indicador H1, o julgamento se fará pelo indicador H2: se ocorrerem de 2 a 12 indicadores H2, deverá haver uma circulação de ar controlável; se ocorrerem de zero a 1 indicador H2, basta uma ventilação higiênica, pois com certeza o vento será empoeirado.

Quadro 12 – Método de análise climática de Mahoney – Recomendações arquitetônicas

	Total de Indicadores							
	Úmidade			Áridez				
	H1	H2	H3	A1	A2	A3		
								1. PLANTA DE SITUAÇÃO
R1				0 -10				Construções orientadas segundo eixo longitudinal leste-oeste
				11 ou		5 -12		a fim de diminuir a exposição ao sol.
R2				12		0 - 4		Plantas compactas com pátios internos.
								2. ESPAÇAMENTO ENTRE CONSTRUÇÕES
R3	11 ou 12							Grandes espaçamentos para favorecer a penetração do vento.
R4	2 -10							Como acima, mas com proteção contra vento quente ou frio.
R5	0 ou 1							Distribuição compacta.
								3. CIRCULAÇÃO DE AR
R6	3 - 12							Construções com orientação simples, aberturas que permitam
	1 ou			0 - 5				circulação de ar permanente.
R7	2			6 - 12				Construções com orientação dupla, circulação de ar cruzada
	0	2 -12						aberturas de ar controláveis.
R8		0 ou 1						Basta renovação higiênica do ar.
								4. DIMENSÕES DAS ABERTURAS
R9				0 ou		0		Grandes: 40% a 80% das fachadas norte e sul.
				1		1 - 12		Médias: 25% a 40% da superfície das paredes.
R10								
				2 - 5				
R11				6 - 10				Intermediárias: 20% a 35% da superfície das paredes.
R12				11 ou		0 - 3		Pequenas: 15% a 25% da superfície das paredes.
R13				12		4 - 12		Médias: 25% a 40% da superfície das paredes.
								5. POSIÇÃO DAS ABERTURAS
R14	3 - 12							Aberturas nas paredes norte e sul, à altura do corpo humano, do
	1 ou			0 - 5				lado exposto ao vento.
R15	2			6 - 12				Como acima, mas também aberturas nas paredes internas.
	0	2 - 12						
								6. PROTEÇÃO DAS ABERTURAS
R16						0 - 2		Proteger da insolação direta.
R17			2 - 12					Proteger da chuva.
								7. PAREDES E PISOS
R18				0 - 2				Construções leves, baixa inércia térmica.
R19				3 - 12				Construções maciças, tempo de transmissão térmica superior a 8 horas.
								8. COBERTURA
R20	10 a			0 - 2				Leve (pouca inécia), superfície refletora, uso de câmara de ar.
R21	12			3 - 12				Leve e bem isolada.
	0 a			0 - 5				
R22	9			6 - 12				Maciça, tempo de transmissão térmica superior a 8 horas.
								9. ESPAÇOS EXTERIORES
					1 - 12			Espaço para dormir ao ar livre.
			1 - 12					Adequada drenagem para a chuva.
			3 - 12					Proteção contra chuvas violentas.

Considerações sobre o método

O método de Mahoney foi desenvolvido a partir de uma pesquisa informal para obter informações básicas sobre o impacto do clima nas condições de conforto e projeto ao longo do ano. Os meses foram classificados em uma escala de conforto de cinco pontos. Foram também identificados os meses em que eram utilizadas estratégias bioclimáticas de aquecimento ou resfriamento.

Para simplificar a análise de conforto, foram estabelecidas três faixas para a *TMA* - temperatura média anual (>20ºC; 15 a 20º C; < 15ºC) e quatro faixas para a umidade relativa (0-30%; 30-50%; 50-70%; 70-100%). Os limites de conforto foram estabelecidos para os períodos diurno e noturno, tentando considerar variações na vestimenta e nível metabólico. As imprecisões e críticas ao método são feitas exatamente quanto ao estabelecimento destes limites.

As temperaturas médias mensais máximas e mínimas são comparadas com os limites de conforto, obtendo-se um diagnóstico inicial de estresse térmico: quente, confortável e frio. Os dados mensais de estresse térmico, em conjunto com as informações sobre o clima, definem um grupo de "*indicadores*" bioclimáticos para o projeto. Foram definidos seis indicadores, três relacionados com climas úmidos e três com climas áridos. A metodologia original de Mahoney estabelece as seguintes regras determinísticas para julgar a ocorrência dos indicadores em cada mês analisado para um determinado local:

O indicador H1 corresponde à necessidade de que haja movimentação do ar. Aplica-se aos meses em que ocorre a combinação desconforto diurno por calor com umidade relativa elevada (>70%) OU desconforto diurno por calor combinado com umidade relativa entre 30 e 70% E amplitude térmica média mensal menor que 10ºC.

O indicador H2 indica que é conveniente o movimento do ar, ou seja, o movimento do ar é desejável. Ocorre nos meses em que há conforto diurno combinado com uma umidade relativa elevada (>70%).

O indicador H3 indica necessidade de proteção contra chuva, nos meses em que a pluviosidade supera os 200mm.

O indicador A1 indica o uso de inércia térmica nas envoltórias. Aplica-se nos meses em que a umidade relativa é menor que 70% E amplitude térmica média mensal maior que 10ºC.

O indicador A2 indica a conveniência de um espaço exterior para dormir ao ar livre, nos meses em que ocorre desconforto por calor noturno combinado com uma umidade relativa menor que 50% OU desconforto diurno com calor combinado com conforto noturno E umidade relativa menor que 50% E amplitude térmica média mensal maior que 10ºC.

O indicador A3 indica necessidade de isolamento térmico para proteção contra o frio no inverno. Ocorre nos meses em que há desconforto por frio diurno.

As recomendações de projeto são então obtidas a partir da análise do número de meses ao longo do ano em que cada indicador é aplicável. Inicialmente são obtidas recomendações em termos de forma, orientação e espaçamento entre os edifícios e em seguida, obtêm-se recomendações para os componentes construtivos como tamanho e posição de aberturas, características térmicas de paredes e tetos, etc.

Dentre as limitações da metodologia podemos citar: (i) Ela foi desenvolvida para climas quentes, como se pode depreender dos indicadores. Ainda que grande parte dos climas brasileiros se enquadre nesta categoria, uma área significativa do país apresenta climas com características de temperado a frio, para os quais é necessário o desenvolvimento de indicadores adequados; (ii) Ela foi desenvolvida para fornecer diretrizes práticas a empreiteiros. Mahoney não tinha a intenção de que o método fosse uma ferramenta de pesquisa para o aperfeiçoamento da arquitetura bioclimática; (iii) Ela se aplicava em seu formato original para edifícios escolares, tendo sido adaptada para a habitação popular. Aplicações relativas a outras tipologias devem ser feitas com cautela; Os conceitos envolvidos aplicam-se a edifícios sem ar-condicionado, que maximizem o uso de estratégias passivas de aquecimento e resfriamento; (iv) O estabelecimento dos limites, quanto à *TMA*, aos grupos higrométricos e as faixas de temperaturas de conforto não foram claramente explicados na publicação original (ONU, 1971) ou nas posteriores. Por exemplo: o método não estabelece claramente o procedimento a ser adotado quando um valor de *TMA* ou de umidade relativa média coincide com o valor limítrofe entre duas categorias. Diversas variáveis são tratadas de forma determinística, destacando-se a ocorrência dos indicadores em cada mês analisado.

Esse procedimento apresenta limitações no tratamento de questões como preferência e sensação térmica, no estabelecimento de índices de conforto[170].

Apesar destas limitações, segundo EVANS (1999) a metodologia apresenta algumas vantagens didáticas, necessárias para qualquer ferramenta de projeto bioclimático: (i) Clareza: Apresenta um processo explícito, conjugando dados climáticos, análise de conforto térmico e indicação de estratégias bioclimáticas. (ii) Velocidade: As tabelas podem ser preenchidas rapidamente, contando inclusive com versões computacionais - Arquitrop (Brasil) e Archipak (Austrália). Elas podem também ser implementadas por meio de planilhas eletrônicas; (iii) Dados simplificados de entrada: a análise é feita a partir de dados geralmente disponíveis para muitos centros urbanos; (iv) Produz recomendações relativas a componentes construtivos.

A pesquisa brasileira tem trabalhado para aperfeiçoar alguns pontos da metodologia de Mahoney, utilizando os recursos da Teoria dos Sistemas Nebulosos. Neste campo destacam-se as publicações do grupo do Prof. Cheng Liang Lee, da UNICAMP: (CHENG, 1999; HARRIS ET ALII, 2000, SENA, 2004).

CHENG (1999) explica a aplicabilidade das técnicas de inferência nebulosa aos problemas que envolvem o conforto ambiental e situa a linha de pesquisa, a qual, passados dez anos, ainda pode ser considerada como desconhecida para a grande maioria dos arquitetos:

> Por ser uma área de estudo diretamente ligada à interação do homem com o seu meio, em estudos de conforto ambiental é comum deparamos com problemas que envolvem levantamento, modelagem e análise com base nas manifestações de usuários ou intuição de especialistas. Durante o projeto conceitual, por exemplo, os dados disponíveis muitas vezes são escassos. O julgamento, mesmo que subjetivo, de especialistas é fundamental na resolução dos problemas mal definidos (ill-defined). (...) Além disso, muitos dos índices de conforto ambiental, que visam expressar as sensações dos usuários, possuem características subjetivas, de natureza nebulosa (fuzzy), cuja modelagem por meio da matemática clássica e estatística não é a mais adequada.
>
> (...) trata-se de uma teoria relativamente nova. As literaturas existentes geralmente a apresentam através de uma linguagem matemática abstrata e pesada. Aquelas que abordam o assunto de forma mais intuitiva e prática muitas vezes se limitam aos poucos tópicos consagrados, tal como controle nebuloso (*fuzzy control*). Por isso, a adoção da teoria no dia a dia de arquitetos e engenheiros em áreas, por exemplo, conforto ambiental, tem sido bastante restrita. Dentro deste contexto, o trabalho faz uma explanação breve e intuitiva sobre a teoria e, como resultado inicial da

[170] Para uma discussão sobre adequação de tratamento estatístico de dados obtidos em pesquisas de conforto térmico humano, pode ser consultado o item 4.5 de (GONÇALVES, 2000).

> pesquisa, apresenta algumas abordagens que podem ser usadas na modelagem e análise das informações subjetivas relacionadas ao conforto ambiental, na tentativa de despertar o interesse da comunidade sobre esta nova ferramenta de estudo (CHENG, 1999, p. 1-2).

Inicialmente as pesquisas desse grupo focaram na APO – Análise de Pós-ocupação, com o trabalho de (HARRIS, 1999), que sintetizou os resultados de uma APO em conjuntos nebulosos e apresentou uma metodologia para análise do impacto das modificações introduzidas num ambiente construído. A metodologia usou a inferência nebulosa baseada em regras que representaram o julgamento de um especialista e foi testada para um caso simples.

Posteriormente o grupo começou a trabalhar com a remodelagem do método de Mahoney, utilizando ferramentas de inferência nebulosa. HARRIS (2000) aponta para a necessidade de aperfeiçoamento dos limites deterministicamente propostos na metodologia original, nas classificações propostas para a *TMA*, amplitude térmica, pluviosidade, grupo higrométrico, limites de conforto, ocorrência de estresse térmico diurno e noturno, ocorrência dos indicadores de umidade e aridez e no quadro de recomendações arquitetônicas. A proposta de remodelamento é testada para os indicadores da cidade de Campinas, e os resultados mostram diferenças significativas.

A linha de pesquisa teve continuidade com o trabalho de SENA (2003), que estudou o resultado do remodelamento para outras cidades do Estado de São Paulo, e em 2004, publicou sua dissertação de mestrado (SENA, 2004) com uma versão do método que chamou de método de Mahoney nebuloso.

Nesse trabalho, além de apresentar diversas referências de aplicação da teoria dos sistemas nebulosos a estudos de conforto ambiental, SENA verificou (2004, p.14) que o método de Mahoney apresenta maiores limitações quando aplicado a cidades localizadas em regiões climáticas de transição, obtendo-se melhores resultados em cidades de características climáticas extremas e bem definidas. Essa inadequação em regiões climáticas transitórias se deve à modelagem determinística das variáveis citadas acima por HARRIS (2000). Para o remodelamento proposto, Sena utilizou como referência a classificação climática de Koppen, dados de pluviosidade e estudos climáticos específicos para o Estado de São Paulo.

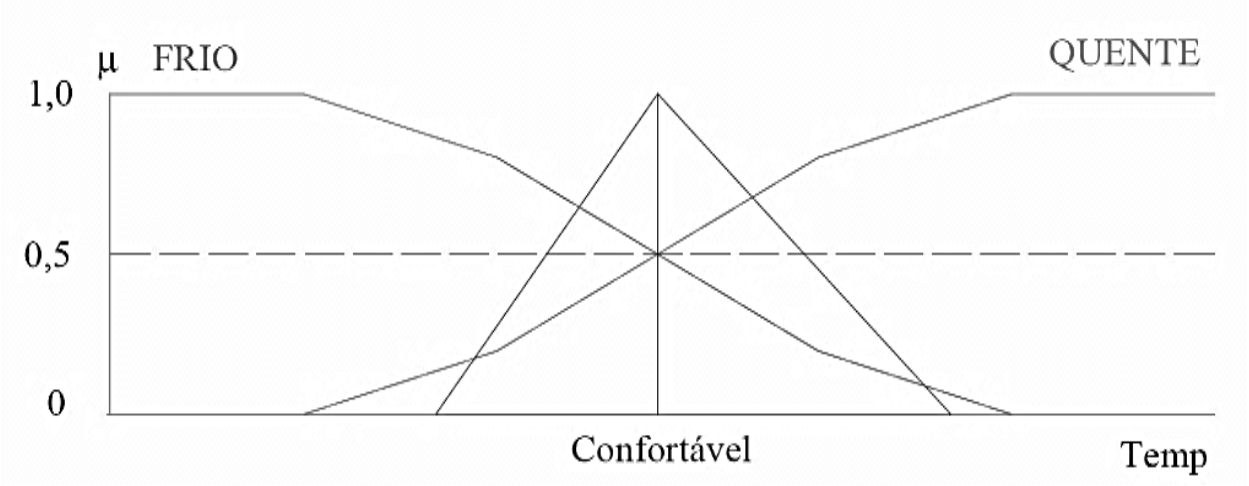


Figura 169 – Conjuntos nebulosos para definição da ocorrência de estresse térmico segundo SENA (2004).

SENA (2004) propôs uma modelagem nebulosa, isto é, estabeleceu **funções de pertinência** (no caso, lineares) para cada uma das variáveis tratadas deterministicamente na metodologia original, destacadas acima ao citar-se o trabalho de HARRIS (2000). A Figura 169 mostra os conjuntos nebulosos utilizados pela autora para modelar a ocorrência de estresse térmico, mantendo uma função de pertinência linear para o conjunto "confortável".

Embora o trabalho de SENA (2004) tenha dado um passo importante para que a metodologia de Mahoney resulte em recomendações mais realistas nas cidades localizadas em regiões de transição climática, as correções propostas poderiam ser ainda mais aperfeiçoadas, se as funções de pertinência fossem não do tipo linear, mas utilizassem funções de densidade de probabilidade logísticas do tipo *logit* ou *probit.*

GONÇALVES (2000) faz uma análise detalhada da aplicabilidade desses modelos ao tratamento de dados obtidos em pesquisas de conforto térmico humano, Com base em dados obtidos em pesquisa realizada com população universitária em Belo Horizonte, o autor apresenta a Figura 170, que pode ser comparada à Figura 169, extraída de SENA (2004). Note-se que Sena faz uma aproximação da curva sigmoide, nos conjuntos "frio" e "quente", por trechos lineares. Os pontos de truncamento dessa aproximação não foram informados no trabalho.

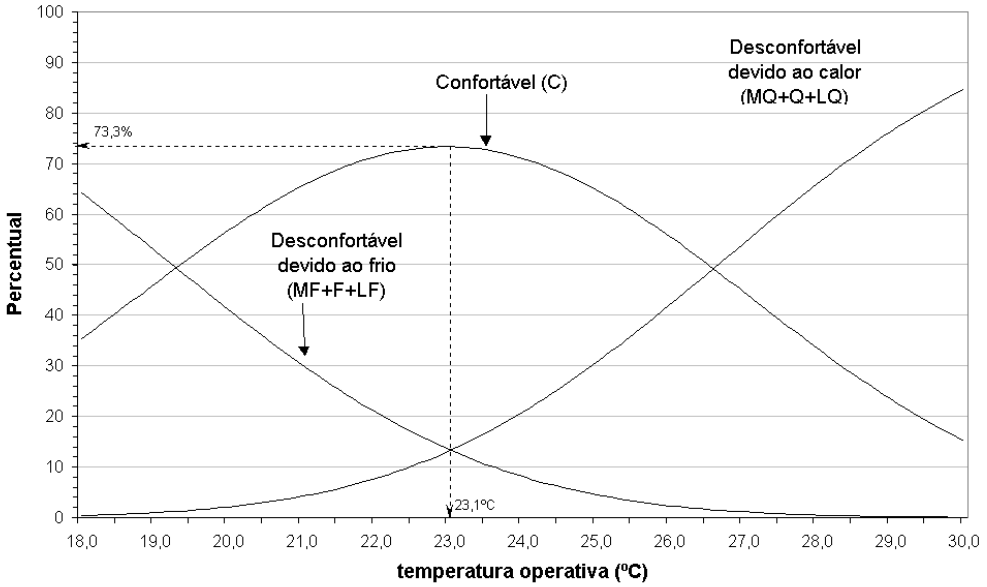


Figura 170 – Frequências estimadas por regressão *probit* para as categorias de sensação térmica, em função da temperatura operativa. Fonte: (GONÇALVES, 2000)

Cabe ainda destacar que ao considerar o método tradicional (para diferenciar do nebuloso) SENA (2004, p. 27) adotou uma variação importante em relação à metodologia original publicada em (ONU, 1971): baseando-se nas considerações de ALUCCI et al. (1986), ela adotou **somente dois grupos higrométricos** – *(i) úmido*, para umidade relativa média mensal maior que 70% e *(ii) seco*, para umidade relativa média mensal menor que 70%.

Não obstante as considerações acima, a principal melhoria que SENA (2004) introduziu no método original de Mahoney foi o modelamento nebuloso da ocorrência dos indicadores de umidade e aridez em cada mês analisado. Enquanto na metodologia original as condições determinísticas resultam numa resposta binária 0 (não se aplica) ou 1 (aplicável) para cada indicador, no método nebuloso, admite-se uma **pertinência parcial** de cada indicador, variando entre 0 e 1. A pertinência final de cada indicador é obtida somando-se as pertinências parciais de todos os meses do ano.

B.5.3- Zoneamento bioclimático para o Estado de Minas Gerais

Definido o contexto acima, no cenário de pesquisa e aplicação da dos recursos da arquitetura bioclimática no Brasil pertinente à área de conforto ambiental e eficiência energética no ambiente construído, apresenta-se a seguir algumas considerações sobre o zoneamento bioclimático considerado para o Estado de Minas Gerais. Esse zoneamento foi o critério determinante para a escolha dos estudos de caso iniciais deste trabalho.

Uma dificuldade inerente ao estabelecimento de zoneamentos climáticos é a densidade geográfica das estações meteorológicas, o que exige algum tipo de interpolação dos dados. Em Minas Gerais, somente 32 dos 853 municípios constam nas normais climatológicas publicadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (BRASIL, 1992).

A pesquisa para elaboração e aperfeiçoamento de um zoneamento bioclimático para Minas Gerais vem sendo desenvolvida conjuntamente desde 2003, por pesquisadores da UFMG e da PUC de Minas Gerais (GONÇALVES et al., 2003, 2005; ZÁRATE et al., 2008; ROCHA et al., 2009).

O grupo adotou como referência inicial a metodologia de Mahoney em função das vantagens destacadas na seção anterior e da ausência de estudos de validação de índices de conforto térmico para diversas regiões climáticas do estado. O único estudo dessa natureza anteriormente realizado em Minas Gerais é o de GONÇALVES (2000).

O procedimento adotado para a classificação do estado de Minas Gerais em zonas bioclimáticas foi apresentado por GONÇALVES et al. (2003). Para o estabelecimento da classificação utilizada no zoneamento, foram usados os seguintes dados mensais climatológicos de entrada: temperaturas médias das máximas e das mínimas, umidade relativa média e pluviosidade, referentes a 79 cidades do estado, acrescidos dos dados de outras 12 cidades no entorno do estado de Minas Gerais, totalizando 91 pontos com dados medidos. Foi então desenvolvido um algoritmo computacional das Tabelas de Mahoney, na linguagem do programa *MatLab* ©, cujos parâmetros de entrada foram os dados descritos acima e o parâmetro de saída foi um vetor de 22 posições booleanas (0 ou 1) correspondentes às recomendações arquitetônicas, para cada uma das cidades analisadas. O mapa de zoneamento bioclimático de Minas Gerais resultante desse trabalho é mostrado na Figura 172a.

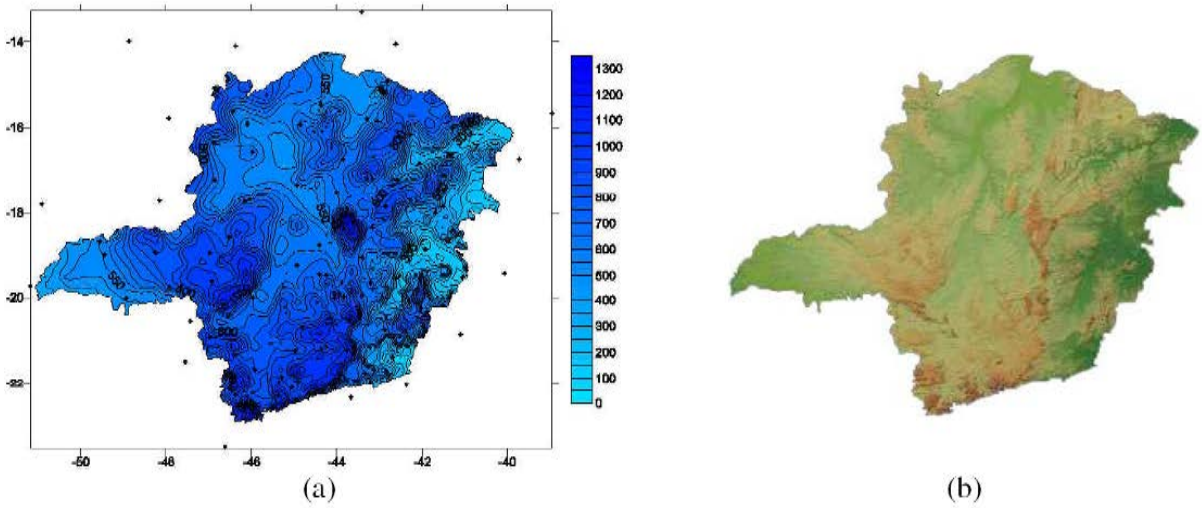
GONÇALVES et al. (2005) melhoraram este primeiro resultado. Os dados climáticos dos 91 pontos do domínio com dados medidos foram interpolados por *krigagem*, utilizando o programa *Surfer 7.0* ©. Este método de interpolação, encontrado na maioria dos programas de geoprocessamento, serve para estimar valores não amostrados dos parâmetros mapeados (no caso em questão, as variáveis climáticas de entrada) a partir de valores amostrados em locais vizinhos, dentro do domínio espacial de análise. A interpolação feita por krigagem busca minimizar o erro da estimação. Foi então estabelecida uma malha que dividiu o domínio geográfico do Estado em 8400 células, resultando em 48 mapas correspondendo às médias mensais interpoladas para cada uma das quatro variáveis climáticas de entrada., a saber:

umidade relativa, temperatura máxima, temperatura mínima e pluviosidade. O algoritmo computacional das Tabelas de Mahoney, na linguagem do programa *MatLab* ©, foi alimentado com esses dados, gerando o vetor de saída com as 22 recomendações arquitetônicas (vide Quadro 13), representadas por posições booleanas (0 ou 1) para cada uma 8400 células analisadas. O mapa resultante é mostrado na Figura 172b.

Posteriormente, ZÁRATE et al. (2008) procuraram aprimorar a metodologia, visando corrigir questões como a ausência da variável altitude, de grande peso na caracterização climática e aperfeiçoar o processo de interpolação espacial dos dados climáticos. Para isso foi desenvolvida uma rede neural artificial, treinada com os dados climáticos médios mensais de 81 pontos com dados medidos - 66 estações meteorológicas do 5º Distrito de Meteorologia (Minas Gerais) e de mais 15 estações limítrofes de outros estados. Cabe destacar que para o treinamento da rede neural com os dados de altitude, foram pesquisados, tratados e inseridos no modelo, 1.631 pontos distribuídos não homogeneamente pelo território do estado (

Figura 171) que, somados aos dados das 81 localidades usadas no treinamento da rede, perfazem um total de 1.712 pontos.

Figura 171 – Minas Gerais – altitude – comparação entre mapa de valores interpolados por *kriging* (a) com mapa



de relevo elaborado pela EMBRAPA usando imagens de satélite (b). Fonte: http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br (Acesso em 23/02/2013).

Desse trabalho resultou um programa computacional de estimativa de dados climáticos, denominado *RNBioClima*[171], o qual faz a estimativa de dados climáticos mensais para qualquer ponto geográfico em Minas Gerais, tendo como dados de entrada a latitude, longitude e altitude. ZÁRATE et al. (2008) apresentam considerações sobre os erros e validação do processo de treinamento da rede neural.

Os dados de latitude, longitude e altitude dos 1.712 pontos foram organizados numa planilha lida pelo simulador climático, que calculou, para cada mês, os dados de temperatura máxima e mínima, umidade relativa e pluviosidade em cada um. Esta nova base de dados climáticos (os 1631 estimados pelo simulador mais as 81 localidades com dados medidos) alimentou o algoritmo computacional das Tabelas de Mahoney, no programa *MatLab* ©, gerando o vetor de saída com as 22 recomendações arquitetônicas para cada um dos 1.712 pontos. Para permitir uma comparação com o resultado da classificação anterior, foi utilizado o método *nearest neighbour* do programa *Surfer*© para espacializar o resultado dos 1.712 pontos na malha anteriormente adotada de 100 linhas por 84 colunas sobre o território do estado. Esse método não faz interpolação entre os dados. Ele propaga o valor do ponto para os seus vizinhos mais próximos, considerando a "área de influência" de cada ponto, em relação aos demais. O mapa resultante é mostrado na Figura 172c.

Durante o ano de 2010, em nova revisão da metodologia, foi encontrada uma inconsistência no algoritmo feito para o *MatLab* ©, o qual é alimentado pelos dados gerados na rede neural, em relação ao método original de Mahoney, especificamente na aplicação do indicador A3. Após a devida correção, um novo mapa foi gerado e é mostrado na Figura 172d. Nesta revisão detectou-se também a necessidade de completar o algoritmo as recomendações para os espaços exteriores.

[171] Informações sobre o programa podem ser obtidas em http://www.icei.pucminas.br/projeto/licap/projetos.php?f_id=22 (Acesso em 19/08/2011)

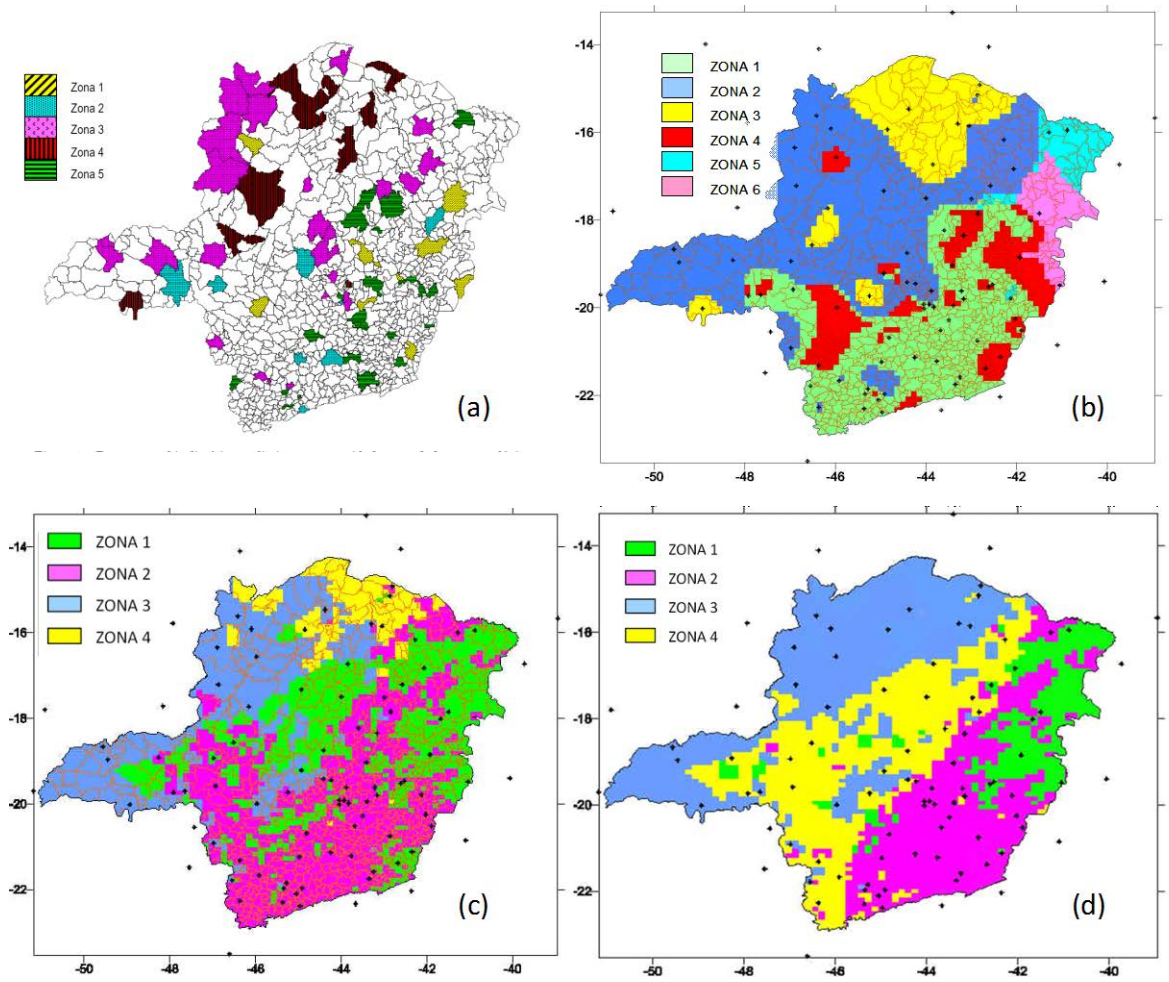


Figura 172 – Evolução das propostas de agrupamento para o zoneamento bioclimático de Minas Gerais. (a) (GONÇALVES et al., 2003); (b) (GONÇALVES et al., 2005); (c) (ZÁRATE et al., 2008) e (ROCHA et al., 2009) (d) 2010.

No caso da proteção contra chuva, a recomendação R17 (vide Quadro 12) - proteção das aberturas contra chuva - ocorre quando pelo menos dois meses há uma pluviosidade superior a 200mm, o que indica, nas cidades onde essa recomendação se aplica a necessidade de proteção contra chuvas nas aberturas e drenagem adequada. A ocorrência desta recomendação foi usada para indicar a aplicabilidade de proteção contra chuva e drenagem em cada zona, indicada no Quadro 14.

O Quadro 13 apresenta o agrupamento dos vetores de recomendações arquitetônicas para as 1712 células classificadas resultantes do algoritmo do método de Mahoney com a porcentagem de cada grupo de vetores iguais. A numeração de 1 a 22 corresponde às estratégias apresentadas no Quadro 12. Já o Quadro 14 apresenta as recomendações arquitetônicas comuns e específicas de cada zona bioclimática.

Dentre as limitações da metodologia utilizada para a geração do zoneamento bioclimático de Minas Gerais pelo método de Mahoney cabe destacar que para o agrupamento das zonas no Quadro 13 foi observada a similaridade ou diferenças nas recomendações arquitetônicas principais, referentes à inércia térmica das paredes e pisos, seguida do tamanho das aberturas. Para o aprimoramento dessa classificação seria necessário aplicar métodos estatísticos de análise de agrupamentos *(cluster analysis)* ou de análise de componentes principais. Outro aprimoramento pendente é a aplicação da metodologia apresentada por SENA (2004) para compensar as deficiências da metodologia relacionadas com o tratamento determinístico das variáveis, conforme explicado na seção anterior.

Quadro 13 – Agrupamento dos 1712 pontos classificados pelo método de Mahoney para o zoneamento bioclimático de Minas Gerais (Obs.: A ordem das zonas 4 e 3 foi invertida no quadro para manter a mesma legenda de cores utilizada na versão anterior do zoneamento, e ao mesmo tempo mostrar a lógica do agrupamento considerada)

ZONA	GRUPO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	TOTAL	S.TOT %	TOTAL %
1	6	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	154	9,00%	14,08%
	10	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	87	5,08%	
2	3	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	72	4,21%	46,20%
	4	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	566	33,06%	
	5	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	85	4,96%	
	7	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	68	3,97%	
4	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	109	6,37%	21,96%
	2	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	234	13,67%	
	11	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	19	1,11%	
	12	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	10	0,58%	
	14	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	***2***	***0,12%***	
	15	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	***2***	***0,12%***	
3	8	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	218	12,73%	17,76%
	9	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	83	4,85%	
	13	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	***1***	***0,06%***	
	16	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	***1***	***0,06%***	
	17	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	***1***	***0,06%***	

CARVALHO (2006) e CARVALHO et al. (2009) estudaram o zoneamento do potencial de uso de sistemas de resfriamento evaporativo para a Região Sudeste, visando o conforto animal na produção de carne de frango. Ao mapear a distribuição espacial do índice de temperatura e umidade específico para essa finalidade, bem como o consumo de ração diário e a conversão alimentar em peso das aves, considerando sistemas de ventilação padrão em galpões de produção, aqueles autores também encontraram quatro zonas climáticas no estado de Minas Gerais, com uma distribuição geográfica (Figura 173) razoavelmente similar à da Figura 172d.

Quadro 14 – Recomendações arquitetônicas para as zonas bioclimáticas obtidas pelo método de Mahoney no zoneamento bioclimático de Minas Gerais

Recomendações comuns a todas as zonas
Planta de situação: Construções orientadas segundo eixo longitudinal Leste-Oeste, voltando aberturas preferencialmente para sul, a fim de diminuir a exposição ao sol;
Circulação de ar: Construções com orientação simples, aberturas que permitam ventilação cruzada, circulação de ar permanente;
Posição das aberturas: Aberturas na altura do corpo humano, do lado exposto ao vento;
Proteção das aberturas contra radiação solar direta;
Espaços exteriores e proteção das aberturas contra chuva: Em todas as zonas climáticas do estado, uma parte significativa das cidades necessita de proteção contra chuvas violentas, durante os meses chuvosos. inclusive nas aberturas e uma drenagem adequada. (Estimativas de aplicabilidade por zona: Zona 1 - 80%; zona 2 - 40%, zona 3 - 95%; zona 4 - 75%).
Zona 1
Espaçamento entre edificações: Grandes espaçamentos para permitir livre circulação do vento
Circulação de ar: Construções com orientação simples, aberturas que permitam circulação de ar permanente;
Dimensões das aberturas: Grandes: 40 a 80% da superfície das paredes; proteger orientação norte da radiação solar direta;
Paredes e pisos: Construções leves, baixa inércia térmica;
Cobertura: Leve bem isolada, superfície refletora, uso de câmara de ar;
Zona 2
Espaçamento entre edificações: Grandes espaçamentos para permitir livre circulação do vento, mas com proteção contra vento quente ou frio;
Circulação de ar: Construções com orientação simples, aberturas que permitam circulação de ar permanente;
Dimensões das aberturas: Grandes: 40 a 80% da superfície das paredes; proteger orientação norte da radiação solar direta;
Paredes e pisos: Construções leves, baixa inércia térmica;
Cobertura: Leve e bem isolada. Nas cidades com estação seca, é aconselhável aumentar o desempenho térmico da cobertura utilizando-se superfície refletora e câmara de ar.
Zona 3
Espaçamento entre edificações: Grandes espaçamentos para permitir livre circulação do vento, mas com proteção contra vento quente ou frio;
Circulação de ar: Construções com orientação simples, aberturas que permitam circulação de ar permanente;
Dimensões das aberturas: Medias: 25% a 35% da superfície das paredes
Paredes e pisos: Construções maciças, tempo de transmissão térmica superior a 8 horas;
Cobertura: Leve e bem isolada
Zona 4
Espaçamento entre edificações: Grandes espaçamentos para permitir livre circulação do vento, mas com proteção contra vento quente ou frio;
Circulação de ar: Construções com orientação simples, aberturas que permitam circulação de ar permanente;
Dimensões das aberturas: Medias: 25% a 35% da superfície das paredes;
Paredes e pisos: Construções leves, baixa inércia térmica;
Cobertura: Leve e bem isolada. Nas cidades de clima mais úmido, é aconselhável aumentar o desempenho térmico da cobertura utilizando-se superfície refletora e câmara de ar.

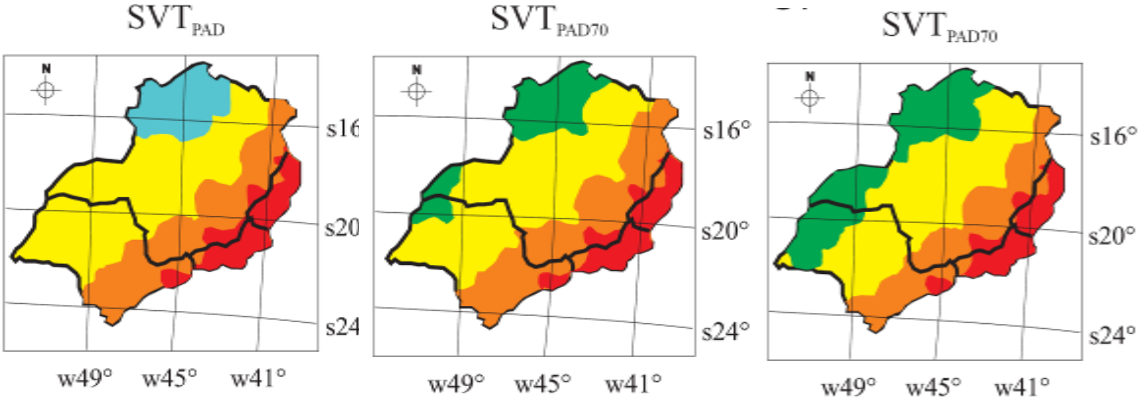


Figura 173 – Região sudeste - distribuição espacial de índice de temperatura e umidade, consumo de ração e conversão alimentar em função do clima e sistema de ventilação em galpões de produção aviária. Fontes: (CARVALHO, 2006; CARVALHO et al., 2009).

SÁ JUNIOR (2009) aplicou a metodologia de classificação climática de Koppen para obter um zoneamento climático de Minas Gerais. (Essa metodologia é muito utilizada para a identificação de zonas climáticas homogêneas e usa como dados de entrada a pluviosidade e a temperatura). O autor interpolou dados de um banco de dados meteorológicos internacional cruzando-os com os dados das normais climatológicas (BRASIL, 1992) em um programa de geoprocessamento. Ele obteve três grandes grupos climáticos principais, correspondendo aos climas Aw (tropical chuvoso com temperatura do mês mais frio acima de 18ºC e estação seca distinta no período de inverno) – tipologia dominante segundo este autor – Cwa (temperado úmido com inverno seco e verão quente) e Cwb (clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado).

Comparando a Figura 175 com a

Figura 171b, verifica-se que o zoneamento obtido por Sá Júnior foi fortemente influenciado pela altitude e é razoavelmente compatível com a zona 2 (rosa na Figura 172d) do zoneamento bioclimático pelo método de Mahoney. A zona 3 (azul na Figura 172d) é compatível com a zona Aw da classificação de Koppen para o norte do estado e Triangulo Mineiro. Igualmente, A zona 1 (verde na Figura 172d) é compatível com a zona Aw da classificação de Koppen para o leste do estado. Entretanto a classificação de Koppen não foi sensível à transição climática representada na zona 4 (amarela na Figura 172d), sendo que essa se superpõe a três zonas distintas da classificação de Koppen.

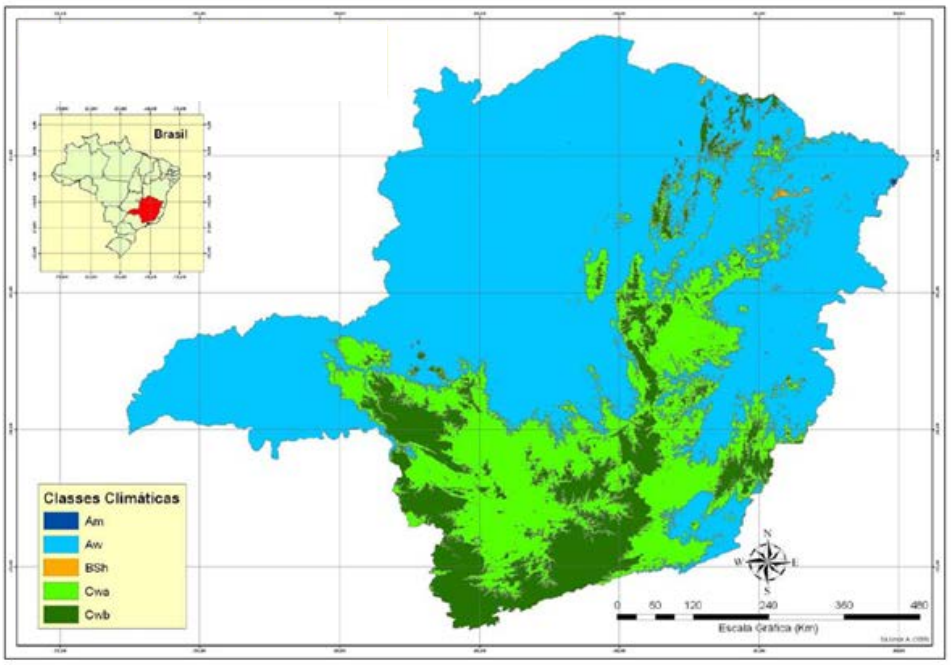


Figura 174 – Minas Gerais – classificação climática de Koppen. Fonte: (SÁ JÚNIOR, 2009).

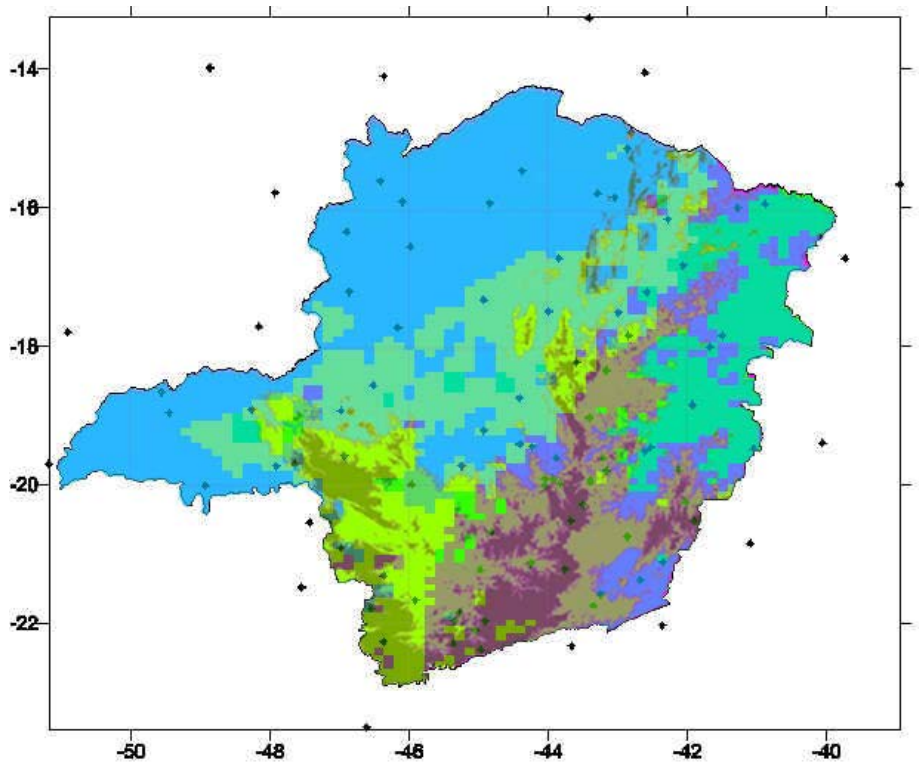


Figura 175 - Zoneamento bioclimático de MG pelo método de Mahoney superposto à classificação climática de Koppen.

A Figura 176a destaca o Estado de Minas Gerais no mapa de zoneamento bioclimático da norma NBR 15220-3 e a Figura 176b mostra uma superposição entre este e o zoneamento bioclimático utilizando o Método de Mahoney, mostrado na Figura 172d.

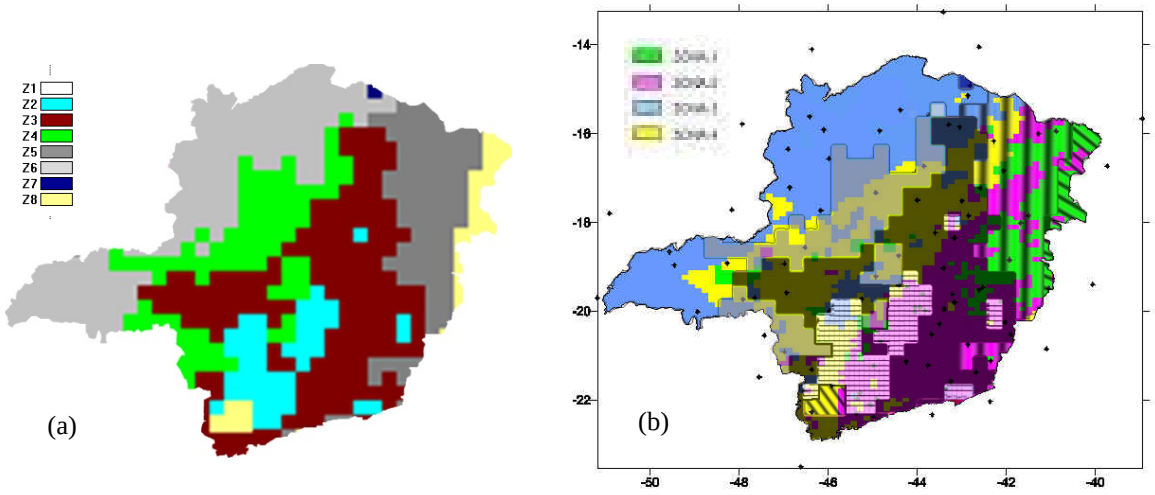


Figura 176 – Superposição do zoneamento bioclimático de MG pela norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005) (a) com o zoneamento pelo método de Mahoney (b).

Observa-se que a zona 6 (cinza claro) da NBR 15220-3 apresentou uma correspondência de cerca de 90% com a zona 3 (azul) do zoneamento pelo método de Mahoney. Esta zona corresponde ao norte do Estado e à região do Triângulo Mineiro.

Já a zona 4 (verde) da NBR 15220-3 apresentou uma boa correspondência com a zona 4 (amarela) do zoneamento pelo método de Mahoney, a qual se superpôs também com a zona 3 (marrom) da NBR 15220-3. Essas zonas caracterizam-se como sendo de transição climática.

A zona 5 (cinza escuro) da NBR 15220-3 apresentou boa correspondência com a zona 1 (verde) do zoneamento pelo método de Mahoney, caracterizando o leste e o nordeste do Estado, mas também se superpôs com as demais zonas deste último.

Já a zona 2 (rosa) do zoneamento pelo método de Mahoney apresentou boa correspondência com as zonas 2 (azul) e 3 (marrom) da NBR 15220-3, no sul do Estado.

A Figura 177a destaca o Estado de Minas Gerais no mapa da proposta de revisão do zoneamento bioclimático da norma NBR 15220-3 (RORIZ, 2012c) e a Figura 177b mostra uma superposição entre este e o zoneamento bioclimático utilizando o Método de Mahoney, mostrado na Figura 172d.

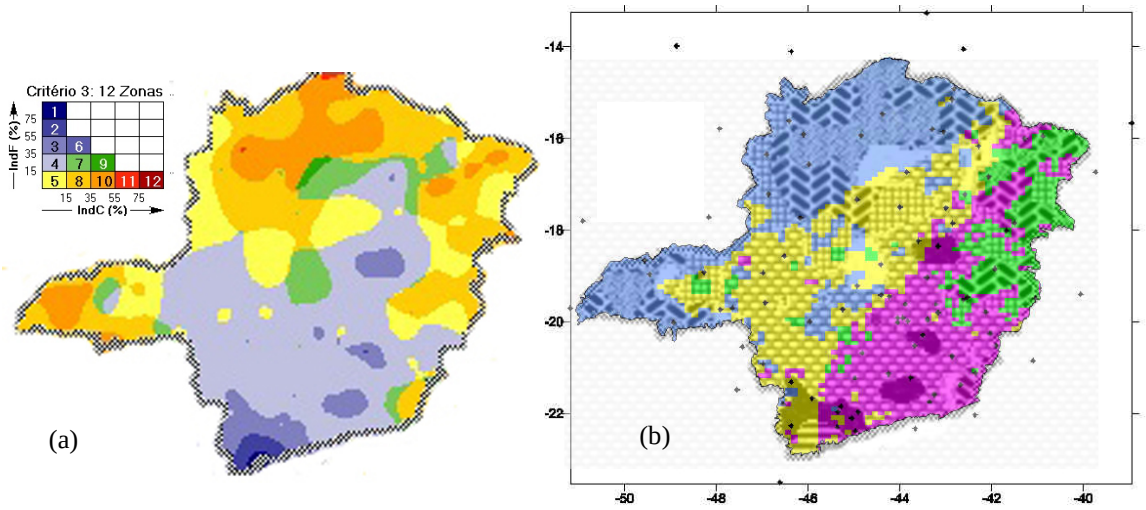


Figura 177 – Superposição do zoneamento bioclimático de MG pela proposta de revisão da norma NBR 15220-3 (RORIZ, 2012c) (a) com o zoneamento pelo método de Mahoney (b).

Verifica-se que as zonas 5 e 8 (amarelo e alaranjado) da revisão apresentam boa correspondência com as zonas 1 e 3 do método de Mahoney (verde e azul).

A zona 6 da revisão (azul médio) ficou quase totalmente dentro da zona 2 do método de Mahoney (rosa). Já a zona 4 da revisão (azul claro) fica repartida entre as zonas 2 e 4 do método de Mahoney (rosa e amarelo).

Essas evidências tendem a confirmar as considerações de SENA (2004), que afirma ser o método de Mahoney mais adequado para cidades de clima bem definido, fora de zonas de transição climática.

Conclui-se que as zonas bioclimáticas do zoneamento pelo método de Mahoney para as regiões norte, leste e sudeste do estado, mais o Triangulo Mineiro, coincidem razoavelmente com o zoneamento da NBR 15220-3 e sua proposta de revisão. A região centro-sul do estado é uma zona de transição climática, apresentando diferenças em termos do zoneamento bioclimático proposto pelas três metodologias.

APÊNDICE C

PRINCÍPIOS QUE REGEM A VENTILAÇÃO NATURAL NOS EDIFÍCIOS QUE ABRIGAM COLEÇÕES

O principal parâmetro a ser observado no aproveitamento da ventilação natural em edifícios que abrigam coleções contendo materiais orgânicos, em climas tropicais, é a proteção contra infestações por insetos. É recomendável que as aberturas sejam protegidas com telas, apesar da perda de carga provocada na ventilação, a qual é função da direção e velocidade do vento (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2006, p. 70). O monitoramento contínuo das condições de conservação das coleções, por meio de inspeções sistemáticas e do uso de artifícios como armadilhas adesivas é essencial para a sua conservação preventiva.

Outro aspecto importante a observar no uso da ventilação natural em museus, arquivos, bibliotecas ou outros edifícios que abrigam coleções é que a conexão dos ambientes internos com os externos por meio das aberturas de ventilação, em geral faz com que as flutuações ambientais internas aumentem, aproximando-se das flutuações externas. Dependendo dos materiais presentes nas coleções, isso pode acarretar a diminuição das taxas de permanência das mesmas, com aumento das taxas de deterioração por mecanismos químicos e/ou físico-mecânicos.

KLEIVEN (2003) detalha os princípios, características, componentes construtivos, consequências e possibilidade do uso de sistemas de ventilação natural passivos e híbridos em edifícios escolares e escritórios europeus, elencando, entre os casos estudados, algumas bibliotecas. Cabe destacar a classificação dos casos estudados pelo autor em função das características do sistema de ventilação.

PRIOLO (apud ALLARD et al., 1996, p. 196) propõe que o projeto de ventilação seja pensado nos seguintes níveis: (i) nível do entorno – considerando a situação, orientação, paisagem e os edifícios vizinhos; (ii) nível do programa de necessidades – considerando os requisitos de qualidade do ar interior e aquecimento ou arrefecimento; (iii) nível do edifício – orientação, forma, zoneamento, tipo, tamanho, proporção e localização de aberturas; (iv) nível das aberturas – aspectos operacionais, concernentes ao controle por parte dos usuários ou à automação predial.

A forma do edifício, em conjunto com a direção dominante dos ventos, determina em torno da edificação zonas de alta e baixa pressão. Para o aproveitamento efetivo das estratégias de ventilação natural, as aberturas de entrada do ar devem localizar-se nas zonas de alta pressão e as aberturas de saída, em zonas de baixa pressão.

Além dos fatores externos destacados acima, a **tipologia** (forma, tamanho e tipo de caixilho) e **localização** das aberturas nas envoltórias são fatores determinantes na ventilação natural de um edifício. A tipologia determina a área livre da abertura para ventilação, se há separação de fluxos de entrada e saída e direcionamento do fluxo. O tamanho, posição, diferença de alturas e proporção entre áreas de entrada e saída determinam velocidades e vazões. As cargas térmicas provenientes das envoltórias e da ocupação, bem como a presença de equipamentos e superfícies aquecidas também podem influenciar no fluxo de ar nos ambientes. MASCARÓ (1991) e BRASIL (2005b) analisam as vantagens e desvantagens dos diversos tipos de janelas mostrados na Figura 178.

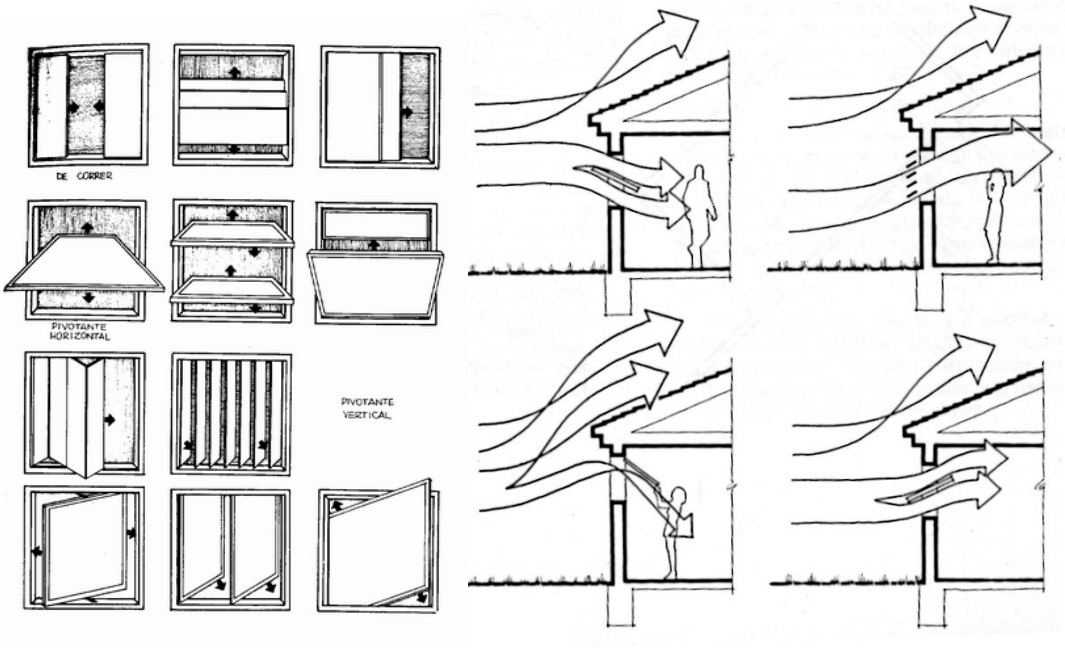


Figura 178 – Influência do tipo de abertura no direcionamento e separação dos fluxos de ar. Fontes: (MASCARÓ, 1991; WATSON e LABS, 1993).

Em climas úmidos, de uma forma geral, a ventilação visa retirar a umidade e calor excessivos, e faz-se de uma forma mais ostensiva, conhecida como **ventilação cruzada** (ALMUSAED, 2011, p. 345)**.** Um aspecto a ser observado para a ocorrência da ventilação cruzada é a existência de aberturas em zonas de pressão diferentes, pois do contrário a circulação do ar se dará somente próximo à abertura de entrada do ar, conforme ilustra a

Figura 179. Nessas circunstâncias, o regime de variação das pressões no interior do ambiente normalmente resulta em um ciclo de “enchimento” e “esvaziamento”, com pequena movimentação do ar.

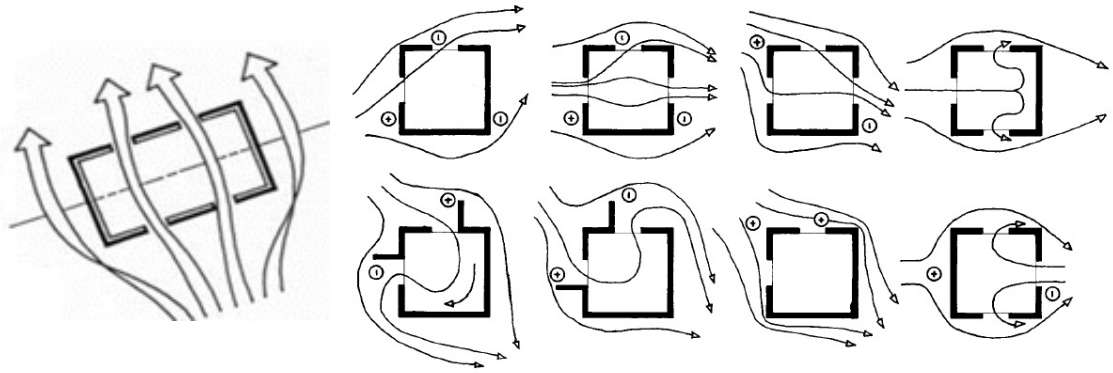


Figura 179 –Ventilação cruzada com aberturas opostas e influência do posicionamento das aberturas no escoamento. Fontes: (WATSON e LABS, 1993; ROAF et al., 2006).

Segundo ALLARD (apud BASTOS et al., 2007),

> O recurso da ventilação natural na edificação vem proporcionar conforto higrotérmico e contribui para a salubridade dos ambientes. Na maioria dos casos, a ventilação mínima necessária para uma qualidade do ar interior (ventilação higiênica) é facilmente conseguida, por meio de infiltrações pelas frestas de portas e janelas. Porém, o mesmo não ocorre quando se deseja um bom controle térmico numa situação de verão. Neste caso, maiores índices de renovação de ar serão necessários, ou seja, é essencial uma maior velocidade do ar no interior da edificação. Em termos da arquitetura, faz-se necessário conhecer as características locais dos ventos, para o bom dimensionamento e localização das aberturas nas fachadas. (BASTOS et al., 2007, p.173)

De uma maneira geral, um partido arquitetônico mais variado, em termos formais, com uma volumetria diversificada e com a presença de nichos e reentrâncias na fachada, facilitará a formação de zonas de pressão diferenciadas em torno do edifício, facilitando a captação do vento. Esses recursos arquitetônicos quase sempre também proporcionam um sombreamento da fachada, minimizando os ganhos térmicos por incidência da radiação solar. Resultado semelhante pode ser atingido por meio do correto posicionamento de outros obstáculos externos, e até mesmo do tipo de janelas, permitindo a formação de zonas de alta e baixa pressão e a ventilação cruzada, mesmo em implantações a princípio desfavoráveis.

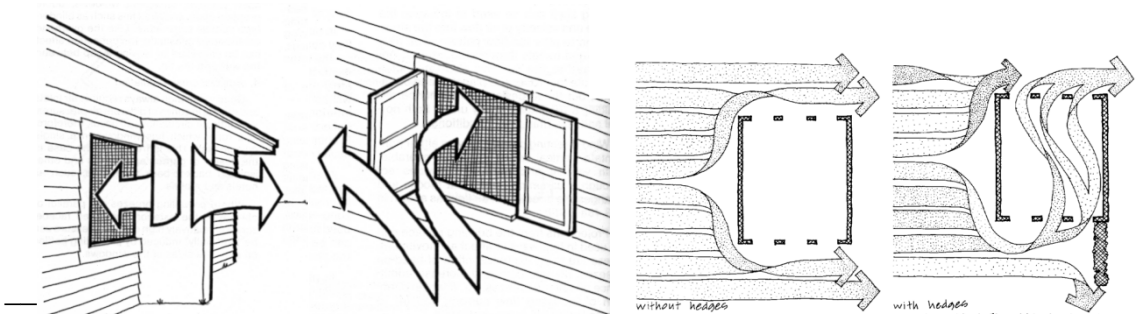


Figura 180 – Uso da tipologia das aberturas e obstáculos externos para incrementar a captação da ventilação. Fontes: (WATSON e LABS, 1993; BROWN e DEKAY, 2004).

KLEIVEN (2003) destaca os partidos formais conceituais de plantas que favorecem a ventilação natural, com formato longilíneo e curvo voltado ao vento dominante, favorecendo a ventilação cruzada ou pátios enclausurados que provocam o efeito chaminé. Cabe destacar, entretanto, que em edifícios altos, para uma boa iluminação, as dimensões do pátio devem ser mais generosas. Se o pátio for coberto, configurando um átrio, a dinâmica da ventilação pode ser modificada ao longo do ano, para atender as demandas de inverno e de verão, dependendo das estratégias de sombreamento (BAKER e STEEMERS, 2000, cap. 9.). a **Biblioteca Nacional de Singapura** (Arq. Ken Yeang) é um exemplo interessante de átrio ventilado conectando dois edifícios independentes (YEANG, 2006, COLE et al., 2006; DAVEY, 2009, p. 100).

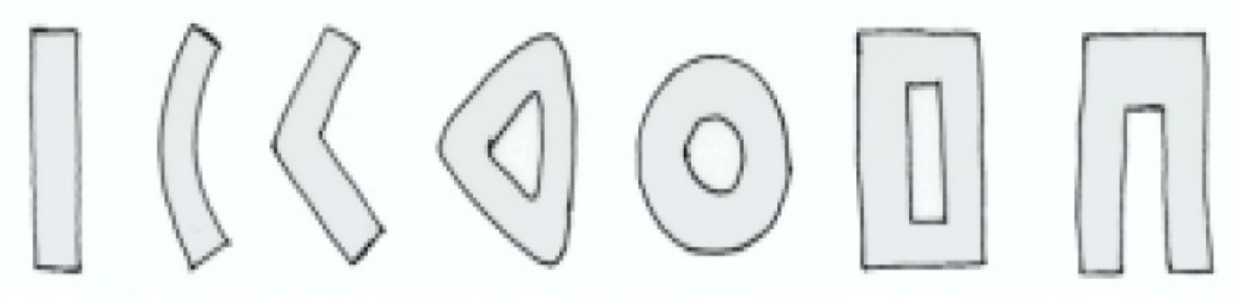


Figura 181 – Partidos formais conceituais (em planta) favoráveis à ventilação natural. Fonte: (KLEIVEN, 2003).

BROWN e DEKAY (2004, p. 232) estimam as proporções adequadas, em função das dimensões e direção do vento dominante (Figura 181):

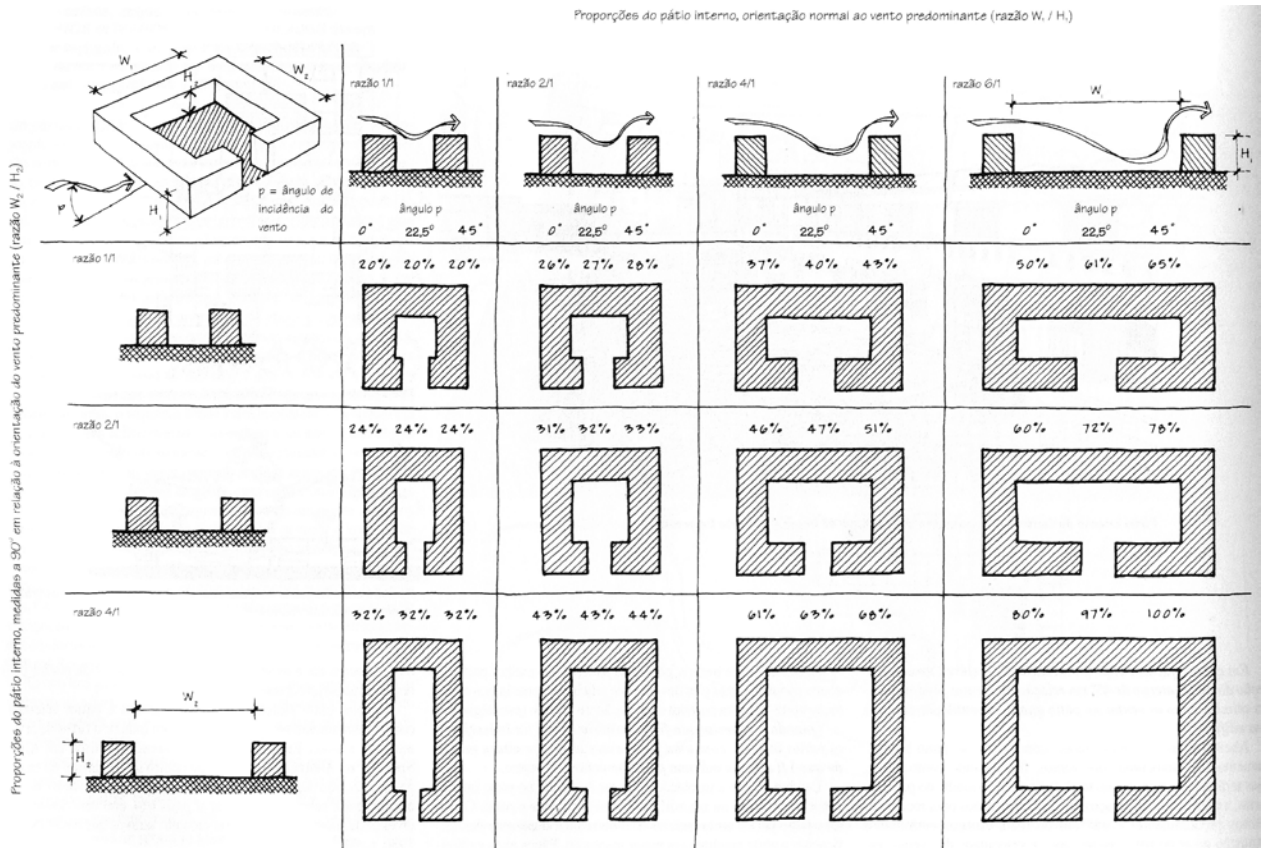


Figura 182 – Dimensionamento de pátios internos para uma boa ventilação. Fonte: (BROWN e DEKAY, 2004).

O efeito de pilotis (Figura 183) pode ser utilizado para incrementar as perdas por convecção e é uma estratégia recomendável em climas quente-úmidos, tomados os devidos cuidados destacados no início deste anexo. Como exemplo construído pode-se citar o **Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro**, projeto de Affonso Reidy. CORBELLA e YANNAS (2003) analisaram o desempenho ambiental do edifício do MAM, em termos de forma e implantação do edifício, *layout* interno e medições de temperatura no verão e inverno.

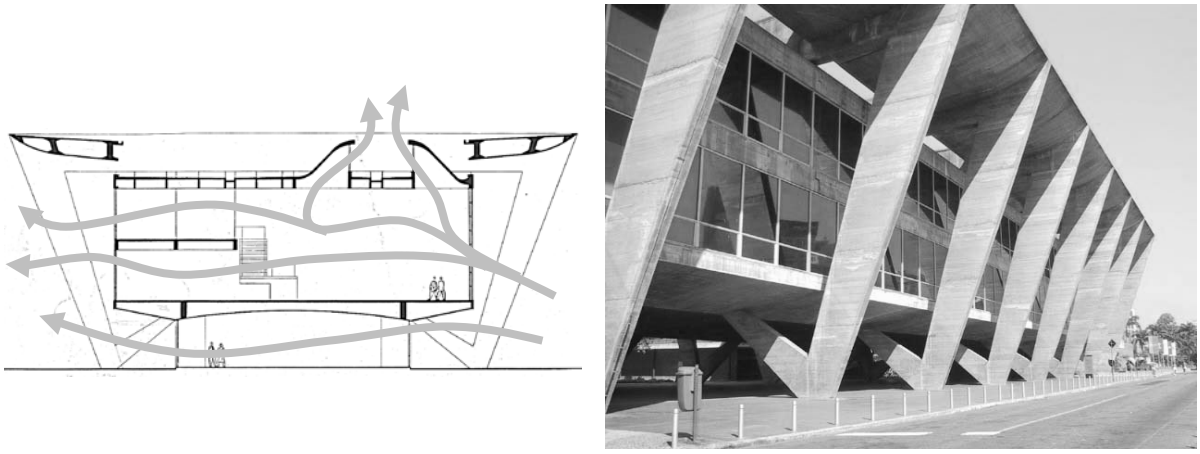


Figura 183 – MAM-RJ (Arq. Affonso Reidy) - efeito de pilotis. Adaptado de Wikimedia Commons.

Em função da tipologia e posição das aberturas no interior dos ambientes, o fluxo de ar é determinado pela posição de paredes e aberturas internas, conforme ilustra a Figura 184 (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2006, p. 74). Uma das aplicações das simulações fluidodinâmicas discutidas neste trabalho é a possibilidade da visualização das **linhas de corrente** do escoamento (vide a Figura 80, entre os resultados apresentados).

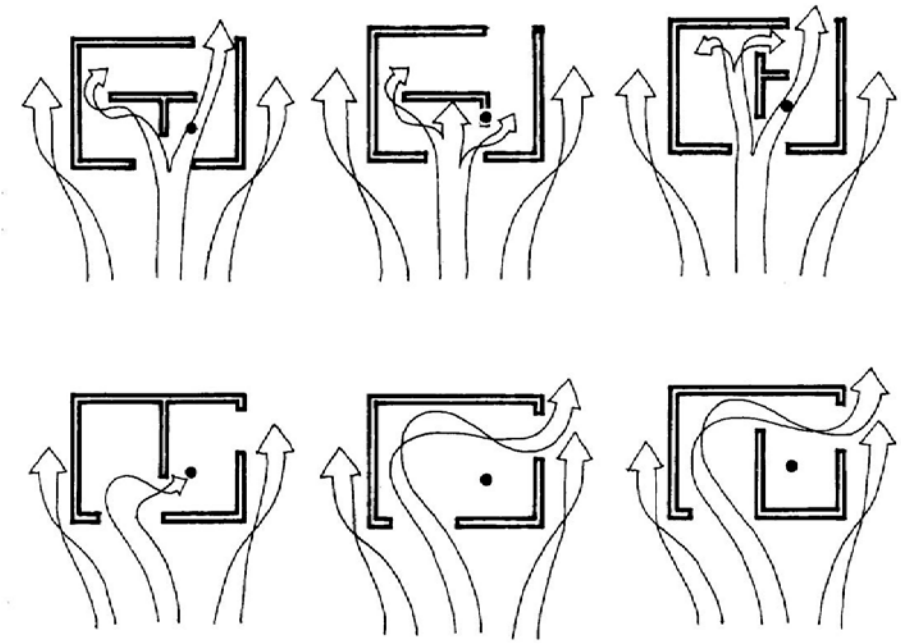


Figura 184 – Influência de partições internas no fluxo de ar. Fonte: (WATSON e LABS, 1993).

A presença de um gradiente de temperatura nas envoltórias de ambientes enclausurados, o que ocorre naturalmente devido a maior incidência de radiação solar na cobertura, acaba por induzir gradientes de temperatura e pressão no ar contido em seu interior, levando-o a assumir um movimento convectivo ascensional denominado **convecção natural**. Se forem colocadas aberturas de saída na porção mais alta do ambiente, onde o ar está mais aquecido, e aberturas de entrada na porção mais baixa, onde o ar está mais frio, o movimento convectivo natural será incrementado, produzindo-se uma **convecção forçada**. Esse incremento na velocidade do ar ascendente é denominado **efeito chaminé**. Cabe enfatizar que a presença do efeito chaminé e da convecção forçada pode ser induzida em um ambiente somente lançando mão de estratégias passivas, que maximizem o aquecimento do ar na porção mais alta dos ambientes, como por exemplo, o uso de superfícies envidraçadas ou o uso de superfícies escuras nas proximidades das aberturas mais altas de saída, configurando termo-sifões, e resultando em aquecimento solar passivo do ar. Neste caso trata-se de usar a **convecção forçada** para incrementar a ventilação **natural**.

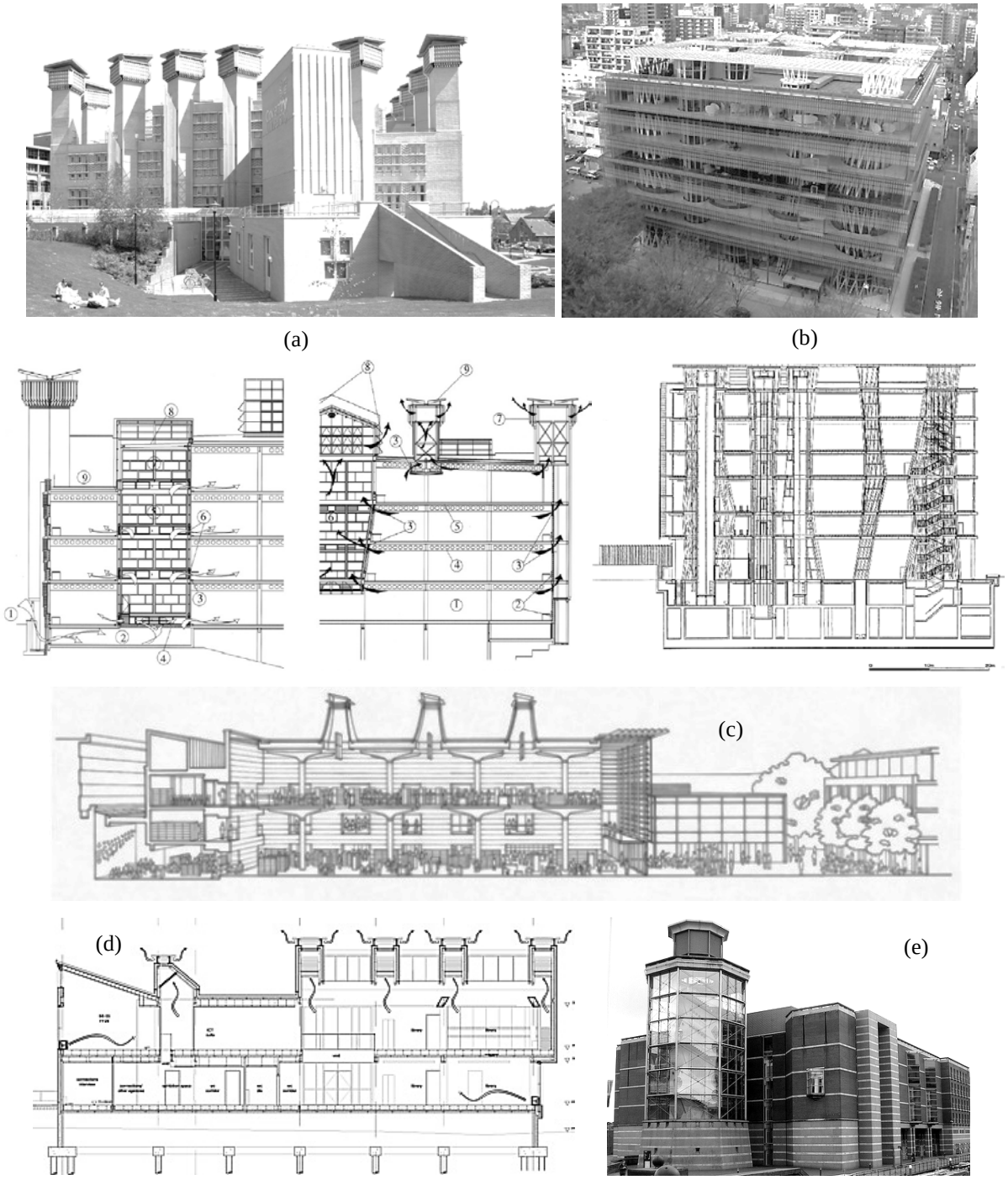


Figura 185 – Uso de chaminés solares para provocar ventilação convectiva. (a) Biblioteca Lanchester, Universidade de Coventry, Inglaterra. (b) Mídiateca de Sendai, Japão. (c) Biblioteca Pública de Brighton, Inglaterra. (d) Biblioteca Paignton, Torbay, Inglaterra. (e) Royal Armouries Museum, Leeds, Inglaterra. Fontes: (DAVEY, 2009; EDWARDS, 2011; KLEIVEN, 2003; LOMAS, 2007; ITO, 2001).

Emprega-se o termo **ventilação forçada** quando são usados ventiladores ou exaustores para obter o movimento do ar, seja no sentido vertical – incrementando o efeito chaminé – seja no sentido horizontal, através de aberturas ou dutos de insuflação e exaustão. Nesse caso, vale esclarecer que a ventilação forçada também pode ser obtida por meio de dispositivos

passivos, como os **exaustores eólicos**, que proporcionam exaustão, sem o uso de energia. Exaustores e ventiladores, devido ao baixo consumo, podem também ser alimentados por energia fotovoltaica (ROAF et al., 2006, cap. 8). Os sistemas de ventilação **híbridos** caracterizam-se pela mescla de estratégias passivas e ativas (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2006, p. 27; KLEIVEN, 2003, p. 48). EICKER (2009, p. 129) e SCHILKEN (2008) descrevem o uso de uma fachada fotovoltaica utilizada para alimentar um sistema ativo de resfriamento por desumidificação em uma biblioteca pública espanhola (seção 2.4).

Alguns recursos arquitetônicos podem ser utilizados para aumentar o efeito chaminé: uso de aberturas no topo de caixas de escada, lanternins, *sheds* e outras aberturas zenitais, que normalmente são também utilizadas para iluminação zenital e também as caixas d'água (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2006, p. 80; KWOK e GRONDZIK, 2007, p. 146). Cabe enfatizar que para um bom funcionamento do sistema, é necessário o correto posicionamento em relação à direção dominante dos ventos para que seja formada uma zona de baixa pressão na abertura de saída do ar. KLEIVEN (2003, cap. 7) descreve detalhadamente recursos arquitetônicos para incrementar a ventilação natural, classificando-os quanto ao local/tipo de aplicação no edifício: fachadas, cobertura, seções em planta e corte (proporções, caminhos do fluxo de ar, zoneamentos) e espaços internos (conexões, hierarquia, materiais e detalhes).

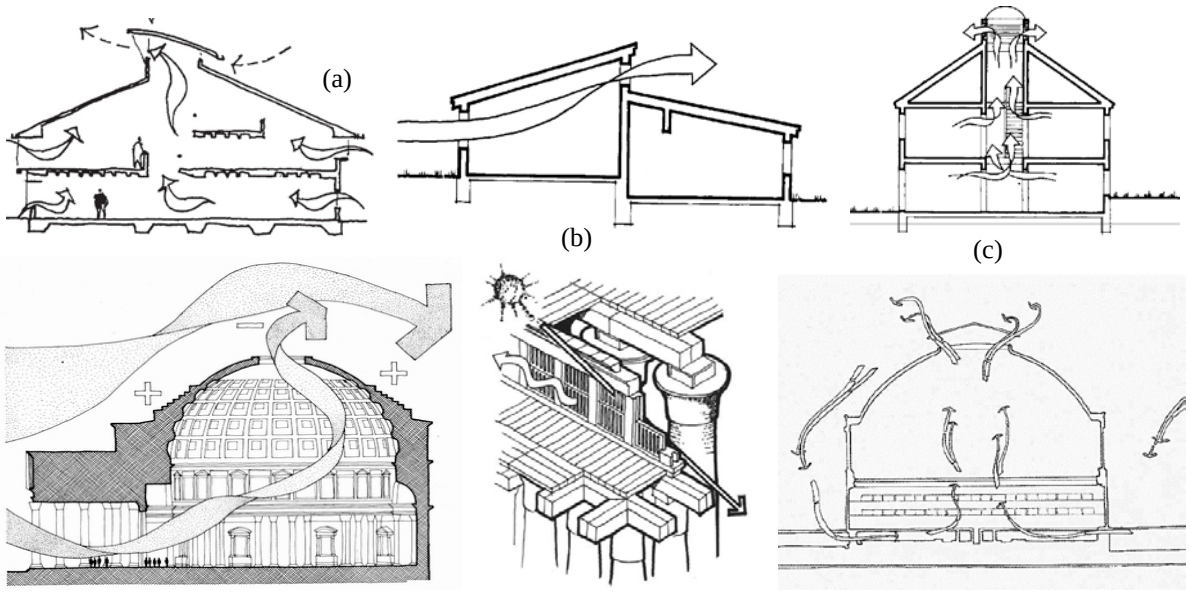


Figura 186 – Uso de aberturas superiores para incrementar o efeito chaminé. (a) Lanternim – Orchard Centre, Univ. Birmingham, Inglaterra; (b) *Shed* (vide p. ex. Biblioteca Pública de Kilton, EUA); (c) Abertura sobre circulação vertical; (d) Panteão romano. (e) Templo de Karnak, Egito; (f) Museu Britânico. Fontes: (BATTLE McCARTHY, 1999; BROWN e DEKAY, 2004; PHILLIPS, 2004; ROMERO, 2001; WATSON e LABS, 1993).

BROWN e DEKAY (2004) apresentam esquemas de organização de espaços internos que utilizam simultaneamente a ventilação cruzada e o efeito chaminé (Figura 187). HERTZ (1998) compila princípios de ventilação e outras estratégias bioclimáticas adequadas a regiões quente-úmidas:

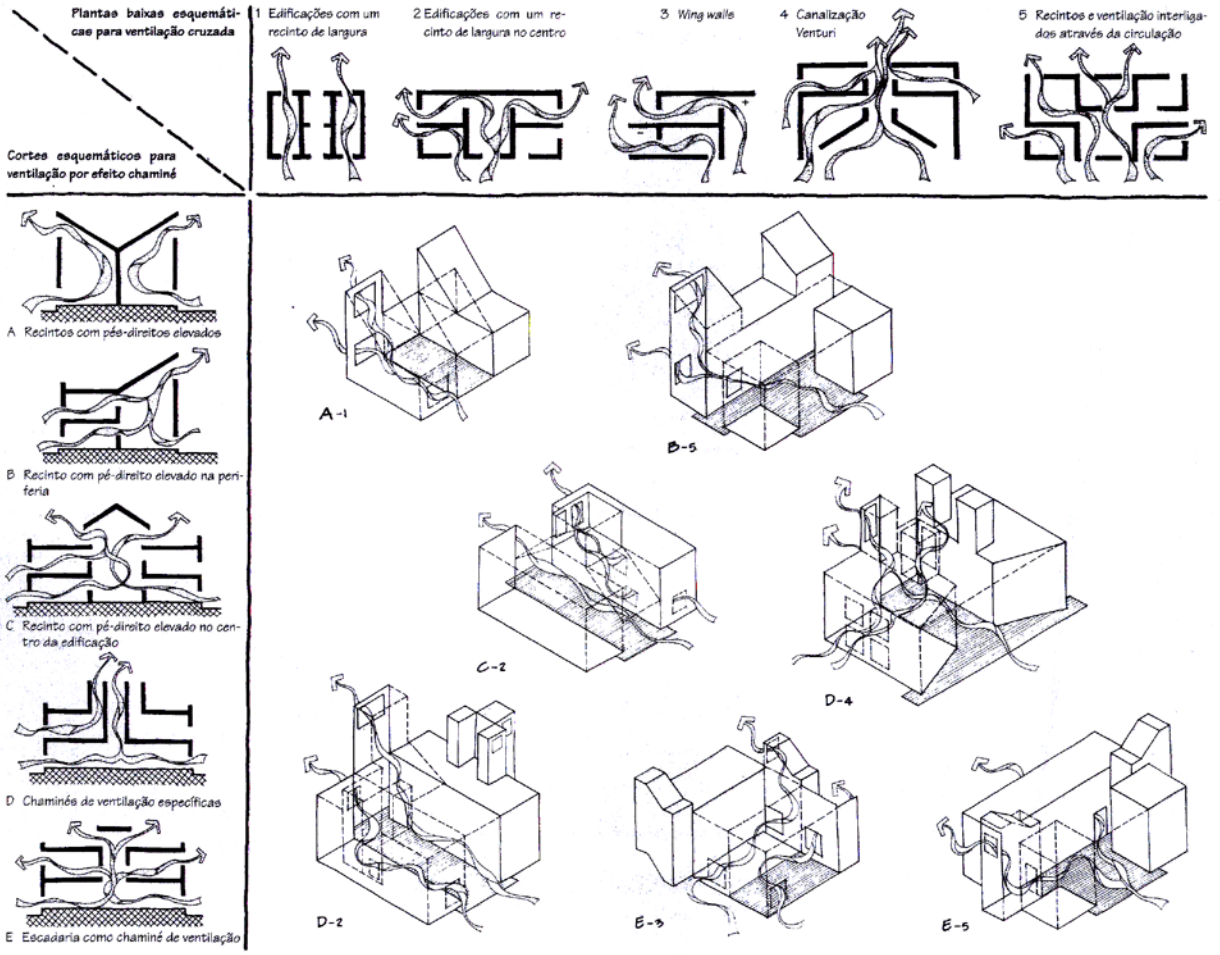


Figura 187 – Estratégias para organização de espaços utilizando ventilação cruzada e efeito chaminé. Fonte: (BROWN e DEKAY, 2004).

BAKER (1987), SCIGLIANO e HOLLO (2001) e WATSON e LABS (1993) estudam detalhes das estratégias e componentes construtivos citados na Figura 187. SCIGLIANO e HOLLO (2001) focam nas características de galpões industriais e comerciais que influenciam no efeito chaminé. Edifícios que abrigam coleções guardam semelhanças formais com esse tipo de edifício, já que tendem a apresentar volumes mais horizontalizados, com grandes áreas de cobertura. ALLEN (2000) e SCIGLIANO e HOLLO (2001, p. 64) tratam ainda de um tema que interessa ao Gerenciamento de Riscos aplicado à conservação do Patrimônio Cultural: o comportamento do fluxo de ar no interior dos edifícios em caso de **incêndio**.

Nos climas quente-secos devido à baixa umidade do ar, o solo costuma ser poeirento e as temperaturas externas durante o dia tendem a ser altas. O uso de ventilação cruzada nessas tipologias poderia levar ao aquecimento dos ambientes por convecção, juntamente com o acúmulo de poeira. Portanto, nesse tipo de clima, busca-se uma ventilação **indireta**, que segundo os princípios da arquitetura bioclimática, poderia ser feita por meio de pátios, captadores ou chaminés, combinada com estratégias de umidificação, resfriamento evaporativo e resfriamento convectivo por perda para massa térmica (GOULART, 2004). É muito comum o uso de torres de vento, chamadas de *badgir* ou *malqaf*, que evitam a captação do ar quente e empoeirado próximo ao solo e são comumente empregadas em conjunto com estratégias de resfriamento, às vezes funcionando apenas à noite para maximizar esse efeito[172]. BAKER (1987, p. 132) apresenta um método para avaliar a eficiência de estratégias bioclimáticas de **resfriamento passivo**.

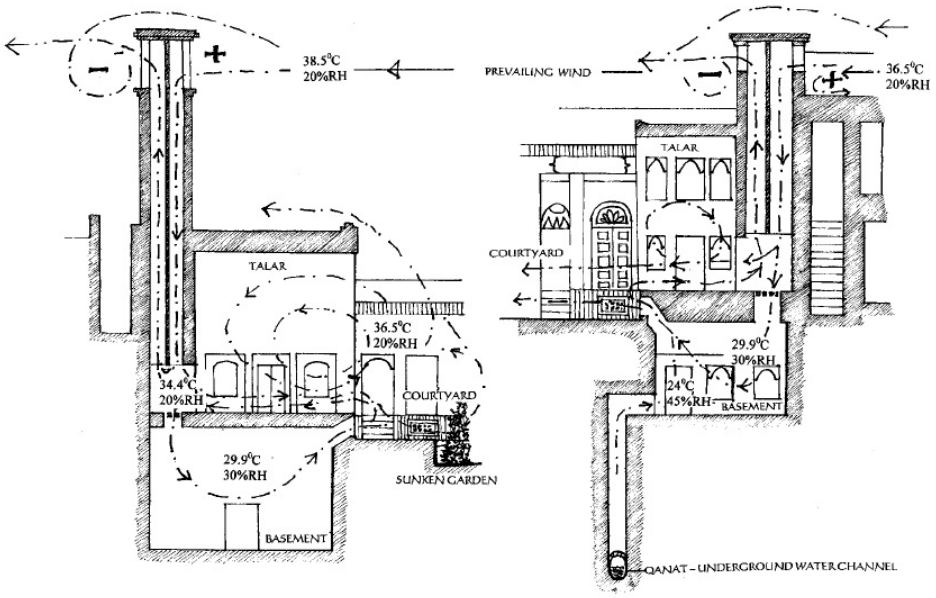


Figura 188 – Uso de torre de vento na arquitetura adaptada a climas quente-secos. Fonte: (ROAF et al., 2006).

Em climas temperados, a ventilação, pensada em termos de conforto dos usuários, geralmente visa somente à **renovação higiênica do ar**, podendo combinar-se com estratégias de **aquecimento solar passivo** (ganhos por radiação e massa termoacumuladora), com uso de

[172] (ALLARD et al., 1998, p. 236; ALMUSAED, 2011, p. 348; BAKER, 1987, p. 115; BAKER e STEEMERS, 2000, p. 38; BATTLE McCARTHY, 1999; BROWN e DEKAY, 2004; CUNHA, 2006; FATHY, 1986; GIVONI, 1976, 1981, 1991, 1994, 1998; KWOK e GRONDZIK, 2007, p. 151; MASCARÓ, 1991, ROAF et al., 2006; ROMERO, 2000, p. 55, 100; VAN LENGEN, 2004).

termo-sifões e/ou sistemas de recuperação de calor[173]. Nesta tipologia climática o balanço entre área envidraçada para iluminação sem ofuscamentos e perdas térmicas noturnas constitui um parâmetro importante para o bom desempenho ambiental do edifício (EDWARDS, 2011, p. 199). Estes dispositivos, ao aumentar a temperatura do ar que entra, acabam por desumidificá-lo, o que em geral é favorável à conservação preventiva das coleções.

O projeto do **Centro Cultural Jean-Marie Tjibaou**, localizado na Nova Caledônia, elaborado pelo arquiteto Renzo Piano é um exemplo interessante de aplicação de estratégias de ventilação natural a um edifício que abriga coleções. O partido arquitetônico considerou ensaios em túnel de vento realizados pelo CSTB (2012) e pelo escritório de consultoria Arup e Associados. Posteriormente WU et al. (2011) simularam o edifício utilizando um código CFD comparando os resultados com as intenções do projeto e propondo melhorias (ALLARD et al., 1998, p. 248; LECHNER et al. 2001).

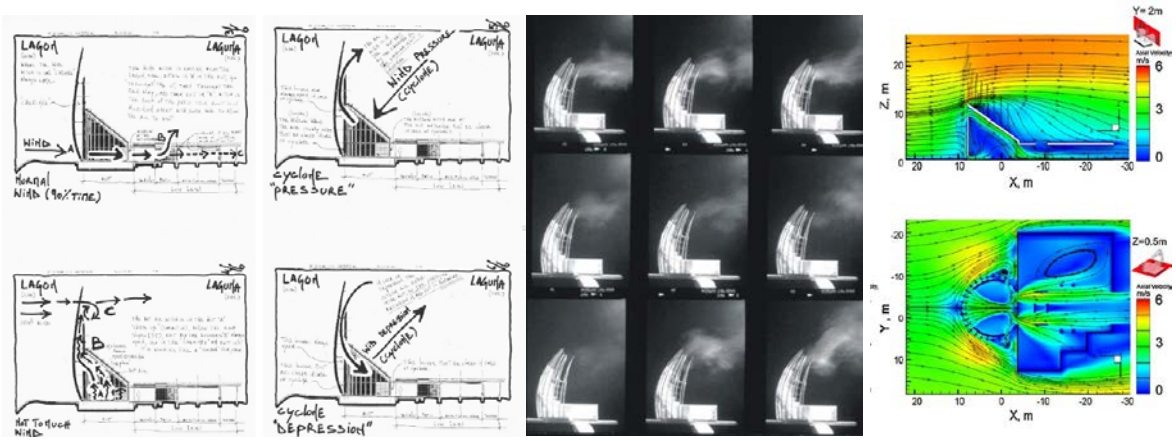


Figura 189 – Centro Cultural Jean-Marie Tjibaou (Arq. Renzo Piano). Croquis conceituais do sistema de ventilação, ensaios em túnel de vento e resultados da simulação CFD. Fontes: (CORCIEGA, s.d.; WU et al., 2011).

Outro caso que merece destaque é a **Biblioteca Central Burton Barr** localizada em **Fênix**, EUA, projetada pelo Arq. Will Bruder. Esse edifício incorpora estratégias passivas de ventilação natural, aliadas a uma correta implantação solar, com sombreamento das fachadas e sistema automatizado de regulação da luz natural.

[173] (ALMUSAED, 2011, cap. 33; BAKER e STEEMERS, 2000, cap. 4; FISCHER, 2004; GOULDING et al., 1992; KWOK e GRONDZIK, p. 105; MAZRIA, 1985; WACHBERGER, 1984; WATSON e LABS, 1993, p. 38. Vide também discussão da seção 2.4.2 acima.)

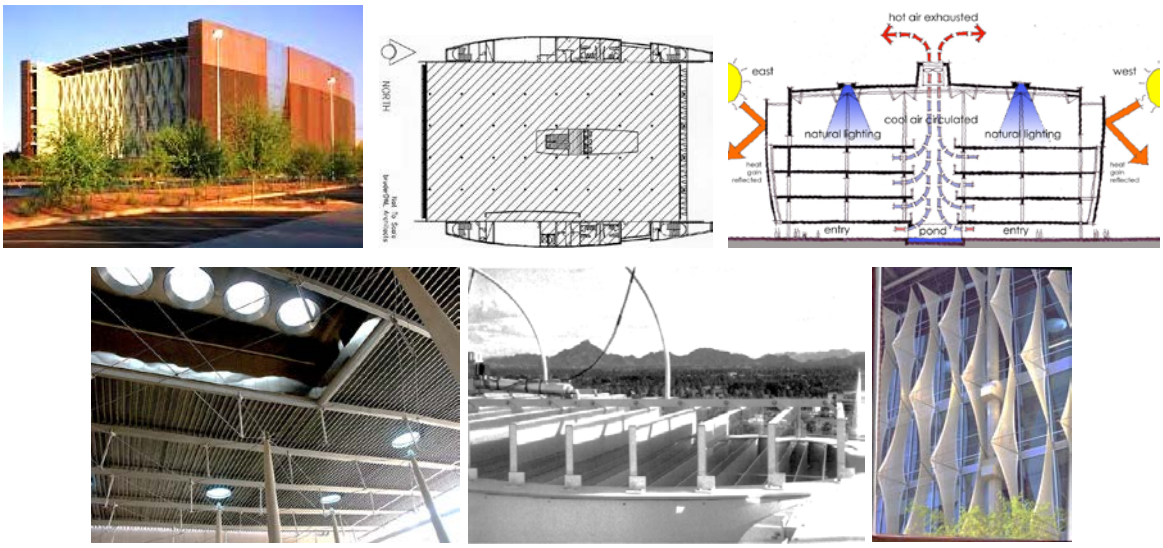


Figura 190 – Biblioteca Burton Barr, Fênix, EUA. Vista externa, planta, corte enfatizando esquema de sombreamento, iluminação e ventilação naturais; detalhes do domo de iluminação / ventilação, para-sol fachada sul. Fontes: (BAIRD, 2001; DE BARTOLO e RIMANIO, s.d.).

Mais exemplos, comentários e análises de edifícios que abrigam coleções e que incorporam o uso da ventilação natural aliado a outras estratégias bioclimáticas podem ser encontrados em ANTUNES (2011), EDWARDS (2011), FRANTZ (2007), PADFIELD e LARSEN (2004), RIBEIRO (2010), SANDS (2004), SCHAPER e SCHERER (2012), TOLEDO (1999b, 2006, 2007, 2010), TOMBAZIS et al. (2004).

No nível urbano, ou ao nível de um conjunto de edificações, o movimento do ar é influenciado pela morfologia urbana ou do conjunto. Sempre considerando a implantação em relação à direção dominante dos ventos, a ocorrência de efeitos urbanos de ventilação é determinada pelos seguintes parâmetros: (i) altura das edificações; (ii) proporções entre as dimensões dos edifícios, e o afastamento de um edifício ao outro (razões altura/largura, altura/comprimento, comprimento/largura, altura/afastamento, comprimento/afastamento, largura/afastamento - Figura 191); (iii) existência de aberturas no volume dos edifícios (p. ex. pilotis), estrangulamentos ou obstáculos ao escoamento do ar. Uma descrição detalhada sobre esses parâmetros e da ocorrência dos efeitos de ventilação urbanos, mostrados na Figura 192, pode ser encontrada em (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2006, cap. 3, MASCARÓ, 1991, ROMERO, 2000; 2001).

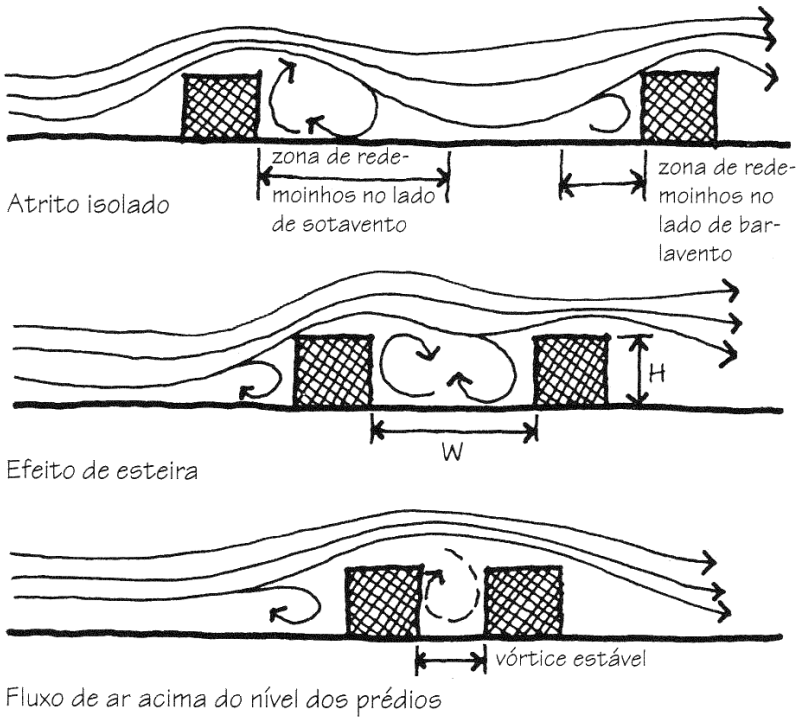


Figura 191 – Influência das dimensões e afastamento dos edifícios no fluxo de ar. Fonte: (BROWN e DEKAY, 2004).

Os modelos analíticos de cálculo de ventilação encontrados na literatura podem ser divididos em duas categorias: (i) ***modelos empíricos simplificados*** (ASSIS e FERREIRA, 2006), com equações mais simples, nas quais são usados coeficientes representativos de situações comuns e igualmente simples, normalmente adaptados de investigações práticas[174]; (ii) ***modelos realísticos*** que utilizam equações diferenciais para o tratamento dos fenômenos[175].

[174] (ALLARD et al., 1998, p. 64; ASHRAE, 2009, cap. 16; ASSIS e FERREIRA, 2006; AWBI, 1994; BAKER, 1987; BAKER e STEEMERS, 2000; BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2006; CHEN, 2009; COSTA, 1999; CÓSTOLA, 2006, cap. 10; GIVONI, 1992, 1994, 1998; LIDDAMENT, 2008; MASCARÓ, 1991; SILVA, 2003; TOLEDO, 1999; WANG e CHEN, 2012; WATSON e LABS, 1993; YOUNES et al., 2012).

[175] (ALLARD et al., 1998; AWBI, 2005, 2008; CHEN, 2009; ETHERIDGE, 2012; GHIAUS e ALLARD, 2005; SILVA, 2003).

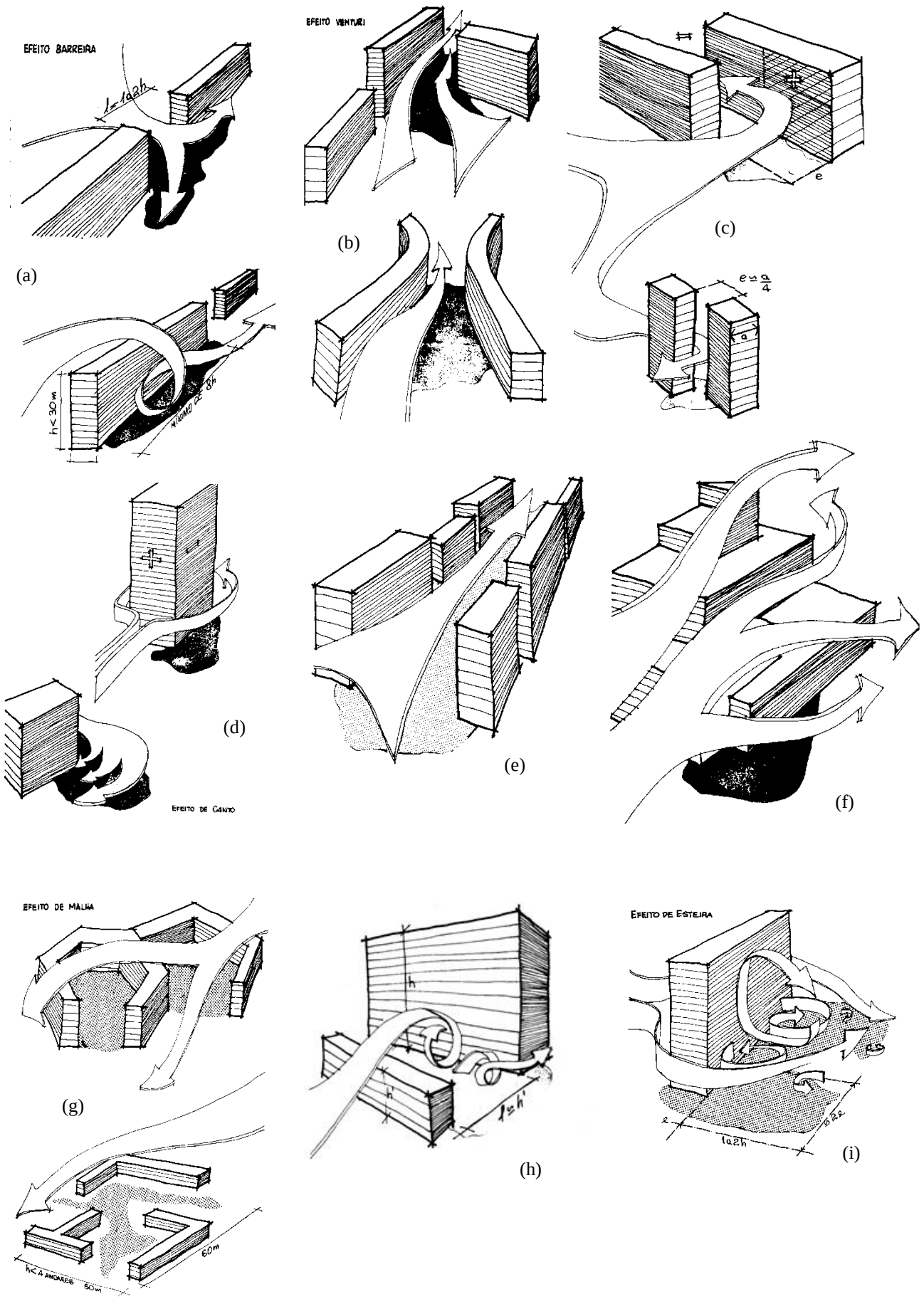


Figura 192 – Efeitos de ventilação urbana. (a) Barreira (b) Venturi (c) União de zonas de pressão diferentes (d) canto (e) canalização (f) pirâmide (g) malha (h) *Wise* (i) esteira. Fonte: (MASCARÓ, 1991)

APÊNDICE D

DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E PROCEDIMENTOS DE AFERIÇÃO

D.1 – Monitoramento contínuo em campo

Foram aferidos oito sensores/registradores de *T/UR* da marca ONSET, modelo HOBO UI-003, oito sensores/registradores de *T/UR* da marca T&D, modelo RTR-53, e duas estações da marca Oregon, modelos WMR200A e WMR968. Em Congonhas foram utilizados os sensores/registradores de *T/UR* HOBO e a estação WMR968. O Quadro 15 lista os equipamentos utilizados no monitoramento contínuo e suas características:

Quadro 15 – Características dos sensores/registradores utilizados no monitoramento contínuo em campo

Marca / Modelo	Variável	Faixa operacional	Acurácia / Resolução
Onset hobo U10-003	Temperatura	-20 a 70ºC	± 0,54ºC (0 a 50ºC)
	Umidade relativa	0 a 95%	± 3,5% (15ºC/ 5% a 45ºC 85%)
Oregon THGR 122NX	Temperatura	-30 a 60ºC	0,1ºC
	Umidade relativa	5 a 95%	±6%
Oregon THGR 968 (sensor externo)	Temperatura	-5 a 50ºC	0,1ºC
	Umidade relativa	2 a 98%	±6%
Oregon BTHR968 (sensor interno)	Temperatura	-20 a 60ºC	±0,1ºC
	Umidade relativa	2 a 98%	±6%
Oregon WGR968 Oregon RGR968	anemômetro	0 a 56m/s	0,2m/s
	pluviômetro	0 a 999mm/h	1mm

O uso de sensores/registradores de *T/UR* - *data loggers* - tem se popularizado nas pesquisas que demandam medições destas variáveis ambientais, devido ao custo deste tipo de equipamentos ter se tornado bastante acessível. Entretanto, é comum que os sensores/registradores sejam adquiridos sem um certificado de calibração, ou que sejam utilizados após o vencimento desse certificado, sem que sejam aferidos ou novamente calibrados.

Geralmente os sensores/registradores apresentam uma precisão maior para a medição de temperatura que para a medição de umidade relativa, sendo que ambas tendem a diminuir com o tempo de uso dos equipamentos, em função do aumento da incerteza, devido à deterioração química dos sensores e envelhecimento dos circuitos eletrônicos. A popularização deste tipo de sensores/registradores, nem sempre utilizados com os devidos cuidados, torna desejável o desenvolvimento de métodos simplificados para aferição do seu

funcionamento. BERNARDI (2008) descreve as características dos diversos tipos de sensores utilizados em medições microclimatológicas aplicadas à preservação do Patrimônio Cultural. SCHELLENBERG (2002) aponta as dificuldades para a calibração precisa de sensores de umidade, devido ao seu funcionamento não linear.

Dentre os métodos de calibração, destaca-se o **uso de soluções salinas saturadas**. SCHELLENBERG (2001) discute esse uso, indicando os obstáculos práticos para o estabelecimento de padrões de calibração industrializados.

A solução saturada de um determinado sal é capaz de manter uma condição de equilíbrio na umidade relativa no interior de um recipiente fechado. Ela se comporta como um material "tampão", equilibrando eventuais flutuações na umidade relativa, relacionadas a flutuações de temperatura.

SILVA et al (2007) utilizaram soluções salinas saturadas para calibrar sensores de umidade desenvolvidos pelos autores. Já WINK (1946) utilizou soluções saturadas para obtenção de curvas de equilíbrio de umidade de diversos materiais higroscópicos. LU e CHEN (2007) avaliaram a incerteza na medição de sensores de umidade calibrados com soluções salinas. CAROTENUTO e DELL'ISOLA (1996) verificaram experimentalmente a umidade de equilíbrio de onze diferentes soluções saturadas.

O trabalho de aferição dos sensores foi realizado no Laboratório de Ciência da Conservação da Escola de Belas Artes da UFMG. Inicialmente, foram pesquisados valores indicados na bibliografia para curvas de equilíbrio de umidade de diversas soluções saturadas, visando possibilitar a aferição dos sensores em diferentes regiões da sua faixa de sensibilidade.

Para a aferição foram utilizadas soluções saturadas de Na_2SO_4, KCl, $MgNO_3$ e $MgCl_2$, adotando-se as curvas de umidade indicadas por OMEGA (2011).

Os sensores foram colocados no interior de um dessecador de vidro cuja tampa tem um sistema de vedação apropriado para fazer vácuo, se necessário, o que é garantido com a aplicação de vaselina pastosa entre a tampa e a sua base, de forma a vedar completamente a passagem do ar (Figura 193). O recipiente contendo a solução saturada foi colocado na base do dissecador, sendo separado dos sensores por uma placa de porcelana perfurada.



Figura 193 – Montagem experimental para aferição, em laboratório, dos sensores utilizados.

Após a vedação do recipiente, os sensores eram deixados em repouso por um período de 24h, após o que era feita a leitura dos dados. A Figura 193 apresenta um gráfico típico resultante do procedimento de aferição:

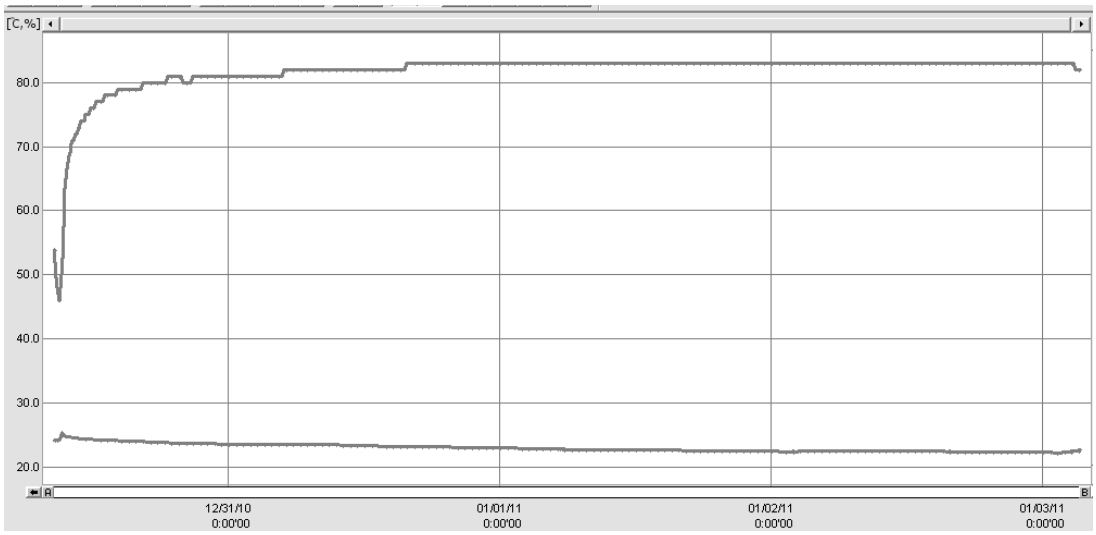


Figura 194 - Gráfico típico resultante da aferição dos sensores em laboratório. Sensor/registrador T&D 1526, solução de KCl.

Após a aferição dos sensores com a solução salina de Na_2SO_4, verificou-se que a mesma não se mostrou adequada para o procedimento, em virtude da hidratação do sal em nível molecular ($Na_2SO_4.10H_2O$), optando-se por fazer a aferição na faixa de umidade relativa em torno de 80% com o sal KCl.

Com os resultados das aferições, foi possível montar a Tabela 28, a partir da qual foram escolhidos os sensores de referência para a segunda etapa do trabalho, destacados na tabela. Após a estabilização de cada sensor, foi calculada a umidade relativa esperada com

base na temperatura constante medida nas condições de equilíbrio. Esta, por sua vez, foi comparada com a umidade relativa constante medida, obtendo-se os desvios quadráticos, para cada sensor e cada uma das três soluções salinas testadas. Foi então calculado o desvio absoluto médio cada sensor. Foram considerados como sensores de referência os que apresentaram os menores desvios absolutos médios.

Tabela 28 - Resultados das aferições dos sensores (*UR*) e escolha do sensor de referência.

sal	KCl				Mg(NO3)2				MgCl2				
cód. sensor	temp. medida (oC)	UR esperada (%)	UR medida (%)	erro absoluto (%)	temp. medida (oC)	UR esperada (%)	UR medida (%)	erro absoluto (%)	temp. medida (oC)	UR esperada (%)	UR medida (%)	erro absoluto (%)	erro absoluto médio (%)
hobo 7077	24,7	84,4	82,1	-2,3	23,7	53,3	55,8	2,5	24,2	32,8	35,0	2,2	2,3
hobo 7078	24,4	84,4	83,3	-1,1	23,9	53,2	56,2	3,0	23,8	32,9	36,6	3,7	2,6
hobo 7079	24,6	84,4	81,7	-2,7	23,6	53,3	56,0	2,7	24,3	32,8	34,0	1,2	2,2
hobo 7080	24,3	84,4	84,7	0,3	24,0	53,2	56,8	3,6	23,7	32,9	38,3	5,4	3,1
hobo 7081	24,5	84,4	84,2	-0,2	23,5	53,3	57,7	4,4	23,7	32,9	37,2	4,3	3,0
hobo 7082	24,5	84,4	81,7	-2,7	23,9	53,2	54,2	1,0	23,8	32,9	36,2	3,3	2,3
hobo 7083	24,2	84,5	83,3	-1,2	23,7	53,3	55,2	1,9	24,2	32,8	34,6	1,8	**1,6**
hobo 7084	24,2	84,5	83,3	-1,2	23,7	53,3	56,0	2,7	23,6	32,9	37,2	4,3	2,7



Figura 195 – Montagem para aferição dos sensores, na estação meteorológica do 5º. Distrito do INMET, em Belo Horizonte.

A segunda etapa de aferição foi realizada entre os dias 24/01/2011 e 23/02/2011 no 5º Distrito do Instituto Nacional de Meteorologia, com a verificação do funcionamento dos sensores escolhidos com relação à medição de temperatura. Os sensores de referência

escolhidos na primeira etapa foram colocados dentro do abrigo meteorológico, conforme mostrado na Figura 195, para serem aferidos com o par psicrométrico do INMET, tendo como referência a metodologia utilizada por ASSIS (2010) e HIRASHIMA (2010).

Para a aferição, os sensores/registradores de referência foram configurados para registrar a temperatura e a umidade relativa de 15 em 15 minutos. O INMET faz a coleta diária de dados nos seguintes horários: 0, 12 e 18h GMT, que correspondem, em Belo Horizonte, durante o horário de verão, aos horários 22h, 10h e 16h. No dia 25/01/2011, o autor fez coletas adicionais dos dados do par psicrométrico de referência do INMET, de 30 em 30min, entre 12 e 19h GMT. A Tabela 29 mostra os dados da coleta adicional. Para o cálculo de *UR* foram utilizados os algoritmos fornecidos pela ASHRAE (2009) e a pressão do ar foi interpolada a partir dos dados fornecidos pelo INMET.

Os resultados da aferição são mostrados na Figura 196, onde foram destacados os dados da Tabela 29.

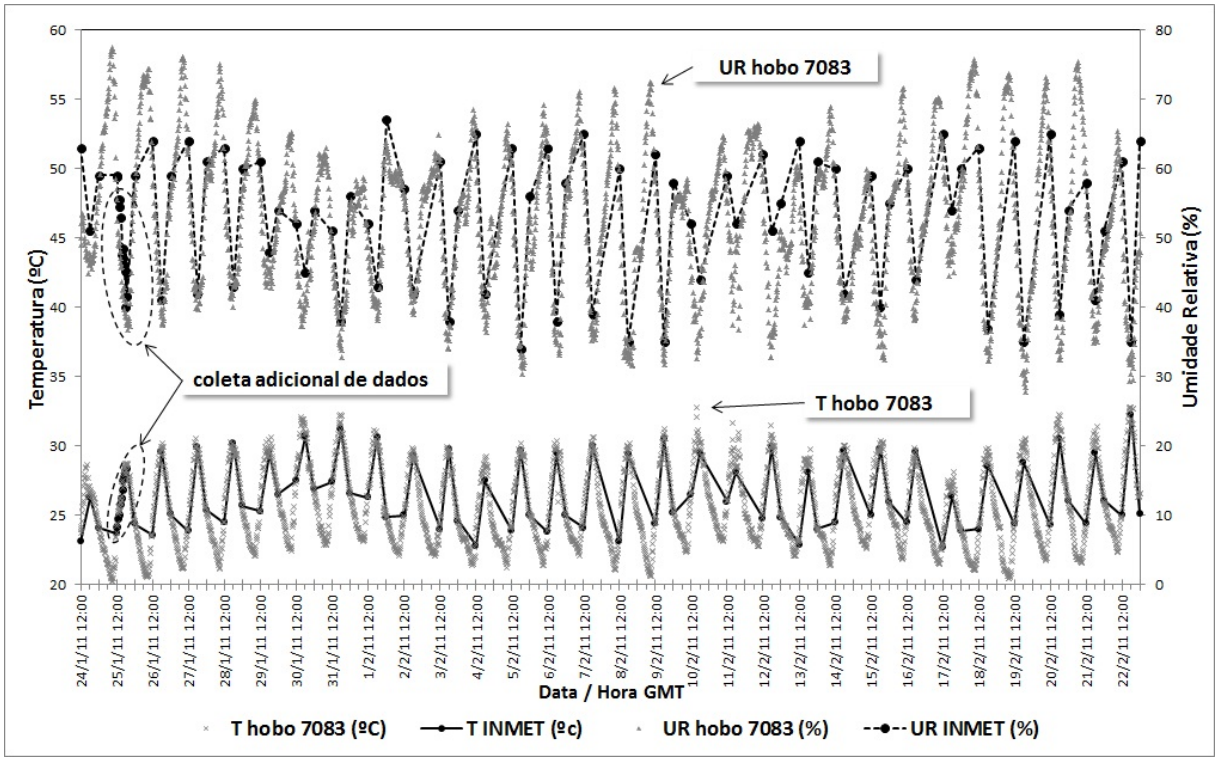


Figura 196 – Comparação dos dados medidos pelo sensor/registrador HOBO 7083 e o par psicrométrico de referência do INMET, entre os dias 24/01/2011 e 23/02/2011.

Tabela 29 - Dados climáticos coletados na estação meteorológica do 5º DISME/INMET em 25/01/2011.

Hora GMT	*T* bulbo seco INMET (ºC)	*T* bulbo úmido INMET (ºC)	Pressão (hPa)	*UR*(%)	Dir.vento (º)
12:00	23,8	18,5	914,0	61,6	90
12:30	24,2	18,4	913,7	58,8	105
13:00	24,8	18,4	913,5	55,6	100
13:30	24,8	18,4	913,3	55,6	90
14:00	25,0	18,4	913,0	54,5	100
15:00	25,8	18,8	912,7	52,9	75
15:30	26,2	18,2	912,3	47,6	100
16:00	26,8	18,6	912,0	47,1	105
16:30	27,5	19,4	911,9	48,4	90
17:00	27,8	19,2	911,8	46,0	100
17:30	28,0	19,2	911,7	45,2	20
18:00	28,2	19,0	911,6	43,3	105
18:30	27,8	19,0	911,5	45,0	100
19:00	28,4	18,8	911,4	41,5	20

A Figura 197 mostra os gráficos de dispersão de *T* e *UR* medidos nos dois sensores/registradores utilizados na Capela da Ceia, durante o período de aferição. Verifica-se que ambas as variáveis apresentaram uma correlação significativa entre os valores medidos.

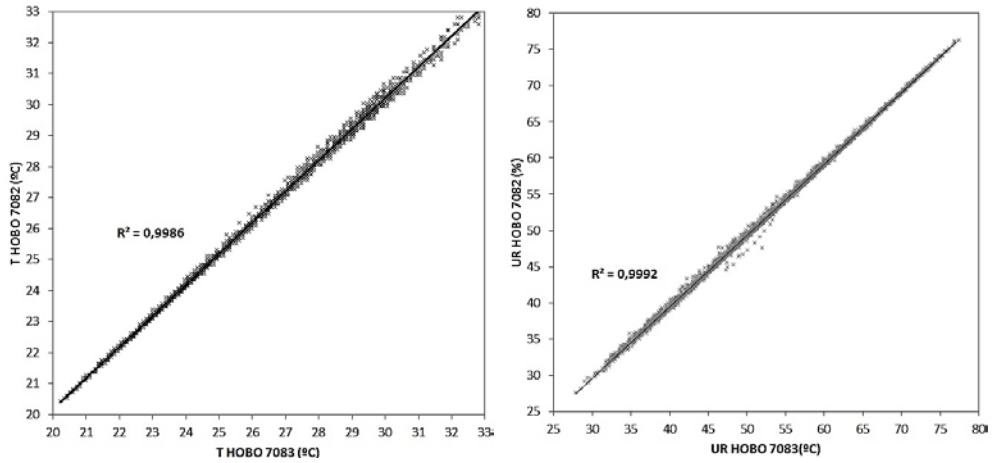


Figura 197 – Diagramas de dispersão de *T* e *UR* medidos com os sensores/registradores HOBO 7083 e 7082.

Para interpretação dos dados de direção do vento fornecidos pelo INMET utilizou-se o seguinte critério, considerando o ângulo medido a partir do eixo Norte, no sentido horário:

Tabela 30 – Critérios para interpretação dos dados de direção de vento fornecidos pelo INMET.

Direção (º)	Dado informado pelo INMET	Quadrante / ângulo considerado (º)
337,5 a 22,5	0	N (1) / 0
22,5 a 67,5	5	NE (2) / 45
67,5 a 112,5	9	E (3) / 90
112,5 a 157,5	14	SE (4) / 135
157,5 a 202,5	18	S (5) / 180
202,5 a 247,5	23	SW (6) / 225
247,5 a 292,5	27	W (7) / 270
292,5 a 337,5	32	NW (8) / 315

A estação WMR 968 foi instalada a 1,4m de altura e durante o período de aferição foi configurada para registrar a direção e velocidade do vento de 1/1min. Para comparar com os valores fornecidos pelo INMET, as velocidades medidas pela estação WMR968 foram corrigidas em altura com o perfil de vento prescrito pela ASHRAE (2009, p. 24.3) para situações de meio urbano adensado (vide seção 4.6.3.2, eq. 16).

CÓSTOLA (2006, p. 48) discute o procedimento de soma vetorial que deve ser utilizado para totalização de dados de vento. Segundo CÓSTOLA (2006, p. 51), "a escolha do intervalo de tempo a ser utilizado para a totalização é uma escolha arbitrária. A escolha de um intervalo implica na constância do vento durante o mesmo, de forma que o valor totalizado represente bem o intervalo". Arbitrou-se então um intervalo de 10min e foram calculadas médias com os dez valores registrados de 5min antes a 5min depois dos horários padrão de medição (0, 12 e 18h GMT). Para calcular a velocidade média do vento, o vetor velocidade foi decomposto nas componentes **u** e **v** e o vetor resultante foi obtido com a média dos dois escalares**,** conforme metodologia indicada nas Normais Climatológicas (BRASIL, 1992, CÓSTOLA, 2006, p. 32).

A Figura 198 mostra os resultados da aferição do sensor de direção e velocidade do vento da estação WMR968:

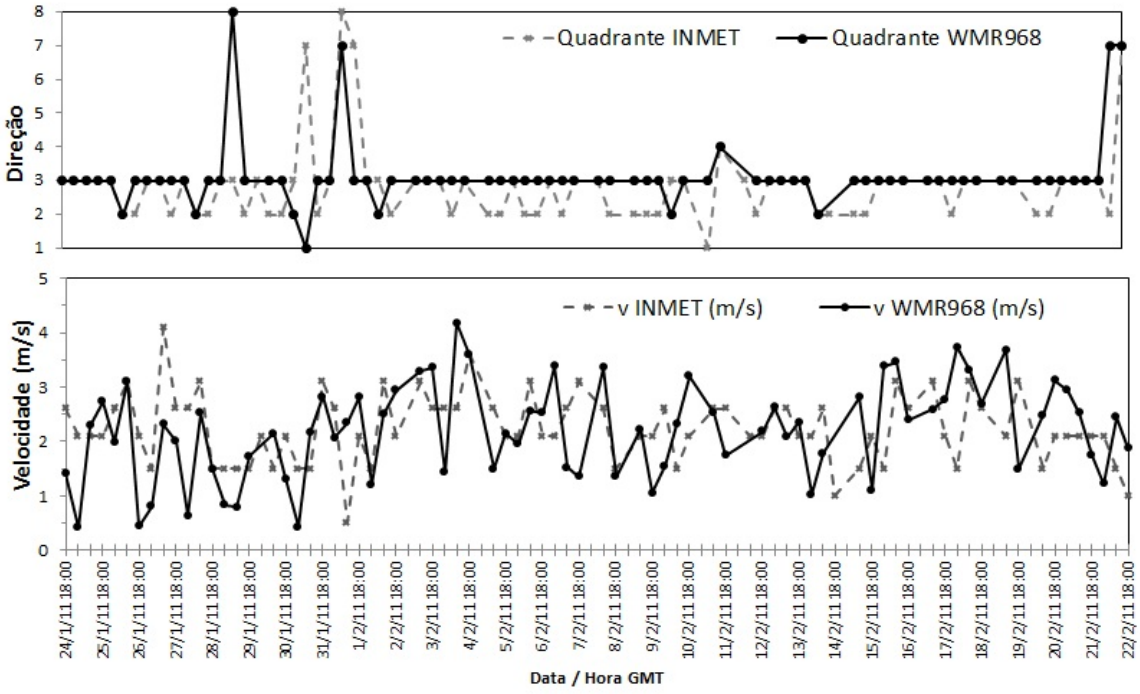


Figura 198 – Comparação de dados de velocidade e direção de vento medidos pela estação WMR968 e pela estação meteorológica do 5º DISME/INMET. Numeração dos quadrantes conforme Tabela 30.

Para comparar estatisticamente os dados de velocidade medidos na estação WMR968 com os dados fornecidos pelo INMET, foram aplicados o teste "F" de comparação entre as variâncias das amostras, e o teste "Z" de comparação entre médias de duas amostras com variâncias conhecidas. Os resultados dos testes estatísticos são mostrados nas tabelas 31 e 32.

Tabela 31 – Aferição da estação meteorológica WMR968 - teste F: duas amostras para variâncias, α=0,01)

Variável / estatística	**u INMET**	**u WMR 968**
Média	2,19	1,76
Variância	0,77	0,50
Observações	75	75
gl	74	74
F	1,54	
P(F<=f) uni-caudal	0,03	
F crítico uni-caudal	1,72	

Tabela 32 – Aferição da estação meteorológica WMR968 - teste Z: diferença entre médias com variâncias conhecidas, α=0,05)

	u INMET	**u WMR 968**
Média	2,19	1,76
Variância	0,77	0,50
Observações	75	75
Hipótese da diferença da média	0,2	
z	1,73	
P(Z<=z) uni-caudal	0,04	
z crítico uni-caudal	1,64	
P(Z<=z) bi-caudal	0,08	
z crítico bi-caudal	1,96	

O teste F confirma a hipótese de igualdade das variâncias com α=0,01 e o teste Z confirma a igualdade entre as médias para uma diferença de 0,2m/s, com α=0,05.

D.2- Ensaios em túnel de vento

O Quadro 16 lista os equipamentos utilizados nos ensaios em túnel de vento e suas características:

Quadro 16 – Equipamentos utilizados nos ensaios em túnel de vento

Sensor / Equip.	Marca / Modelo	Variável	Faixa operacional	Acurácia / Resolução
Anemômetro	Airflow TA440	Temperatura e velocidade do ar	*T*: -18 a 93ºC **u**: 0 a 30m/s	T:±0,3ºC **u**: 5% da leitura ou 0,025m/s, o que for maior
Transdutor de pressão	Scanivalve DSA3217	Pressão estática	*T*: 0 a 69ºC Δp: 2,5 a 5175 KPa	±2,5Kpa
PIV: Laser e câmera	Laser Dantec DualPower Câmera Dantec DK2740	Velocidade do ar (correlação adaptativa calculada por computador)	-	-
Gerador de névoa	Tecport F-800 Dantec Flow Tracker 700 CE	-	-	-

D.3 – Levantamento arquitetônico - escaneamento tridimensional

O Quadro 17 lista os equipamentos utilizados no levantamento arquitetônico por escaneamento tridimensional e suas características:

Quadro 17 – Características dos sensores utilizados no escaneamento tridimensional

Sensor / Equip.	Marca / Modelo	Variável	Faixa operacional	Acurácia / Resolução
Escâner	Z+F 5006i	Nuvem de pontos monocromática	0,4 a 79m	0,1mm ±0,007º
Câmera	Z+F M CAM	Nuvem de pontos monocromática	-	28 imagens por scan, 5MP

APÊNDICE E

ESTATÍSTICAS ADICIONAIS DOS DADOS CLIMÁTICOS E CONFIGURAÇÕES ADOTADAS NAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

E.1– Ouro Branco - dados climáticos - estatísticas descritivas adicionais e testes estatísticos de comparação

Tabela 33 – Ouro Branco – precipitação total mensal média (mm) – Período: 01/08/2006 a 31/07/2012.

Período / mês	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2006								16	92	153	221	249
2007	415	95	119	63	22	3	8	3	22	95	128	43
2008	320	233	279	189	4	8	1	8	21	57	262	569
2009	140	268	211	70	3	40	5	27	103	278	250	334
2010	162	117	222	33	46	3	1	0	15	192	262	316
2011	197	4	309	68	6	16	1	3	1	256	261	417
2012	488	84	185	35	83	39	1					
média global	**287**	**133**	**221**	**76**	**27**	**18**	**3**	**10**	**42**	**172**	**231**	**321**

Tabela 34 – Ouro Branco – temperatura média mensal normal (ºC) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012.

Período / mês	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2006								18,3	18,0	19,4	19,7	20,6
2007	21,1	21,1	22,1	20,1	17,5	17,4	17,2	18,0	19,4	21,1	20,6	21,5
2008	20,3	21,0	20,6	20,5	17,7	16,8	16,3	18,8	18,5	20,7	19,5	19,9
2009	21,4	21,5	21,4	19,2	17,9	16,5	17,8	17,6	20,7	20,1	21,9	20,8
2010	22,2	22,6	21,6	19,6	17,9	15,8	17,2	17,4	19,1	19,6	20,0	21,9
2011	21,9	23	20	20	17	16	16,8	19,3	18,5	19,2	18,5	20,1
2012	20,5	22	21	20	17	18	17					
média global	**21,2**	**21,8**	**21,1**	**19,9**	**17,5**	**16,7**	**17,1**	**18,2**	**19,1**	**20,0**	**20,1**	**20,8**

Tabela 35 – Ouro Branco – temperatura média mensal normal – desvio padrão (ºC) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012.

Período / mês	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2006								4,1	4,5	3,5	3,8	2,8
2007	2,8	3,1	3,3	3,2	4,0	3,9	4,4	4,1	4,5	4,4	3,5	3,4
2008	3,3	3,2	3,1	3,2	3,6	3,8	4,1	3,9	5,0	4,4	3,5	3,0
2009	3,5	3,2	3,2	3,0	3,4	3,7	4,1	3,9	4,0	3,4	3,2	3,0
2010	3,2	3,4	3,2	3,7	3,5	4,0	3,6	5,0	4,5	4,2	3,4	3,2
2011	3,1	3,3	2,8	3,1	3,6	3,8	4,1	4,8	5,4	4,1	3,8	2,7
2012	3,1	3,3	3,2	3,2	3,4	3,3	4,1					
média global	**3,2**	**3,2**	**3,2**	**3,2**	**3,6**	**3,8**	**4,1**	**4,3**	**4,7**	**4,0**	**3,6**	**3,0**

Tabela 36 – Ouro Branco – temperatura média mensal das máximas (ºC) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012.

Período / mês	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2006								24,5	23,7	23,9	24,1	25,0
2007	25,5	26,0	27,8	24,8	22,8	23,6	23,0	24,1	25,6	27,3	23,0	26,8
2008	24,9	25,7	25,4	25,7	23,1	22,0	22,4	25,1	24,9	25,8	24,4	24,4
2009	16,4	27,0	26,4	24,0	23,2	22,1	24,0	22,9	26,7	25,3	27,5	25,4
2010	27,7	28,0	26,6	25,0	23,3	21,6	23,0	24,4	25,5	25,4	24,4	27,1
2011	26,6	28	25	25	23	22	23,2	26,4	25,5	24,4	23,7	24,6
2012	25,3	27	26	25	22	23	23					
média global	**24,4**	**26,9**	**26,2**	**24,9**	**22,8**	**22,3**	**23,1**	**24,6**	**25,3**	**25,3**	**24,5**	**25,6**

Tabela 37 – Ouro Branco – temperatura máxima absoluta (ºC) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012.

Período / mês	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2006								29,4	29,8	28,8	29,7	31,1
2007	29,7	29,4	29,7	29,0	26,9	26,4	27,9	31,4	34,1	33,9	31,8	30,7
2008	29,8	29,4	28,8	28,0	26,8	25,9	27,3	30,2	32,6	32,5	30,2	30,4
2009	30,5	30,2	30,7	27,7	27,1	25,7	28,8	27,8	31,2	29,7	30,9	29,5
2010	30,0	30,6	30,5	29,4	27,7	27,2	26,8	28,6	31,2	30,1	30,3	30,7
2011	30,8	30,3	29,7	29,0	27,9	25,6	27,5	30,2	32,3	31,7	28,7	29,0
2012	29,3	30,6	31,1	29,1	26,5	27,3	27,0					
máxima	**30,8**	**30,6**	**31,1**	**29,4**	**27,9**	**27,3**	**28,8**	**31,4**	**34,1**	**33,9**	**31,8**	**31,1**

Tabela 38 – Ouro Branco – temperatura média mensal das mínimas (ºC) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012.

Período / mês	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2006								13,6	13,8	16,2	16,6	17,9
2007	18,3	17,6	17,5	16,6	13,2	12,5	12,7	13,0	14,4	16,2	15,2	17,6
2008	17,3	17,5	17,1	16,8	13,4	12,9	11,5	14,0	13,6	16,6	16,1	17,0
2009	11,0	17,8	18,0	15,8	14,1	12,5	13,4	13,5	16,2	16,7	18,2	17,8
2010	18,5	18,4	18,1	16,2	14,0	11,4	13,0	12,0	14,2	15,3	16,7	18,4
2011	18,4	18,7	17,6	16,3	13,5	11,9	12,1	14,1	12,9	15,6	14,9	17,2
2012	17,1	17,6	17,1	16,7	13,4	14,1	12,6					
média global	**16,8**	**17,9**	**17,6**	**16,4**	**13,6**	**12,5**	**12,5**	**13,4**	**14,2**	**16,1**	**16,3**	**17,7**

Tabela 39 – Ouro Branco – temperatura mínima absoluta (ºC) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012.

Período / mês	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2006								8,9	7,6	12,2	9,8	15,6
2007	16,7	15,2	16,3	13,8	8,0	8,5	5,9	10,0	11,1	11,8	14,2	15,5
2008	15,0	14,8	14,3	12,8	9,7	8,4	8,1	11,4	10,5	11,7	12,3	14,4
2009	14,7	16,2	14,1	12,5	11,5	7,6	8,8	10,0	13,1	12,9	15,9	14,4
2010	16,5	16,4	15,9	11,3	8,9	6,2	10,0	6,1	9,5	10,8	12,8	16,1
2011	16,3	17,1	16,3	13,1	10,2	7,5	7,5	9,3	6,5	11,1	10,1	15,0
2012	14,7	15,5	15,5	13,2	11,5	10,1	8,3					
Mínima	**14,7**	**14,8**	**14,1**	**11,3**	**8,0**	**6,2**	**5,9**	**6,1**	**6,5**	**10,8**	**9,8**	**14,4**

Tabela 40 – Ouro Branco – Umidade relativa média mensal normal (%) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012.

Período / mês	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2006								69,9	74,1	81,6	84,1	84,9
2007	86,3	78,9	71,7	80,8	76,3	72,2	70,3	62,8	62,4	66,4	77,9	75,8
2008	81,1	81,2	81,9	79,6	75,0	78,6	67,7	64,9	68,5	74,0	84,4	84,9
2009	80,5	80,9	82,1	83,0	80,8	78,3	76,5	72,7	73,0	83,4	78,0	83,9
2010	76,4	72,7	81,4	79,5	76,0	72,8	72,0	59,9	64,2	76,4	80,2	78,2
2011	75,2	67	84	80	78	77	70,0	61,0	60,9	76,5	78,4	83,3
2012	78,0	70	77	77	80	80	68					
média global	**79,6**	**75,0**	**79,7**	**80,1**	**77,8**	**76,5**	**70,8**	**65,2**	**67,2**	**76,4**	**80,5**	**81,8**

Tabela 41 – Ouro Branco – umidade relativa média mensal normal – desvio padrão (%) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012.

Período / mês	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2006								20,6	20,2	15,0	12,4	12,8
2007	12,2	14,4	16,3	14,9	16,2	18,3	19,2	19,2	20,3	20,7	15,5	16,6
2008	16,4	14,5	14,6	15,7	16,6	18,0	19,5	18,8	23,2	19,6	14,0	13,8
2009	15,2	14,7	15,3	14,6	14,9	17,2	18,4	18,8	18,1	14,4	14,6	13,8
2010	14,7	16,0	14,7	15,1	17,2	18,8	17,8	21,1	20,7	15,6	15,4	15,5
2011	15,2	16	13	13	15	16	19,2	21,7	21,8	18,1	16,7	12,1
2012	15,0	16	17	14	15	14	19					
média global	**14,8**	**15,3**	**15,1**	**14,7**	**15,8**	**17,1**	**18,9**	**20,0**	**20,7**	**17,2**	**14,8**	**14,1**

Tabela 42 – Ouro Branco – umidade relativa média mensal das máximas (%) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012.

Período / mês	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2006								91,3	92,5	95,8	96,2	96,3
2007	97,4	94,6	92,5	95,8	94,6	93,3	90,8	85,3	84,6	87,3	84,8	92,5
2008	92,7	95,4	95,9	95,0	92,8	94,0	89,3	85,8	88,3	91,3	96,8	96,1
2009	58,4	95,1	94,2	96,8	95,6	95,2	94,9	90,8	92,8	96,4	92,2	95,2
2010	91,6	90,3	94,5	94,4	91,6	90,2	91,0	83,8	84,9	93,4	93,5	92,2
2011	90,8	85,4	94,8	94,2	93,6	92,9	89,6	83,4	85,3	92,2	93,4	94,8
2012	91,5	89,9	92,0	92,9	94,2	93,4	87,9					
média global	**87,1**	**91,8**	**94,0**	**94,8**	**93,7**	**93,2**	**90,6**	**86,7**	**88,1**	**92,7**	**92,8**	**94,5**

Tabela 43 – Ouro Branco – umidade relativa máxima absoluta (%) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012.

Período / mês	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2006								100,0	100,0	99,0	99,0	99,0
2007	99,0	99,0	98,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	98,0	98,0	98,0	98,0
2008	98,0	98,0	99,0	99,0	98,0	99,0	99,0	98,0	99,0	98,0	98,0	98,0
2009	98,0	98,0	98,0	98,0	99,0	99,0	99,0	99,0	98,0	98,0	98,0	98,0
2010	98,0	98,0	98,0	98,0	96,0	97,0	97,0	97,0	96,0	96,0	97,0	96,0
2011	96,0	95,0	96,0	96,0	96,0	97,0	97,0	97,0	96,0	96,0	96,0	96,0
2012	96,0	96,0	96,0	96,0	97,0	97,0	97,0					
Máxima	**99,0**	**99,0**	**99,0**	**99,0**	**99,0**	**99,0**	**99,0**	**100,0**	**100,0**	**99,0**	**99,0**	**99,0**

Tabela 44 – Ouro Branco – umidade relativa média mensal das mínimas (%) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012.

Período / mês	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2006								40,2	49,6	60,9	65,8	65,9
2007	66,4	57,9	47,0	60,0	51,1	42,8	44,3	37,4	38,1	41,2	51,3	52,3
2008	61,3	60,6	59,2	56,2	50,3	56,0	39,9	39,3	43,3	52,4	62,4	66,2
2009	35,6	56,9	61,2	60,1	56,7	51,3	48,9	48,5	47,9	62,4	54,6	63,8
2010	52,1	49,6	60,5	54,5	51,8	47,3	45,7	32,9	40,3	52,8	60,4	55,1
2011	54,4	43,9	64,2	57,3	53,9	51,2	40,6	32,4	35,3	54,0	56,5	63,4
2012	57,8	46,1	56,1	55,4	59,7	57,6	40,7					
média global	**54,6**	**52,5**	**58,0**	**57,2**	**53,9**	**51,1**	**43,3**	**38,4**	**42,4**	**53,9**	**58,5**	**61,1**

Tabela 45 – Ouro Branco – umidade relativa mínima absoluta (%) - Período: 01/08/2006 a 31/07/2012.

Período / mês	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2006								15,0	17,0	32,0	44,0	43,0
2007	46,0	37,0	31,0	32,0	30,0	28,0	24,0	16,0	13,0	23,0	31,0	28,0
2008	32,0	41,0	39,0	36,0	31,0	30,0	15,0	19,0	12,0	22,0	39,0	30,0
2009	38,0	39,0	25,0	38,0	38,0	29,0	20,0	25,0	32,0	33,0	34,0	39,0
2010	39,0	32,0	40,0	31,0	26,0	25,0	19,0	22,0	15,0	31,0	31,0	35,0
2011	31,0	30,0	40,0	32,0	36,0	35,0	19,0	16,0	14,0	17,0	29,0	37,0
2012	41,0	31,0	20,0	30,0	32,0	38,0	23,0					
Mínima	**31,0**	**30,0**	**20,0**	**30,0**	**26,0**	**25,0**	**15,0**	**15,0**	**12,0**	**17,0**	**29,0**	**28,0**

As tabelas 46 e 47 agregam dados detalhados gerados pelo programa WR PLOTVIEW © que considera “calmaria” ventos com velocidade abaixo de 1 nó (0,514m/s).

Tabela 46 – Ouro Branco – velocidade do vento (m/s) - número de ocorrências e frequência por direção.

Período 01/08/2006 a 31/07/2012.

	Classes de velocidade (m/s) / Número de ocorrências / (%)																							
	Direções (°)	0,3 - 0,5		0,5 - 1,0		1,0 - 1,5		1,5 - 2,0		2,0 - 2,5		2,5 - 3,0		3,0 - 3,5		3,5 - 4,0		>= 4,0		Total	
1	348,75 - 11,25	71	(0,14%)	167	(0,32%)	248	(0,48%)	251	(0,48%)	300	(0,58%)	284	(0,55%)	249	(0,48%)	224	(0,43%)	357	(0,69%)	2151	(4,09%)
2	11,25 - 33,75	47	(0,09%)	130	(0,25%)	183	(0,35%)	134	(0,26%)	127	(0,24%)	72	(0,14%)	38	(0,07%)	17	(0,03%)	28	(0,05%)	776	(1,48%)
3	33,75 - 56,25	46	(0,09%)	156	(0,30%)	271	(0,52%)	336	(0,65%)	323	(0,62%)	255	(0,49%)	213	(0,41%)	143	(0,28%)	159	(0,31%)	1902	(3,62%)
4	56,25 - 78,75	62	(0,12%)	163	(0,31%)	311	(0,60%)	416	(0,80%)	586	(1,13%)	786	(1,51%)	786	(1,51%)	656	(1,26%)	650	(1,25%)	4416	(8,39%)
5	78,75 - 101,25	76	(0,15%)	240	(0,46%)	405	(0,78%)	643	(1,24%)	976	(1,87%)	1328	(2,55%)	1163	(2,23%)	783	(1,50%)	733	(1,41%)	6347	(12,07%)
6	101,25 - 123,75	128	(0,25%)	382	(0,73%)	702	(1,35%)	1356	(2,60%)	1709	(3,28%)	1562	(3,00%)	1035	(1,99%)	513	(0,99%)	267	(0,51%)	7654	(14,55%)
7	123,75 - 146,25	199	(0,38%)	575	(1,10%)	1121	(2,15%)	1735	(3,33%)	1915	(3,68%)	1511	(2,90%)	964	(1,85%)	424	(0,81%)	278	(0,53%)	8722	(16,58%)
8	146,25 - 168,75	121	(0,23%)	360	(0,69%)	545	(1,05%)	487	(0,94%)	346	(0,66%)	165	(0,32%)	86	(0,17%)	24	(0,05%)	15	(0,03%)	2149	(4,09%)
9	168,75 - 191,25	83	(0,16%)	273	(0,52%)	315	(0,61%)	235	(0,45%)	122	(0,23%)	40	(0,08%)	12	(0,02%)	6	(0,01%)	11	(0,02%)	1097	(2,09%)
10	191,25 - 213,75	49	(0,09%)	187	(0,36%)	236	(0,45%)	169	(0,33%)	101	(0,19%)	34	(0,07%)	17	(0,03%)	12	(0,02%)	13	(0,03%)	818	(1,56%)
11	213,75 - 236,25	72	(0,14%)	195	(0,37%)	239	(0,46%)	202	(0,39%)	128	(0,25%)	79	(0,15%)	30	(0,06%)	29	(0,06%)	23	(0,04%)	997	(1,90%)
12	236,25 - 258,75	49	(0,09%)	149	(0,29%)	194	(0,37%)	224	(0,43%)	197	(0,38%)	147	(0,28%)	81	(0,16%)	53	(0,10%)	46	(0,09%)	1140	(2,17%)
13	258,75 - 281,25	51	(0,10%)	166	(0,32%)	196	(0,38%)	239	(0,46%)	273	(0,52%)	242	(0,47%)	227	(0,44%)	176	(0,34%)	249	(0,48%)	1819	(3,46%)
14	281,25 - 303,75	46	(0,09%)	125	(0,24%)	143	(0,28%)	152	(0,29%)	175	(0,34%)	178	(0,34%)	202	(0,39%)	142	(0,27%)	319	(0,61%)	1482	(2,82%)
15	303,75 - 326,25	54	(0,10%)	166	(0,32%)	190	(0,37%)	215	(0,41%)	240	(0,46%)	254	(0,49%)	235	(0,45%)	165	(0,32%)	477	(0,92%)	1996	(3,79%)
16	326,25 - 348,75	52	(0,10%)	208	(0,40%)	274	(0,53%)	353	(0,68%)	445	(0,86%)	507	(0,97%)	497	(0,95%)	435	(0,84%)	814	(1,56%)	3585	(6,82%)
	Sub-Total	1206	(2,29%)	3642	(6,92%)	5573	(10,59%)	7147	(13,59%)	7963	(15,14%)	7444	(14,15%)	5835	(11,09%)	3802	(7,23%)	4439	(8,44%)	47051	(89,44%)
	Calmaria																			5020	(9,54%)
	Dados faltantes																			537	(1,02%)
	Total																			52608	(100,00%)

Tabela 47 – Ouro Branco – velocidade do vento (m/s) - número de ocorrências e frequência por direção.

Período 01/07/2011 a 30/06/2012.

	Classes de velocidade (m/s) / Número de ocorrências / (%)																							
	Direções (°)	0,3 - 0,5		0,5 - 1,0		1,0 - 1,5		1,5 - 2,0		2,0 - 2,5		2,5 - 3,0		3,0 - 3,5		3,5 - 4,0		>= 4,0		Total	
1	348,75 - 11,25	12	(0,14%)	21	(0,24%)	42	(0,48%)	69	(0,79%)	53	(0,60%)	52	(0,59%)	42	(0,48%)	47	(0,54%)	73	(0,83%)	411	(4,68%)
2	11,25 - 33,75	6	(0,07%)	24	(0,27%)	39	(0,44%)	34	(0,39%)	16	(0,18%)	8	(0,09%)	1	(0,01%)	1	(0,01%)	1	(0,01%)	130	(1,48%)
3	33,75 - 56,25	11	(0,13%)	24	(0,27%)	48	(0,55%)	52	(0,59%)	67	(0,76%)	51	(0,58%)	49	(0,56%)	30	(0,34%)	21	(0,24%)	353	(4,02%)
4	56,25 - 78,75	8	(0,09%)	28	(0,32%)	59	(0,67%)	66	(0,75%)	104	(1,19%)	156	(1,78%)	127	(1,45%)	92	(1,05%)	74	(0,84%)	714	(8,13%)
5	78,75 - 101,25	6	(0,07%)	40	(0,46%)	79	(0,90%)	156	(1,78%)	241	(2,75%)	296	(3,37%)	225	(2,56%)	139	(1,58%)	78	(0,89%)	1260	(14,34%)
6	101,25 - 123,75	13	(0,15%)	56	(0,64%)	141	(1,61%)	276	(3,14%)	350	(3,99%)	289	(3,29%)	193	(2,20%)	89	(1,01%)	30	(0,34%)	1437	(16,36%)
7	123,75 - 146,25	25	(0,29%)	94	(1,07%)	233	(2,65%)	325	(3,70%)	330	(3,76%)	268	(3,05%)	190	(2,16%)	54	(0,62%)	50	(0,57%)	1569	(17,86%)
8	146,25 - 168,75	14	(0,16%)	59	(0,67%)	100	(1,14%)	84	(0,96%)	67	(0,76%)	28	(0,32%)	7	(0,08%)	3	(0,03%)	1	(0,01%)	363	(4,13%)
9	168,75 - 191,25	17	(0,19%)	49	(0,56%)	46	(0,52%)	37	(0,42%)	19	(0,22%)	10	(0,11%)	3	(0,03%)	1	(0,01%)	2	(0,02%)	184	(2,10%)
10	191,25 - 213,75	8	(0,09%)	23	(0,26%)	41	(0,47%)	31	(0,35%)	24	(0,27%)	7	(0,08%)	4	(0,05%)	3	(0,03%)	1	(0,01%)	142	(1,62%)
11	213,75 - 236,25	8	(0,09%)	26	(0,30%)	49	(0,56%)	33	(0,38%)	22	(0,25%)	14	(0,16%)	6	(0,07%)	2	(0,02%)	2	(0,02%)	162	(1,84%)
12	236,25 - 258,75	4	(0,05%)	19	(0,22%)	31	(0,35%)	35	(0,40%)	32	(0,37%)	19	(0,22%)	9	(0,10%)	3	(0,03%)	5	(0,06%)	157	(1,79%)
13	258,75 - 281,25	9	(0,10%)	26	(0,30%)	29	(0,33%)	36	(0,41%)	35	(0,40%)	39	(0,44%)	39	(0,44%)	19	(0,22%)	20	(0,23%)	252	(2,87%)
14	281,25 - 303,75	7	(0,08%)	15	(0,17%)	19	(0,22%)	19	(0,22%)	32	(0,37%)	26	(0,30%)	32	(0,37%)	18	(0,21%)	48	(0,55%)	216	(2,46%)
15	303,75 - 326,25	10	(0,11%)	24	(0,27%)	22	(0,25%)	32	(0,37%)	60	(0,68%)	55	(0,63%)	48	(0,55%)	30	(0,34%)	71	(0,81%)	352	(4,01%)
16	326,25 - 348,75	6	(0,07%)	36	(0,41%)	43	(0,49%)	62	(0,71%)	70	(0,80%)	100	(1,14%)	78	(0,89%)	64	(0,73%)	142	(1,62%)	601	(6,84%)
	Sub-Total	164	(1,87%)	564	(6,42%)	1021	(11,62%)	1347	(15,34%)	1522	(17,33%)	1418	(16,14%)	1053	(11,99%)	595	(6,77%)	619	(7,05%)	8303	(94,52%)
	Calmaria																			476	(5,42%)
	Dados faltantes																			5	(0,06%)
	Total																			8784	(100,00%)

A Tabela 48 compara as estatísticas descritivas dos dados climáticos de Ouro Branco, para os períodos 2006-2012 (médias horárias) e 2011-2012:

Tabela 48 – Ouro Branco – estatísticas descritivas dos dados climáticos. Períodos: 2006-2012 e 2011-2012 (médias horárias).

Estatística / Variável	**T_e 2006-2012**	**T_e 2011-2012**	**UR_e 2006-2012**	**UR_e 2011-2012**
Média	19,448	19,140	75,861	74,481
Erro padrão	0,036	0,043	0,146	0,197
Mediana	19,267	18,700	78,833	79,000
Modo	18,283	17,300	89,167	96,000
Desvio padrão	3,414	4,052	13,657	18,402
Variância da amostra	11,654	16,422	186,525	338,633
Curtose	-0,756	-0,194	-0,227	-0,106
Assimetria	0,036	0,312	-0,713	-0,812
Intervalo	16,667	25,800	65,500	83,000
Mínimo	11,433	6,500	31,500	14,000
Máximo	28,100	32,300	97,000	97,000

Tabela 49 – Ouro Branco – testes de aderência dos dados de T_e e UR_e à normalidade

Estatística / Variável	**Estatística Kolmogorov-Smirnov**	**Valor P**
T_e 2006-2012 (médias horárias)	0,035	5,633E-27
T_e 2011-2012 (médias horárias)	0,056	2,466E-72
UR_e 2006-2012	0,093	1E-207
UR_e 2011-2012	0,116	0

Tabela 50 – Ouro Branco – teste F: duas amostras para variâncias – T_e 2006-2012 *x* T_e 2011-2012 (médias horárias, α=0,05)

Variável / estatística	**T_e 2006-2012**	**T_e 2011-2012**
Média	19,448	19,140
Variância	11,654	16,422
Observações	8760	8760
Gl	8759	8759
F	0,7096	
P(F<=f) uni-caudal	0	
F crítico uni-caudal	0,9654	

Tabela 51 – Ouro Branco – Teste F: duas amostras para variâncias – UR_e 2006-2012 *x* UR_e 2011-2012 (médias horárias, α=0,05)

Variável / estatística	**UR_e 2006-2012**	**UR_e 2011-2012**
Média	75,860	74,481
Variância	186,525	338,633
Observações	8760	8760
Gl	8759	8759
F	0,551	
P(F<=f) uni-caudal	0	
F crítico uni-caudal	0,965	

Tabela 52 – Ouro Branco – teste T: duas amostras presumindo variâncias equivalentes – T_e 2006-2012 *x* T_e 2011-2012 (médias mensais, α=0,05)

Variável / estatística	**T_e 2006-2012**	**T_e 2011-2012**
Média	19,46	19,16
Variância	2,9	2,45
Observações	12	12
Variância agrupada	2,71	
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	22	
Stat t	0,44	
P(T<=t) uni-caudal	0,33	
t crítico uni-caudal	1,72	
P(T<=t) bi-caudal	0,66	
t crítico bi-caudal	2,07	

Tabela 53 – Ouro Branco – teste T: duas amostras presumindo variâncias equivalentes – UR_e 2006-2012 *x* UR_e 2011-2012 (médias mensais, α=0,05)

Variável / estatística	**UR_e 2006-2012**	**UR_e 2011-2012**
Média	75,88	74,41
Variância	29,45	54,73
Observações	12	12
Variância agrupada	42,09	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	22	
Stat t	0,55	
P(T<=t) uni-caudal	0,29	
t crítico uni-caudal	1,72	
P(T<=t) bi-caudal	0,59	
t crítico bi-caudal	2,07	

Tabela 54 – teste F: duas amostras para variâncias, para comparação de T_e medida no IPHAN-Congonhas (período: 28/12/2011 a 01/01/2012 e 13/03/2012 a 15/03/2012) com T_e medida no INMET-Ouro Branco (médias horárias de 2006 a 2012 nas datas correspondentes), α=0,1

Variável / estatística	***T* INMET Ouro Branco**	***T* IPHAN Congonhas**
Média	21,05	22,67
Variância	5,38	6,05
Observações	137	137
gl	136	136
F	0,89	
P(F<=f) uni-caudal	0,25	
F crítico uni-caudal	0,80	

Tabela 55 – teste F: duas amostras para variâncias, para comparação de UR_e medida no IPHAN-Congonhas (período: 28/12/2011 a 01/01/2012 e 13/03/2012 a 15/03/2012) com UR_e medida no INMET-Ouro Branco (médias horárias de 2006 a 2012 nas datas correspondentes), α=0,1

Variável / estatística	***UR* INMET Ouro Branco**	***UR* IPHAN Congonhas**
Média	82,44	81,68
Variância	80,46	106,03
Observações	137	137
gl	136	136
F	0,76	
P(F<=f) uni-caudal	0,05	
F crítico uni-caudal	0,80	

Tabela 56 – teste Z: duas amostras para médias com variâncias conhecidas, para comparação de **u** medida no IPHAN-Congonhas (período: 28/12/2011 a 01/01/2012 e 13/03/2012 a 15/03/2012) com **u** medida no INMET-Ouro Branco nas datas correspondentes, α=0,05

Variável / estatística	**u INMET Ouro Branco**	**u IPHAN Congonhas**
Média	2,22	2,16
Variância conhecida	0,56	5,53
Observações	137	137
Hipótese da diferença de média	0	
z	0,27	
P(Z<=z) uni-caudal	0,39	
z crítico uni-caudal	1,64	
P(Z<=z) bi-caudal	0,78	
z crítico bi-caudal	1,96	

E.2– Capela da Ceia - Estatísticas

Tabela 57 – Capela da Ceia – Estatísticas de regressão e ANOVA para o modelo de cálculo de temperatura interna média diária

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,883115163
R-Quadrado	0,779892391
R-quadrado ajustado	0,778676326
Erro padrão	0,912603948
Observações	365

ANOVA

	gl	*SQ*	*MQ*	*F*	*F de significação*
Regressão	2	1068,249956	534,1249778	641,3250458	1,0398E-119
Resíduo	362	301,49024	0,832845967		
Total	364	1369,740195			

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*	*Inferior 95,0%*	*Superior 95,0%*
Interseção	-0,109417932	0,566965381	-0,192988735	0,847076019	-1,224377359	1,005541496	-1,224377359	1,005541496
Variável X 1 (Gte)	1,035424151	0,029054299	35,6375538	1,9889E-120	0,978287744	1,092560558	0,978287744	1,092560558
Variável X 2 (We - Gte)	0,213287227	0,063915648	3,33701108	0,000934672	0,087594624	0,33897983	0,087594624	0,33897983

Tabela 58 – Capela da Ceia – Estatísticas de regressão e ANOVA para o modelo de cálculo de razão de umidade interna média diária

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,876822912
R-Quadrado	0,768818419
R-quadrado ajustado	0,767541172
Erro padrão	1,051501406
Observações	365

ANOVA

	gl	*SQ*	*MQ*	*F*	*F de significação*
Regressão	2	1331,063687	665,5318436	601,9343456	7,5082E-116
Resíduo	362	400,247185	1,105655207		
Total	364	1731,310872			

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*	*Inferior 95,0%*	*Superior 95,0%*
Interseção	-0,548519608	0,37668805	-1,45616408	0,146214004	-1,28929128	0,192252063	-1,28929128	0,192252063
Variável X 1 (Gwe)	1,048873745	0,030563567	34,31777907	7,5845E-116	0,988769304	1,108978186	0,988769304	1,108978186
Variável X 2 (We - Gwe)	0,262167872	0,090280364	2,903930151	0,003911166	0,084628031	0,439707712	0,084628031	0,439707712

E.3- Parâmetros utilizados para simulação no programa Energy Plus

Tabela 59 – Propriedades térmicas de materiais adotadas nas simulações computacionais e valores comparativos (* = valores estimados)

Código	Material	Espes. (m)	λ (W/m.K)	ρ (kg/m3)	c (J/kg.K)	α*	U ($W/m^2.K$)	Ref.
AR10	Ar	0,10	0,025	1,23	1008			1,2
Vid-ar	Ar	0,04	0,025	1,23	1008			
S01	Solo com umidade natural	0,001	2,1	1800	1460			8
	Argila		0,93	2100				8
	Argila ou lodo		1,5	1200-1800				2
	Solo argiloso ou siltoso		1,5	1200-1800	1670-2500			1
	Solo argiloso		2,25	2000				8
	Solo com umidade natural		2,1	1800	1460			8
	Solo seco e compactado		0,064	1500				6
	Areia		0,33	1520	800			6
	Areia seca		0,58	1500				8
	Areia úmida		1,4	1600				8
	Areia saturada de umidade		1,88	1650				8
ARG25	Argamassa de cal e areia	0,025	0,8	1600	1000	0,3		1,2
	Argamassa de cal e saibro		0,87	1600				8
	Argamassa de cal		0,73	1690				8
	Areia e cascalho		2,0	1700-2200	910-1180			1,2
	Cascalho			1000	920			6
CP100	Cantaria de pedra	1,00	1,1*	1800*	900*		0,9*	3,4,5
CP70	Cantaria de pedra	0,75	1,1*	1800*	900*		1,1*	3,4,5
	Paredes de pedra	0,74	1,349				1,823	7
	Paredes de alvenaria de granito		2,5	2800	920			8
	Paredes de alvenaria de granito	0,42		1118			3,05	9
M01	Madeira semi-densa	0,01	0,15	600	2300	0,4		8,10
M04	Madeira semi-densa	0,04	0,15	600	2300	0,8		8,10
	Madeira semi-densa		0,18	565-750				2
	Madeira (carvalho)		0,17	545	2385			12
	Madeira (carvalho)		0,146	610	2385			11
	Madeira (carvalho)		0,176	750	2390			6
	Madeira leve		0,130	610	1420			13
P05	Pedra calcária densa	0,05	1,4	2000	1000	0,7		1,2
	Pedra (propriedades médias)		1,757	2600	837			11
	Pedra calcária semi-densa		1,4	1800	880			8

A estimativa da condutividade térmica foi feita conforme indicações da ABNT 15220-2 (2005). Referências: 1) ISO, 2007; 2) SANTOS e MATIAS, 2006; 3) BAKER, 2008; 4) BAKER, 2011; 5) RYE, 2010; 6) ASHRAE, 2009; 7) CARDINALE et al., 2011; 8) MONROY, 1995; 9) MENDONÇA, 2005; 10) ABNT, 2005; 11) <www.thermtest.com>; 12) <http://firebid.umd.edu/material-database.php>; 13) ROAF et al., 2006;

Tabela 60 – Capela da Ceia – composição das envoltórias adotada no programa *Energy Plus* ©

Código	**Descrição**	**Composição (vide** Tabela 59**)**	**Material adotado no modelo EMPD (*)**
FLOOR_1	Piso revestido com pedra	P05	CONCRETE
FLOOR_2	Piso revestido c/ entablamento de madeira	S01+AR10+M01	WOOD
Exterior wall	Paredes	ARG25+CP107+ARG25	GYPSUM
Interior ceiling	Cúpula	ARG25+CP70+ARG25	GYPSUM
DOOR_1	Porta	M04	WOOD

(*) De acordo com as definições no arquivo MOISTUREMATERIALS.IDF que acompanha o *Energy Plus* ©.

E.3.1- Arquivo IDF contendo as configurações utilizadas no programa Energy Plus ©:

```
!-Generator IDFEditor 1.43
!-Option SortedOrder
!-NOTE: All comments with '!-' are ignored by the IDFEditor and are generated automatically.
!-      Use '!' comments if they need to be retained when using the IDFEditor.

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: VERSION===
Version,
    7.2;                    !- Version Identifier

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: SIMULATIONCONTROL===
SimulationControl,
    No,                     !- Do Zone Sizing Calculation
    No,                     !- Do System Sizing Calculation
    No,                     !- Do Plant Sizing Calculation
    No,                     !- Run Simulation for Sizing Periods
    Yes;                    !- Run Simulation for Weather File Run Periods

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: BUILDING===
Building,
    Untitled,               !- Name
    -22,                    !- North Axis {deg}
    Suburbs,                !- Terrain
    0.1,                    !- Loads Convergence Tolerance Value
    0.1,                    !- Temperature Convergence Tolerance Value {deltaC}
    MinimalShadowing,       !- Solar Distribution
    25,                     !- Maximum Number of Warmup Days
    ;                       !- Minimum Number of Warmup Days

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: SURFACECONVECTIONALGORITHM:INSIDE===
SurfaceConvectionAlgorithm:Inside,
    AdaptiveConvectionAlgorithm;  !- Algorithm

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: SURFACECONVECTIONALGORITHM:OUTSIDE===
SurfaceConvectionAlgorithm:Outside,
    AdaptiveConvectionAlgorithm;  !- Algorithm

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: HEATBALANCEALGORITHM===
HeatBalanceAlgorithm,
    MoisturePenetrationDepthConductionTransferFunction,  !- Algorithm
    200,                !- Surface Temperature Upper Limit {C}
    0.1,                !- Minimum Surface Convection Heat Transfer Coefficient Value {W/m2-K}
    1000;               !- Maximum Surface Convection Heat Transfer Coefficient Value {W/m2-K}


!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: ZONECAPACITANCEMULTIPLIER:RESEARCHSPECIAL===
ZoneCapacitanceMultiplier:ResearchSpecial,
    1,                      !- Temperature Capacity Multiplier
    1,                      !- Humidity Capacity Multiplier
    1,                      !- Carbon Dioxide Capacity Multiplier
    1;                      !- Generic Contaminant Capacity Multiplier
```

```
!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: TIMESTEP===
Timestep,
    6;                      !- Number of Timesteps per Hour

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: SITE:LOCATION===
Site:Location,
    CAPELA DA CEIA - CONGONHAS/MG,  !- Name
    -20.52,                 !- Latitude {deg}
    -43.85,                 !- Longitude {deg}
    -3.0,                   !- Time Zone {hr}
    1061;                   !- Elevation {m}

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: RUNPERIOD===
RunPeriod,
    ,                       !- Name
    1,                      !- Begin Month
    1,                      !- Begin Day of Month
    12,                     !- End Month
    31,                     !- End Day of Month
    ,                       !- Day of Week for Start Day
    No,                     !- Use Weather File Holidays and Special Days
    No,                     !- Use Weather File Daylight Saving Period
    No,                     !- Apply Weekend Holiday Rule
    No,                     !- Use Weather File Rain Indicators
    ;                       !- Use Weather File Snow Indicators

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: SITE:GROUNDTEMPERATURE:BUILDINGSURFACE===
Site:GroundTemperature:BuildingSurface,
    22.1,                   !- January Ground Temperature {C}
    21.7,                   !- February Ground Temperature {C}
    20.8,                   !- March Ground Temperature {C}
    19.9,                   !- April Ground Temperature {C}
    18.3,                   !- May Ground Temperature {C}
    17.5,                   !- June Ground Temperature {C}
    17.2,                   !- July Ground Temperature {C}
    17.7,                   !- August Ground Temperature {C}
    18.7,                   !- September Ground Temperature {C}
    19.9,                   !- October Ground Temperature {C}
    21.1,                   !- November Ground Temperature {C}
    21.9;                   !- December Ground Temperature {C}

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: SITE:GROUNDREFLECTANCE===
Site:GroundReflectance,
    0.25,                   !- January Ground Reflectance {dimensionless}
    0.25,                   !- February Ground Reflectance {dimensionless}
    0.25,                   !- March Ground Reflectance {dimensionless}
    0.25,                   !- April Ground Reflectance {dimensionless}
    0.25,                   !- May Ground Reflectance {dimensionless}
    0.25,                   !- June Ground Reflectance {dimensionless}
    0.25,                   !- July Ground Reflectance {dimensionless}
    0.25,                   !- August Ground Reflectance {dimensionless}
    0.25,                   !- September Ground Reflectance {dimensionless}
    0.25,                   !- October Ground Reflectance {dimensionless}
    0.25,                   !- November Ground Reflectance {dimensionless}
    0.25;                   !- December Ground Reflectance {dimensionless}

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: SCHEDULETYPELIMITS===
ScheduleTypeLimits,
    Any Number;             !- Name
ScheduleTypeLimits,
    Fraction,               !- Name
    0.0,                    !- Lower Limit Value
    1.0,                    !- Upper Limit Value
    CONTINUOUS;             !- Numeric Type
ScheduleTypeLimits,
    Temperature,            !- Name
    -60,                    !- Lower Limit Value
    200,                    !- Upper Limit Value
    CONTINUOUS;             !- Numeric Type
ScheduleTypeLimits,
    On/Off,                 !- Name
    0,                      !- Lower Limit Value
    1,                      !- Upper Limit Value
    DISCRETE;               !- Numeric Type
ScheduleTypeLimits,
    Control Type,           !- Name
```

```
    0,                      !- Lower Limit Value
    4,                      !- Upper Limit Value
    DISCRETE;               !- Numeric Type
ScheduleTypeLimits,
    Humidity,               !- Name
    10,                     !- Lower Limit Value
    90,                     !- Upper Limit Value
    CONTINUOUS;             !- Numeric Type
ScheduleTypeLimits,
    Number;                 !- Name

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: SCHEDULE:COMPACT===
Schedule:Compact,
    area_fraction,          !- Name
    Fraction,               !- Schedule Type Limits Name
    Through: 12/31,         !- Field 1
    For: AllDays,           !- Field 2
    Until: 24:00,           !- Field 3
    1;                      !- Field 4
Schedule:Compact,
    VENT_AVA,               !- Name
    Any Number,             !- Schedule Type Limits Name
    Through: 12/31,         !- Field 1
    For: AllDays,           !- Field 2
    Until: 24:00,           !- Field 3
    1;                      !- Field 4

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: MATERIAL===
Material,
    M04,                    !- Name
    Smooth,                 !- Roughness
    0.04,                   !- Thickness {m}
    0.15,                   !- Conductivity {W/m-K}
    600,                    !- Density {kg/m3}
    2300,                   !- Specific Heat {J/kg-K}
    0.9,                    !- Thermal Absorptance
    0.8,                    !- Solar Absorptance
    0.8;                    !- Visible Absorptance
Material,
    M01,                    !- Name
    MediumRough,            !- Roughness
    0.01,                   !- Thickness {m}
    0.15,                   !- Conductivity {W/m-K}
    600,                    !- Density {kg/m3}
    2300,                   !- Specific Heat {J/kg-K}
    0.9,                    !- Thermal Absorptance
    0.7,                    !- Solar Absorptance
    0.7;                    !- Visible Absorptance
Material,
    P05,                    !- Name
    MediumRough,            !- Roughness
    0.05,                   !- Thickness {m}
    1.5,                    !- Conductivity {W/m-K}
    2000,                   !- Density {kg/m3}
    1000,                   !- Specific Heat {J/kg-K}
    0.9,                    !- Thermal Absorptance
    0.7,                    !- Solar Absorptance
    0.7;                    !- Visible Absorptance
Material,
    ARG25,                  !- Name
    MediumRough,            !- Roughness
    0.025,                  !- Thickness {m}
    0.8,                    !- Conductivity {W/m-K}
    1600,                   !- Density {kg/m3}
    1000,                   !- Specific Heat {J/kg-K}
    0.9,                    !- Thermal Absorptance
    0.3,                    !- Solar Absorptance
    0.3;                    !- Visible Absorptance
Material,
    CP100,                  !- Name
    MediumRough,            !- Roughness
    1,                      !- Thickness {m}
    1.1,                    !- Conductivity {W/m-K}
    1800,                   !- Density {kg/m3}
    900,                    !- Specific Heat {J/kg-K}
    0.9;                    !- Thermal Absorptance
```

```
Material,
    CP70,                    !- Name
    MediumRough,             !- Roughness
    0.7,                     !- Thickness {m}
    1.1,                     !- Conductivity {W/m-K}
    1800,                    !- Density {kg/m3}
    900,                     !- Specific Heat {J/kg-K}
    0.9;                     !- Thermal Absorptance
Material,
    S01,                     !- Name
    VeryRough,               !- Roughness
    0.001,                   !- Thickness {m}
    2.1,                     !- Conductivity {W/m-K}
    1800,                    !- Density {kg/m3}
    1460,                    !- Specific Heat {J/kg-K}
    0.9;                     !- Thermal Absorptance
Material,
    ARG25_OUT,               !- Name
    MediumRough,             !- Roughness
    0.025,                   !- Thickness {m}
    0.8,                     !- Conductivity {W/m-K}
    1600,                    !- Density {kg/m3}
    1000,                    !- Specific Heat {J/kg-K}
    0.9,                     !- Thermal Absorptance
    0.3,                     !- Solar Absorptance
    0.3;                     !- Visible Absorptance

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: MATERIAL:AIRGAP===
Material:AirGap,
    AR10,                    !- Name
    0.25;                    !- Thermal Resistance {m2-K/W}

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: WINDOWMATERIAL:GLAZING===
WindowMaterial:Glazing,
    vid-ar,                  !- Name
    SpectralAverage,         !- Optical Data Type
    ,                        !- Window Glass Spectral Data Set Name
    0.04,                    !- Thickness {m}
    1,                       !- Solar Transmittance at Normal Incidence
    0,                       !- Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence
    0,                       !- Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence
    1,                       !- Visible Transmittance at Normal Incidence
    0,                       !- Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence
    0,                       !- Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence
    0,                       !- Infrared Transmittance at Normal Incidence
    0.99,                    !- Front Side Infrared Hemispherical Emissivity
    0.99,                    !- Back Side Infrared Hemispherical Emissivity
    0.025;                   !- Conductivity {W/m-K}


!-=== ALL OBJECTS IN CLASS: MATERIALPROPERTY: MOISTUREPENETRATIONDEPTH:SETTINGS===
MaterialProperty:MoisturePenetrationDepth:Settings,
    M01,                     !- Name
    0.004,                   !- Moisture Penetration Depth {m}
    0.144687,                !- Moisture Equation Coefficient a {dimensionless}
    0.631307,                !- Moisture Equation Coefficient b {dimensionless}
    0.122495,                !- Moisture Equation Coefficient c {dimensionless}
    10.1203;                 !- Moisture Equation Coefficient d {dimensionless}
MaterialProperty:MoisturePenetrationDepth:Settings,
    M04,                     !- Name
    0.004,                   !- Moisture Penetration Depth {m}
    0.144687,                !- Moisture Equation Coefficient a {dimensionless}
    0.631307,                !- Moisture Equation Coefficient b {dimensionless}
    0.122495,                !- Moisture Equation Coefficient c {dimensionless}
    10.1203;                 !- Moisture Equation Coefficient d {dimensionless}
MaterialProperty:MoisturePenetrationDepth:Settings,
    ARG25,                   !- Name
    0.004,                   !- Moisture Penetration Depth {m}
    0.072549,                !- Moisture Equation Coefficient a {dimensionless}
    0.397173,                !- Moisture Equation Coefficient b {dimensionless}
    0.007774,                !- Moisture Equation Coefficient c {dimensionless}
    11.7057;                 !- Moisture Equation Coefficient d {dimensionless}
```

```
MaterialProperty:MoisturePenetrationDepth:Settings,
    P05,                     !- Name
    0.004,                   !- Moisture Penetration Depth {m}
    0.01385,                 !- Moisture Equation Coefficient a {dimensionless}
    9.638,                   !- Moisture Equation Coefficient b {dimensionless}
    0.02462,                 !- Moisture Equation Coefficient c {dimensionless}
    0.6763;                  !- Moisture Equation Coefficient d {dimensionless}
!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: CONSTRUCTION===
Construction,
    FLOOR_1,                 !- Name
    P05;                     !- Outside Layer
Construction,
    Exterior Wall,           !- Name
    ARG25_OUT,               !- Outside Layer
    CP100,                   !- Layer 2
    ARG25;                   !- Layer 3
Construction,
    Interior Ceiling,        !- Name
    ARG25_OUT,               !- Outside Layer
    CP70,                    !- Layer 2
    ARG25;                   !- Layer 3
Construction,
    Exterior Window,         !- Name
    vid-ar;                  !- Outside Layer
Construction,
    DOOR_1,                  !- Name
    M04;                     !- Outside Layer
Construction,
    FLOOR_2,                 !- Name
    S01,                     !- Outside Layer
    AR10,                    !- Layer 2
    M01;                     !- Layer 3
!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: GLOBALGEOMETRYRULES===
GlobalGeometryRules,
    UpperLeftCorner,         !- Starting Vertex Position
    Counterclockwise,        !- Vertex Entry Direction
    Relative;                !- Coordinate System

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: ZONE===
Zone,
    ZONE1,                   !- Name
    0.0,                     !- Direction of Relative North {deg}
    0.0,                     !- X Origin {m}
    0.0,                     !- Y Origin {m}
    0.0,                     !- Z Origin {m}
    ,                        !- Type
    1,                       !- Multiplier
    8,                       !- Ceiling Height {m}
    autocalculate,           !- Volume {m3}
    autocalculate;           !- Floor Area {m2}

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: BUILDINGSURFACE:DETAILED===

BuildingSurface:Detailed,
    FLOOR_CONTOUR,           !- Name
    Floor,                   !- Surface Type
    FLOOR_1,                 !- Construction Name
    ZONE1,                   !- Zone Name
    Ground,                  !- Outside Boundary Condition
    ,                        !- Outside Boundary Condition Object
    NoSun,                   !- Sun Exposure
    NoWind,                  !- Wind Exposure
    0.0,                     !- View Factor to Ground
    4,                       !- Number of Vertices
    5.600000000000,          !- Vertex 1 X-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 2 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 4 X-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
    0.000000000000;          !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
```

```
BuildingSurface:Detailed,
    WALL_B,                  !- Name
    Wall,                    !- Surface Type
    Exterior Wall,           !- Construction Name
    ZONE1,                   !- Zone Name
    Outdoors,                !- Outside Boundary Condition
    ,                        !- Outside Boundary Condition Object
    SunExposed,              !- Sun Exposure
    WindExposed,             !- Wind Exposure
    ,                        !- View Factor to Ground
    4,                       !- Number of Vertices
    5.600000000000,          !- Vertex 1 X-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
    4.150000000000,          !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 2 X-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 X-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 4 X-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
    4.150000000000;          !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
BuildingSurface:Detailed,
    WALL_R,                  !- Name
    Wall,                    !- Surface Type
    Exterior Wall,           !- Construction Name
    ZONE1,                   !- Zone Name
    Outdoors,                !- Outside Boundary Condition
    ,                        !- Outside Boundary Condition Object
    SunExposed,              !- Sun Exposure
    WindExposed,             !- Wind Exposure
    ,                        !- View Factor to Ground
    4,                       !- Number of Vertices
    0.000000000000,          !- Vertex 1 X-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
    4.150000000000,          !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 X-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 4 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
    4.150000000000;          !- Vertex 4 Z-coordinate {m}

BuildingSurface:Detailed,
    WALL_F,                  !- Name
    Wall,                    !- Surface Type
    Exterior Wall,           !- Construction Name
    ZONE1,                   !- Zone Name
    Outdoors,                !- Outside Boundary Condition
    ,                        !- Outside Boundary Condition Object
    SunExposed,              !- Sun Exposure
    WindExposed,             !- Wind Exposure
    ,                        !- View Factor to Ground
    8,                       !- Number of Vertices
    0.000000000000,          !- Vertex 1 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
    4.150000000000,          !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
    2.000000000000,          !- Vertex 3 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
    2.000000000000,          !- Vertex 4 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
    3.450000000000,          !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
    3.600000000000,          !- Vertex 5 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 5 Y-coordinate {m}
    3.450000000000,          !- Vertex 5 Z-coordinate {m}
    3.600000000000,          !- Vertex 6 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 6 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 6 Z-coordinate {m}
```

```
    5.600000000000,          !- Vertex 7 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 7 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 7 Z-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 8 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 8 Y-coordinate {m}
    4.150000000000;          !- Vertex 8 Z-coordinate {m}
BuildingSurface:Detailed,
    WALL_L,                  !- Name
    Wall,                    !- Surface Type
    Exterior Wall,           !- Construction Name
    ZONE1,                   !- Zone Name
    Outdoors,                !- Outside Boundary Condition
    ,                        !- Outside Boundary Condition Object
    SunExposed,              !- Sun Exposure
    WindExposed,             !- Wind Exposure
    ,                        !- View Factor to Ground
    4,                       !- Number of Vertices
    5.600000000000,          !- Vertex 1 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
    4.150000000000,          !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 2 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 3 X-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 4 X-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
    4.150000000000;          !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
BuildingSurface:Detailed,
    ROOF_F,                  !- Name
    Roof,                    !- Surface Type
    Interior Ceiling,        !- Construction Name
    ZONE1,                   !- Zone Name
    Outdoors,                !- Outside Boundary Condition
    ,                        !- Outside Boundary Condition Object
    SunExposed,              !- Sun Exposure
    WindExposed,             !- Wind Exposure
    ,                        !- View Factor to Ground
    3,                       !- Number of Vertices
    2.813171627084,          !- Vertex 1 X-coordinate {m}
    2.798758188815,          !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
    7.803388293799,          !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
    4.150000000000,          !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 3 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
    4.150000000000;          !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
BuildingSurface:Detailed,
    ROOF_L,                  !- Name
    Roof,                    !- Surface Type
    Interior Ceiling,        !- Construction Name
    ZONE1,                   !- Zone Name
    Outdoors,                !- Outside Boundary Condition
    ,                        !- Outside Boundary Condition Object
    SunExposed,              !- Sun Exposure
    WindExposed,             !- Wind Exposure
    ,                        !- View Factor to Ground
    3,                       !- Number of Vertices
    2.813171627084,          !- Vertex 1 X-coordinate {m}
    2.798758188815,          !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
    7.803388293799,          !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 2 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
    4.150000000000,          !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 3 X-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
    4.150000000000;          !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
BuildingSurface:Detailed,
    ROOF_B,                  !- Name
    Roof,                    !- Surface Type
    Interior Ceiling,        !- Construction Name
    ZONE1,                   !- Zone Name
    Outdoors,                !- Outside Boundary Condition
    ,                        !- Outside Boundary Condition Object
```

```
    SunExposed,              !- Sun Exposure
    WindExposed,             !- Wind Exposure
    ,                        !- View Factor to Ground
    3,                       !- Number of Vertices
    2.813171627084,          !- Vertex 1 X-coordinate {m}
    2.798758188815,          !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
    7.803388293799,          !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 2 X-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
    4.150000000000,          !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 X-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
    4.150000000000;          !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
BuildingSurface:Detailed,
    ROOF_R,                  !- Name
    Roof,                    !- Surface Type
    Interior Ceiling,        !- Construction Name
    ZONE1,                   !- Zone Name
    Outdoors,                !- Outside Boundary Condition
    ,                        !- Outside Boundary Condition Object
    SunExposed,              !- Sun Exposure
    WindExposed,             !- Wind Exposure
    ,                        !- View Factor to Ground
    3,                       !- Number of Vertices
    2.813171627084,          !- Vertex 1 X-coordinate {m}
    2.798758188815,          !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
    7.803388293799,          !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 X-coordinate {m}
    5.600000000000,          !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
    4.150000000000,          !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
    4.150000000000;          !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
BuildingSurface:Detailed,
    DOOR,                    !- Name
    Wall,                    !- Surface Type
    DOOR_1,                  !- Construction Name
    ZONE1,                   !- Zone Name
    Outdoors,                !- Outside Boundary Condition
    ,                        !- Outside Boundary Condition Object
    SunExposed,              !- Sun Exposure
    WindExposed,             !- Wind Exposure
    ,                        !- View Factor to Ground
    4,                       !- Number of Vertices
    2.000000000000,          !- Vertex 1 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
    3.450000000000,          !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
    2.000000000000,          !- Vertex 2 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
    3.600000000000,          !- Vertex 3 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
    3.600000000000,          !- Vertex 4 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
    3.450000000000;          !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
BuildingSurface:Detailed,
    FLOOR_MID,               !- Name
    Floor,                   !- Surface Type
    FLOOR_2,                 !- Construction Name
    ZONE1,                   !- Zone Name
    Ground,                  !- Outside Boundary Condition
    ,                        !- Outside Boundary Condition Object
    NoSun,                   !- Sun Exposure
    NoWind,                  !- Wind Exposure
    0.0,                     !- View Factor to Ground
    4,                       !- Number of Vertices
    5.000000000000,          !- Vertex 1 X-coordinate {m}
    5.000000000000,          !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
    5.000000000000,          !- Vertex 2 X-coordinate {m}
    0.600000000000,          !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
    0.600000000000,          !- Vertex 3 X-coordinate {m}
    0.600000000000,          !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
```

```
    0.600000000000,          !- Vertex 4 X-coordinate {m}
    5.000000000000,          !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
    0.000000000000;          !- Vertex 4 Z-coordinate {m}

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: FENESTRATIONSURFACE:DETAILED===
FenestrationSurface:Detailed,
    WR,                      !- Name
    Window,                  !- Surface Type
    Exterior Window,         !- Construction Name
    DOOR,                    !- Building Surface Name
    ,                        !- Outside Boundary Condition Object
    ,                        !- View Factor to Ground
    ,                        !- Shading Control Name
    ,                        !- Frame and Divider Name
    ,                        !- Multiplier
    4,                       !- Number of Vertices
    2.050000000000,          !- Vertex 1 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
    2.850000000000,          !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
    2.050000000000,          !- Vertex 2 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
    1.850000000000,          !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
    2.750000000000,          !- Vertex 3 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
    1.850000000000,          !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
    2.750000000000,          !- Vertex 4 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
    2.850000000000;          !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
FenestrationSurface:Detailed,
    WL,                      !- Name
    Window,                  !- Surface Type
    Exterior Window,         !- Construction Name
    DOOR,                    !- Building Surface Name
    ,                        !- Outside Boundary Condition Object
    ,                        !- View Factor to Ground
    ,                        !- Shading Control Name
    ,                        !- Frame and Divider Name
    ,                        !- Multiplier
    4,                       !- Number of Vertices
    2.850000000000,          !- Vertex 1 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
    2.850000000000,          !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
    2.850000000000,          !- Vertex 2 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
    1.850000000000,          !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
    3.550000000000,          !- Vertex 3 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
    1.850000000000,          !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
    3.550000000000,          !- Vertex 4 X-coordinate {m}
    0.000000000000,          !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
    2.850000000000;          !- Vertex 4 Z-coordinate {m}

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: INTERNALMASS===
InternalMass,
    ESCULTURAS,              !- Name
    DOOR_1,                  !- Construction Name
    ZONE1,                   !- Zone Name
    53;                      !- Surface Area {m2}

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: ROOMAIRMODELTYPE===
RoomAirModelType,
    MODEL_1,                 !- Name
    ZONE1,                   !- Zone Name
    Mixing,                  !- Room-Air Modeling Type
    Direct;                  !- Air Temperature Coupling Strategy

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: ZONEVENTILATION:WINDANDSTACKOPENAREA===
ZoneVentilation:WindandStackOpenArea,
    ZONE_VENT,               !- Name
    ZONE1,                   !- Zone Name
    1.4,                     !- Opening Area {m2}
    area_fraction,           !- Opening Area Fraction Schedule Name
    1,                       !- Opening Effectiveness {dimensionless}
    ,                        !- Effective Angle {deg}
    0.5,                     !- Height Difference {m}
    autocalculate,           !- Discharge Coefficient for Opening
```

```
    -100,                    !- Minimum Indoor Temperature {C}
    ,                        !- Minimum Indoor Temperature Schedule Name
    100,                     !- Maximum Indoor Temperature {C}
    ,                        !- Maximum Indoor Temperature Schedule Name
    -100,                    !- Delta Temperature {deltaC}
    ,                        !- Delta Temperature Schedule Name
    -100,                    !- Minimum Outdoor Temperature {C}
    ,                        !- Minimum Outdoor Temperature Schedule Name
    100,                     !- Maximum Outdoor Temperature {C}
    ,                        !- Maximum Outdoor Temperature Schedule Name
    40;                      !- Maximum Wind Speed {m/s}


!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: AIRFLOWNETWORK:SIMULATIONCONTROL===
AirflowNetwork:SimulationControl,
    VENT,                    !- Name
    MultizoneWithoutDistribution,  !- AirflowNetwork Control
    SurfaceAverageCalculation,  !- Wind Pressure Coefficient Type
    ,                        !- AirflowNetwork Wind Pressure Coefficient Array Name
    OpeningHeight,           !- Height Selection for Local Wind Speed Calculation
    LowRise,                 !- Building Type
    500,                     !- Maximum Number of Iterations {dimensionless}
    ZeroNodePressures,       !- Initialization Type
    0.0001,                  !- Relative Airflow Convergence Tolerance {dimensionless}
    0.000001,                !- Absolute Airflow Convergence Tolerance {kg/s}
    -.5,                     !- Convergence Acceleration Limit {dimensionless}
    ,                        !- Azimuth Angle of Long Axis of Building {deg}
    1;                         !- Ratio of Building Width Along Short Axis to Width Along Long
Axis


!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: AIRFLOWNETWORK:MULTIZONE:ZONE===
AirflowNetwork:MultiZone:Zone,
    ZONE1,                  !- Zone Name
    Constant,               !- Ventilation Control Mode
    ,                       !- Ventilation Control Zone Temperature Setpoint Schedule Name
    1,                      !- Minimum Venting Open Factor {dimensionless}
    ,                      !- Indoor and Outdoor Temperature Difference Lower Limit For Maximum
Venting Open Factor {deltaC}
    100,                         !- Indoor and Outdoor Temperature Difference Upper Limit for
Minimun Venting Open Factor {deltaC}
    ,                        !- Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Lower Limit For Maximum
Venting Open Factor {deltaJ/kg}
    300000;                  !- Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Upper Limit for Minimun
Venting Open Factor {deltaJ/kg}

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: AIRFLOWNETWORK:MULTIZONE:SURFACE===
AirflowNetwork:MultiZone:Surface,
    WR,                      !- Surface Name
    WINDOW_DET,              !- Leakage Component Name
    ,                        !- External Node Name
    1,                       !- Window/Door Opening Factor, or Crack Factor {dimensionless}
    ZoneLevel,               !- Ventilation Control Mode
    ,                        !- Ventilation Control Zone Temperature Setpoint Schedule Name
    ,                        !- Minimum Venting Open Factor {dimensionless}
    ,                            !- Indoor and Outdoor Temperature Difference Lower Limit For
Maximum Venting Open Factor {deltaC}
    100,                         !- Indoor and Outdoor Temperature Difference Upper Limit for
Minimun Venting Open Factor {deltaC}
    ,                        !- Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Lower Limit For Maximum
Venting Open Factor {deltaJ/kg}
    300000;                  !- Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Upper Limit for Minimun
Venting Open Factor {deltaJ/kg}
AirflowNetwork:MultiZone:Surface,
    WL,                      !- Surface Name
    WINDOW_DET,              !- Leakage Component Name
    ,                        !- External Node Name
    1,                       !- Window/Door Opening Factor, or Crack Factor {dimensionless}
    ZoneLevel,               !- Ventilation Control Mode
    ,                        !- Ventilation Control Zone Temperature Setpoint Schedule Name
    ,                        !- Minimum Venting Open Factor {dimensionless}
    ,                            !- Indoor and Outdoor Temperature Difference Lower Limit For
Maximum Venting Open Factor {deltaC}
    100,                         !- Indoor and Outdoor Temperature Difference Upper Limit for
Minimun Venting Open Factor {deltaC}
```

```
    ,                        !- Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Lower Limit For Maximum
Venting Open Factor {deltaJ/kg}
    300000;                  !- Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Upper Limit for Minimun
Venting Open Factor {deltaJ/kg}


!-===ALL OBJECTS IN CLASS: AIRFLOWNETWORK: MULTIZONE:COMPONENT: DETAILEDOPENING===

WINDOW_DET,              !- Name
    0.001,                   !- Air Mass Flow Coefficient When Opening is Closed {kg/s-m}
    0.65,                    !- Air Mass Flow Exponent When Opening is Closed {dimensionless}
    Non_PIV_oted,            !- Type of Rectanguler Large Vertical Opening (LVO)
    ,                        !- Extra Crack Length or Height of _PIV_oting Axis {m}
    2,                       !- Number of Sets of Opening Factor Data
    0,                       !- Opening Factor 1 {dimensionless}
    1,                       !- Discharge Coefficient for Opening Factor 1 {dimensionless}
    ,                        !- Width Factor for Opening Factor 1 {dimensionless}
    ,                        !- Height Factor for Opening Factor 1 {dimensionless}
    ,                        !- Start Height Factor for Opening Factor 1 {dimensionless}
    1,                       !- Opening Factor 2 {dimensionless}
    0.6,                     !- Discharge Coefficient for Opening Factor 2 {dimensionless}
    1,                       !- Width Factor for Opening Factor 2 {dimensionless}
    1,                       !- Height Factor for Opening Factor 2 {dimensionless}
    ;                        !- Start Height Factor for Opening Factor 2 {dimensionless}
!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:VARIABLEDICTIONARY===
Output:VariableDictionary,
    IDF;                     !- Key Field
!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:VARIABLE===
Output:Variable,
    *,                       !- Key Value
    Outdoor Relative Humidity,  !- Variable Name
    Hourly;                  !- Reporting Frequency
Output:Variable,
    *,                       !- Key Value
    Outdoor Dry Bulb,        !- Variable Name
    Hourly;                  !- Reporting Frequency
Output:Variable,
    *,                       !- Key Value
    Zone Mean Air Temperature,  !- Variable Name
    Hourly;                  !- Reporting Frequency
Output:Variable,
    *,                       !- Key Value
    Zone Air Relative Humidity,  !- Variable Name
    Hourly;                  !- Reporting Frequency
Output:Variable,
    *,                       !- Key Value
    AirflowNetwork Mass Flow Rate from Node 2 to 1,  !- Variable Name
    Hourly;                  !- Reporting Frequency
Output:Variable,
    *,                       !- Key Value
    Outdoor Humidity Ratio,  !- Variable Name
    Hourly;                  !- Reporting Frequency
Output:Variable,
    *,                       !- Key Value
    Zone Air Humidity Ratio, !- Variable Name
    Hourly;                  !- Reporting Frequency
Output:Variable,
    *,                       !- Key Value
    Zone Mean Air Humidity Ratio,  !- Variable Name
    Hourly;                  !- Reporting Frequency
Output:Variable,
    *,                       !- Key Value
    AirflowNetwork Zone Infiltration Air Change Rate,  !- Variable Name
    Hourly;                  !- Reporting Frequency

!-   ===ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:SQLITE===
Output:SQLite,
    Simple;                  !- Option Type
```

E.4- Parâmetros utilizados para simulação no programa Ansys CFX

E.4.1- Perfil de vento ASHRAE, regime permanente

```
+--------------------------------------------------------------------+
|                                                                    |
|                    CFX Command Language for Run                    |
|                                                                    |
+--------------------------------------------------------------------+

LIBRARY:
  CEL:
    EXPRESSIONS:
      h = y/1[m]
      uz = 2.2*37^0.14*(h/270)^0.22
    END
  END
  MATERIAL: Air at 25 C
    Material Description = Air at 25 C and 1 atm (dry)
    Material Group = Air Data, Constant Property Gases
    Option = Pure Substance
    Thermodynamic State = Gas
    PROPERTIES:
      Option = General Material
      EQUATION OF STATE:
        Density = 1.185 [kg m^-3]
        Molar Mass = 28.96 [kg kmol^-1]
        Option = Value
      END
      SPECIFIC HEAT CAPACITY:
        Option = Value
        Specific Heat Capacity = 1.0044E+03 [J kg^-1 K^-1]
        Specific Heat Type = Constant Pressure
      END
      REFERENCE STATE:
        Option = Specified Point
        Reference Pressure = 1 [atm]
        Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]
        Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]
        Reference Temperature = 25 [C]
      END
      DYNAMIC VISCOSITY:
        Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m^-1 s^-1]
        Option = Value
      END
      THERMAL CONDUCTIVITY:
        Option = Value
        Thermal Conductivity = 2.61E-02 [W m^-1 K^-1]
      END
      ABSORPTION COEFFICIENT:
        Absorption Coefficient = 0.01 [m^-1]
        Option = Value
      END
      SCATTERING COEFFICIENT:
        Option = Value
        Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
      END
      REFRACTIVE INDEX:
        Option = Value
        Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
      END
      THERMAL EXPANSIVITY:
        Option = Value
        Thermal Expansivity = 0.003356 [K^-1]
      END
    END
  END
END
FLOW: Flow Analysis 1
  SOLUTION UNITS:
    Angle Units = [rad]
    Length Units = [m]
```

```
  Mass Units = [kg]
  Solid Angle Units = [sr]
  Temperature Units = [K]
  Time Units = [s]
END
ANALYSIS TYPE:
  Option = Steady State
  EXTERNAL SOLVER COUPLING:
    Option = None
  END
END
DOMAIN: Domain 1
  Coord Frame = Coord 0
  Domain Type = Fluid
  Location = B288
  BOUNDARY: igreja_externo
    Boundary Type = WALL
    Location = igreja_externo
    BOUNDARY CONDITIONS:
      MASS AND MOMENTUM:
        Option = No Slip Wall
      END
      WALL ROUGHNESS:
        Option = Smooth Wall
      END
    END
  END
  BOUNDARY: igreja_interno
    Boundary Type = WALL
    Location = igreja_interno
    BOUNDARY CONDITIONS:
      MASS AND MOMENTUM:
        Option = No Slip Wall
      END
      WALL ROUGHNESS:
        Option = Smooth Wall
      END
    END
  END
  BOUNDARY: in
    Boundary Type = INLET
    Location = F256.288
    BOUNDARY CONDITIONS:
      FLOW REGIME:
        Option = Subsonic
      END
      MASS AND MOMENTUM:
        Option = Cartesian Velocity Components
        U = 0 [m s^-1]
        V = 0 [m s^-1]
        W = uz [m s^-1]
      END
      TURBULENCE:
        Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
      END
    END
  END
  BOUNDARY: opening
    Boundary Type = OPENING
    Location = F254.288,F255.288,F257.288,F303.288
    BOUNDARY CONDITIONS:
      FLOW DIRECTION:
        Option = Normal to Boundary Condition
      END
      FLOW REGIME:
        Option = Subsonic
      END
      MASS AND MOMENTUM:
        Option = Opening Pressure and Direction
        Relative Pressure = 1 [atm]
      END
      TURBULENCE:
        Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
      END
    END
  END
```

```
  BOUNDARY: solo_1
    Boundary Type = WALL
    Location = solo_1
    BOUNDARY CONDITIONS:
      MASS AND MOMENTUM:
        Option = No Slip Wall
      END
      WALL ROUGHNESS:
        Option = Smooth Wall
      END
    END
  END
  BOUNDARY: solo_2
    Boundary Type = WALL
    Location = solo_2
    BOUNDARY CONDITIONS:
      MASS AND MOMENTUM:
        Option = No Slip Wall
      END
      WALL ROUGHNESS:
        Option = Smooth Wall
      END
    END
  END
  DOMAIN MODELS:
    BUOYANCY MODEL:
      Buoyancy Reference Temperature = 25 [C]
      Gravity X Component = 0 [m s^-2]
      Gravity Y Component = -9.81 [m s^-2]
      Gravity Z Component = 0 [m s^-2]
      Option = Buoyant
      BUOYANCY REFERENCE LOCATION:
        Option = Automatic
      END
    END
    DOMAIN MOTION:
      Option = Stationary
    END
    MESH DEFORMATION:
      Option = None
    END
    REFERENCE PRESSURE:
      Reference Pressure = 1 [atm]
    END
  END
  FLUID DEFINITION: Fluid 1
    Material = Air at 25 C
    Option = Material Library
    MORPHOLOGY:
      Option = Continuous Fluid
    END
  END
  FLUID MODELS:
    COMBUSTION MODEL:
      Option = None
    END
    HEAT TRANSFER MODEL:
      Fluid Temperature = 25 [C]
      Option = Isothermal
    END
    THERMAL RADIATION MODEL:
      Option = None
    END
    TURBULENCE MODEL:
      Option = SST
      BUOYANCY TURBULENCE:
        Option = None
      END
    END
    TURBULENT WALL FUNCTIONS:
      Option = Automatic
    END
  END
END
OUTPUT CONTROL:
  BACKUP RESULTS: Backup Results 1
```

```
      File Compression Level = Default
      Option = Standard
      OUTPUT FREQUENCY:
        Iteration Interval = 10
        Option = Iteration Interval
      END
    END
    RESULTS:
      File Compression Level = Default
      Option = Standard
    END
  END
  SOLVER CONTROL:
    Turbulence Numerics = First Order
    ADVECTION SCHEME:
      Option = High Resolution
    END
    CONVERGENCE CONTROL:
      Length Scale Option = Conservative
      Maximum Number of Iterations = 200
      Minimum Number of Iterations = 1
      Timescale Control = Auto Timescale
      Timescale Factor = 1.0
    END
    CONVERGENCE CRITERIA:
      Residual Target = 1.E-4
      Residual Type = RMS
    END
    DYNAMIC MODEL CONTROL:
      Global Dynamic Model Control = On
    END
  END
END
COMMAND FILE:
  Version = 13.0
  Results Version = 13.0
END
SIMULATION CONTROL:
  EXECUTION CONTROL:
    EXECUTABLE SELECTION:
      Double Precision = Off
    END
    INTERPOLATOR STEP CONTROL:
      Runtime Priority = High
      MEMORY CONTROL:
        Memory Allocation Factor = 1.0
      END
    END
    PARALLEL HOST LIBRARY:
      HOST DEFINITION: fapemigwilli
        Remote Host Name = FAPEMIG-WILLI
        Host Architecture String = winnt-amd64
        Installation Root = C:\Program Files\ANSYS Inc\v%v\CFX
      END
    END
    PARTITIONER STEP CONTROL:
      Multidomain Option = Independent Partitioning
      Runtime Priority = High
      EXECUTABLE SELECTION:
        Use Large Problem Partitioner = Off
      END
      MEMORY CONTROL:
        Memory Allocation Factor = 1.0
      END
      PARTITIONING TYPE:
        MeTiS Type = k-way
        Option = MeTiS
        Partition Size Rule = Automatic
      END
    END
    RUN DEFINITION:
      Run Mode = Full
      Solver Input File = CFX.def
      INITIAL VALUES SPECIFICATION:
        INITIAL VALUES CONTROL:
          Use Mesh From = Solver Input File
```

```
        Continue History From = Workbench Initial Values
      END
      INITIAL VALUES: Workbench Initial Values
        Option = Results File
        File Name = CFX_017.res
      END
    END
  END
  SOLVER STEP CONTROL:
    Runtime Priority = High
    MEMORY CONTROL:
      Memory Allocation Factor = 1.2
    END
    PARALLEL ENVIRONMENT:
      Number of Processes = 1
      Start Method = Serial
    END
  END
END
+--------------------------------------------------------------------+
|                                                                    |
|                              Solver                                |
|                                                                    |
+--------------------------------------------------------------------+
+--------------------------------------------------------------------+
|                         Job Information                            |
+--------------------------------------------------------------------+
Run mode:       serial run
Host computer:  FAPEMIG-WILLI (PID:2212)
Job started:    Sun May 12 21:56:25 2013
+--------------------------------------------------------------------+
|        Memory Allocated for Run  (Actual usage may be less)        |
+--------------------------------------------------------------------+
 Data Type      Kwords  Words/Node  Words/Elem      Kbytes Bytes/Node

 Real        2349957.8      309.64       87.05   9179522.0    1238.54
 Integer      849432.6      111.92       31.47   3318095.8     447.69
 Character      3566.8        0.47        0.13      3483.2       0.47
 Logical          80.0        0.01        0.00       312.5       0.04
 Double          908.0        0.12        0.03      7093.8       0.96
+--------------------------------------------------------------------+
|                         Mesh Statistics                            |
+----------------------+---------------+--------------+--------------+
| Domain Name          | Orthog. Angle | Exp. Factor  | Aspect Ratio |
+----------------------+---------------+--------------+--------------+
|                      | Minimum [deg] |   Maximum    |    Maximum   |
+----------------------+---------------+--------------+--------------+
| Domain 1             |        0.6  ! |    230976  ! |   8577502  ! |
+----------------------+---------------+--------------+--------------+
|                      |  %!  %ok  %OK | %!  %ok  %OK | %!  %ok  %OK |
+----------------------+---------------+--------------+--------------+
| Domain 1             |  <1    3   97 | <1    3   97 | <1    7   93 |
+----------------------+---------------+--------------+--------------+
Domain Name : Domain 1
    Total Number of Nodes                                =     7589414
    Total Number of Elements                             =    26994709
        Total Number of Tetrahedrons                     =    18336293
        Total Number of Prisms                           =     8647829
        Total Number of Pyramids                         =       10587
    Total Number of Faces                                =      750794
+--------------------------------------------------------------------+
|                   Buoyancy Reference Information                   |
+--------------------------------------------------------------------+
Domain Group: Domain 1
  Buoyancy has been activated.  The absolute pressure will include
  hydrostatic pressure contribution, using the following reference
  coordinates: ( 4.19097E-07, 1.95504E+01, 1.95504E+01).
+--------------------------------------------------------------------+
|      Initial Conditions Supplied by Fields in the Input Files      |
+--------------------------------------------------------------------+
Domain Name : Domain 1
    Courant Number
    Eddy Viscosity
    First Blending Function for BSL and SST model
    Pressure
```

```
    Second Blending Function for SST model
    Specific Heat Capacity at Constant Pressure
    Static Entropy
    Turbulence Eddy Dissipation
    Turbulence Eddy Frequency
    Turbulence Kinetic Energy
    Velocity
    Wall Scale
+--------------------------------------------------------------------+
|                    Average Scale Information                       |
+--------------------------------------------------------------------+
Domain Name : Domain 1
    Global Length                                      = 6.3685E+01
    Minimum Extent                                     = 2.5000E+01
    Maximum Extent                                     = 1.1500E+02
    Density                                            = 1.1850E+00
    Dynamic Viscosity                                  = 1.8310E-05
    Velocity                                           = 1.2056E+00
    Advection Time                                     = 5.2825E+01
    Reynolds Number                                    = 4.9690E+06
+--------------------------------------------------------------------+
|               Checking for Isolated Fluid Regions                  |
+--------------------------------------------------------------------+
 No isolated fluid regions were found.
+--------------------------------------------------------------------+
|              The Equations Solved in This Calculation              |
+--------------------------------------------------------------------+
Subsystem : Wall Scale
  Wallscale
Subsystem : Momentum and Mass
  U-Mom
  V-Mom
  W-Mom
  P-Mass
Subsystem : TurbKE and TurbFreq
  K-TurbKE
  O-TurbFreq

CFD Solver started: Sun May 12 22:01:41 2013

+--------------------------------------------------------------------+
|                       Convergence History   (LAST ITERATION)       |
+--------------------------------------------------------------------+
======================================================================
OUTER LOOP ITERATION = 200 CPU SECONDS = 3.473E+05 (5.485E+04)
----------------------------------------------------------------------
|       Equation       | Rate | RMS Res | Max Res |  Linear Solution |
+----------------------+------+---------+---------+------------------+
| U-Mom                | 0.51 | 9.2E-04 | 3.2E-02 |       2.8E-02  OK|
| V-Mom                | 0.51 | 1.9E-03 | 2.7E-01 |       9.5E-01  ok|
| W-Mom                | 0.51 | 9.9E-04 | 3.3E-02 |       3.3E-02  OK|
| P-Mass               | 1.03 | 3.9E-08 | 3.5E-05 |  5.2  2.6E-02  OK|
+----------------------+------+---------+---------+------------------+
| K-TurbKE             | 0.97 | 1.2E-04 | 2.7E-01 |  5.7  5.8E-03  OK|
| O-TurbFreq           | 1.72 | 9.1E-10 | 2.5E-06 | 12.3  3.1E-08  OK|
+----------------------+------+---------+---------+------------------+

CFD Solver finished: Tue May 14 14:07:52 2013
CFD Solver wall clock seconds: 1.4437E+05

======================================================================
             Boundary Flow and Total Source Term Summary
======================================================================
+--------------------------------------------------------------------+
|                              U-Mom                                 |
+--------------------------------------------------------------------+
Boundary         : igreja_externo                       7.0917E+03
Boundary         : igreja_interno                      -2.0000E+01
Boundary         : in                                  -1.6586E-06
Boundary         : opening                             -2.2406E+02
Boundary         : solo_1                              -7.0810E+03
Boundary         : solo_2                              -7.3221E-02
                                                        -----------
Domain Imbalance :                                     -2.3352E+02

Domain Imbalance, in %:                                   0.0000 %
```

```
+--------------------------------------------------------------------+
|                              V-Mom                                 |
+--------------------------------------------------------------------+
Boundary         : igreja_externo                         6.1058E+06
Boundary         : igreja_interno                        -3.7015E+00
Boundary         : in                                    -3.3672E-03
Boundary         : opening                               -1.0487E+09
Boundary         : solo_1                                 2.9713E+07
Boundary         : solo_2                                 1.0129E+09
                                                          -----------
Domain Imbalance :                                       -8.2560E+03
Domain Imbalance, in %:                                    -0.0008 %
+--------------------------------------------------------------------+
|                              W-Mom                                 |
+--------------------------------------------------------------------+
Boundary         : igreja_externo                         1.4180E+05
Boundary         : igreja_interno                        -1.4185E+05
Boundary         : in                                     2.2799E+08
Boundary         : opening                               -2.2799E+08
Boundary         : solo_1                                -1.5664E+00
Boundary         : solo_2                                -1.4982E+01
                                                          -----------
Domain Imbalance :                                        6.2345E+02
Domain Imbalance, in %:                                     0.0001 %
+--------------------------------------------------------------------+
|                              P-Mass                                |
+--------------------------------------------------------------------+
Boundary         : in                                     4.7222E+03
Boundary         : opening                               -4.7213E+03
                                                          -----------
Domain Imbalance :                                        8.6816E-01
Domain Imbalance, in %:                                     0.0184 %
======================================================================
                    Wall Force and Moment Summary
======================================================================
Notes:
1. Pressure integrals exclude the reference pressure.  To include
   it, set the expert parameter 'include pref in forces = t'.
+--------------------------------------------------------------------+
|                     Pressure Force On Walls                        |
+--------------------------------------------------------------------+
                                  X-Comp.      Y-Comp.      Z-Comp.
Domain Group: Domain 1
igreja_externo                 -7.1039E+03  -6.1149E+06  -1.4207E+05
igreja_interno                  7.9060E+00  -2.5531E+03   1.4214E+05
solo_1                          7.1012E+03  -2.9776E+07   8.3594E-01
solo_2                         -1.0086E-11  -1.0152E+09  -4.8790E-11
                                ----------   ----------   ----------
Domain Group Totals :           5.2812E+00  -1.0511E+09   6.6008E+01
+--------------------------------------------------------------------+
|                     Viscous Force On Walls                         |
+--------------------------------------------------------------------+
                                  X-Comp.      Y-Comp.      Z-Comp.
Domain Group: Domain 1
igreja_externo                  1.3959E-02   3.1856E-01  -6.8759E-03
igreja_interno                  5.2952E-04   5.6625E-03  -2.0561E-04
solo_1                          6.8082E-02   1.0665E-01   2.0045E-01
solo_2                          7.3221E-02  -1.0894E-07   1.4982E+01
                                ----------   ----------   ----------
Domain Group Totals :           1.5579E-01   4.3086E-01   1.5175E+01
+--------------------------------------------------------------------+
|                     Pressure Moment On Walls                       |
+--------------------------------------------------------------------+
                                  X-Comp.      Y-Comp.      Z-Comp.
Domain Group: Domain 1
igreja_externo                 -1.3332E+05  -1.8864E+04   3.5051E+04
igreja_interno                  3.2386E+05  -7.0898E-01  -2.6201E+01
solo_1                         -4.6465E+08   1.8882E+04  -6.2515E+07
solo_2                          1.3603E+10   1.2241E-10   6.2486E+07
                                ----------   ----------   ----------
Domain Group Totals :           1.3138E+10   1.7322E+01   5.4120E+03
```

Viscous Moment On Walls

	X-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.
Domain Group: Domain 1			
igreja_externo	-2.5172E-01	-2.7624E-01	-2.9437E-01
igreja_interno	1.3120E-04	1.9445E-03	-6.1483E-03
solo_1	7.6251E-01	-1.2513E+00	-2.5167E-01
solo_2	-1.7483E-07	5.6962E+00	-2.8694E-06
Domain Group Totals :	5.1091E-01	4.1706E+00	-5.5219E-01

Locations of Maximum Residuals

Equation	Node #	X	Y	Z
U-Mom	7170241	-4.821E+00	2.522E-01	-1.760E+01
V-Mom	7280942	2.260E+01	2.005E-03	-6.034E+00
W-Mom	7557807	6.906E-01	1.664E+00	3.902E+00
P-Mass	7046599	2.293E+01	4.402E-03	-6.288E+00
K-TurbKE	7482984	2.293E+01	2.000E-03	-6.288E+00
O-TurbFreq	7442864	-1.419E+01	2.272E-07	-2.217E+01

Peak Values of Residuals

Equation	Loop #	Peak Residual	Final Residual
U-Mom	2	3.14604E-03	9.21863E-04
V-Mom	39	4.89727E-03	1.94142E-03
W-Mom	39	2.53472E-03	9.93003E-04
P-Mass	81	3.02054E-07	3.92603E-08
K-TurbKE	1	2.76626E-03	1.17456E-04
O-TurbFreq	1	6.28719E-04	9.13138E-10

False Transient Information

Equation	Type	Elapsed Pseudo-Time
U-Mom	Auto	1.36873E+03
V-Mom	Auto	1.36873E+03
W-Mom	Auto	1.36873E+03
K-TurbKE	Auto	1.36873E+03
O-TurbFreq	Auto	1.36873E+03

Average Scale Information

Domain Name : Domain 1

Global Length	= 6.3685E+01
Minimum Extent	= 2.5000E+01
Maximum Extent	= 1.1500E+02
Density	= 1.1850E+00
Dynamic Viscosity	= 1.8310E-05
Velocity	= 1.2032E+00
Advection Time	= 5.2928E+01
Reynolds Number	= 4.9593E+06

Variable Range Information

Variable Name	min	max
Density	1.18E+00	1.18E+00
Specific Heat Capacity at Constant Pressure	1.00E+03	1.00E+03
Dynamic Viscosity	1.83E-05	1.83E-05
Thermal Conductivity	2.61E-02	2.61E-02
Thermal Expansivity	3.36E-03	3.36E-03
Static Entropy	0.00E+00	0.00E+00
Velocity u	-1.90E+00	1.90E+00
Velocity v	-2.03E+00	7.68E+00
Velocity w	-1.72E+00	2.17E+00
Pressure	1.01E+05	1.01E+05
Turbulence Kinetic Energy	2.18E-16	3.19E+00
Turbulence Eddy Frequency	2.11E-01	9.58E+10
Eddy Viscosity	2.69E-27	2.33E-01
Temperature	2.98E+02	2.98E+02
Wall Scale	-7.34E-03	3.18E+02
Wall Distance	0.00E+00	2.51E+01

```
 +--------------------------------------------------------------------+
 |                          Job Information                           |
 +--------------------------------------------------------------------+
 Host computer:  FAPEMIG-WILLI (PID:2212)
 Job finished:   Tue May 14 14:12:04 2013
 Total CPU time: 5.539E+04 seconds
             or: (          0:        15:        23:     9.215 )
                 (       Days:     Hours:   Minutes:   Seconds )
 Total wall clock time: 1.449E+05 seconds
             or: (          1:        16:        15:    39.000 )
                 (       Days:     Hours:   Minutes:   Seconds )
End of solution stage.
This run of the ANSYS CFX Solver has finished.
```

E.4.2- Perfil de vento ASHRAE, regime transiente

(Obs.: são relatadas abaixo apenas as configurações diferentes do item anterior)

```
 +--------------------------------------------------------------------+
 |                                                                    |
 |                    CFX Command Language for Run                    |
 |                                                                    |
 +--------------------------------------------------------------------+

[LINES DELETED]
FLOW: Flow Analysis 1
   SOLUTION UNITS:
     Angle Units = [rad]
     Length Units = [m]
     Mass Units = [kg]
     Solid Angle Units = [sr]
     Temperature Units = [K]
     Time Units = [s]
   END
   ANALYSIS TYPE:
     Option = Transient
     EXTERNAL SOLVER COUPLING:
       Option = None
     END
     INITIAL TIME:
       Option = Automatic with Value
       Time = 0 [s]
     END
     TIME DURATION:
       Number of Timesteps per Run = 175
       Option = Number of Timesteps per Run
     END
     TIME STEPS:
       Option = Timesteps
       Timesteps = 2 [s]
     END
   END
[LINES DELETED]

     INITIALISATION:
       Option = Automatic
       INITIAL CONDITIONS:
         Velocity Type = Cartesian
         CARTESIAN VELOCITY COMPONENTS:
           Option = Automatic with Value
           U = 0 [m s^-1]
           V = 0 [m s^-1]
           W = 0 [m s^-1]
         END
         STATIC PRESSURE:
           Option = Automatic with Value
           Relative Pressure = 1 [atm]
         END
         TURBULENCE INITIAL CONDITIONS:
           Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
         END
       END
     END
```

```
  END
  OUTPUT CONTROL:
    TRANSIENT RESULTS: Transient Results 1
      File Compression Level = Best Speed Least Compression
      Option = Standard
      OUTPUT FREQUENCY:
        Option = Time Interval
        Time Interval = 4 [s]
      END
    END
  END
  SOLVER CONTROL:
    Turbulence Numerics = First Order
    ADVECTION SCHEME:
      Option = High Resolution
    END
    CONVERGENCE CONTROL:
      Maximum Number of Coefficient Loops = 7
      Minimum Number of Coefficient Loops = 1
      Timescale Control = Coefficient Loops
    END
    CONVERGENCE CRITERIA:
      Residual Target = 1.E-4
      Residual Type = RMS
    END
    TRANSIENT SCHEME:
      Option = Second Order Backward Euler
      TIMESTEP INITIALISATION:
        Option = Automatic
      END
    END
  END
END
[LINES DELETED]

+--------------------------------------------------------------------+
|                                                                    |
|                              Solver                                |
|                                                                    |
+--------------------------------------------------------------------+
+--------------------------------------------------------------------+
|                         Job Information                            |
+--------------------------------------------------------------------+
Run mode:       serial run
Host computer:  FAPEMIG-WILLI (PID:4012)
Job started:    Sun Jun 02 17:43:51 2013
+--------------------------------------------------------------------+
|        Memory Allocated for Run  (Actual usage may be less)        |
+--------------------------------------------------------------------+
 Data Type      Kwords  Words/Node  Words/Elem      Kbytes Bytes/Node
 Real        2375977.8      407.73      136.42   9281163.0    1630.93
 Integer      712700.4      122.30       40.92   2783986.0     489.21
 Character      4277.0        0.73        0.25      4176.8       0.73
 Logical          95.3        0.02        0.01       372.1       0.07
 Double         1081.3        0.19        0.06      8447.8       1.48
+--------------------------------------------------------------------+
|                         Mesh Statistics                            |
+--------------------------------------------------------------------+
| Domain Name          | Orthog. Angle | Exp. Factor  | Aspect Ratio |
+----------------------+---------------+--------------+--------------+
|                      | Minimum [deg] |   Maximum    |    Maximum   |
+----------------------+---------------+--------------+--------------+
| Domain 1             |        0.8  ! |    119545  ! |   9014604  ! |
+----------------------+---------------+--------------+--------------+
|                      |  %!  %ok  %OK | %!  %ok  %OK | %!  %ok  %OK |
+----------------------+---------------+--------------+--------------+
| Domain 1             |  <1    4   96 | <1    5   95 | <1    8   92 |
+----------------------+---------------+--------------+--------------+
Domain Name : Domain 1
    Total Number of Nodes                              =     5827307
    Total Number of Elements                           =    17416263
        Total Number of Tetrahedrons                   =     9193868
        Total Number of Prisms                         =     8209101
        Total Number of Pyramids                       =       13294
    Total Number of Faces                              =      689991
```

```
+---------------------------------------------------------------------+
|      Initial Conditions Supplied by Fields in the Input Files       |
+---------------------------------------------------------------------+
Domain Name : Domain 1
    Absolute Pressure
    Buoyancy Force.Bforce
    Courant Number
    Eddy Viscosity
    First Blending Function for BSL and SST model
    Pressure
    Pressure.Gradient
    Second Blending Function for SST model
    Shear Strain Rate
    Specific Heat Capacity at Constant Pressure
    Specific Volume
    Static Enthalpy
    Static Entropy
    Total Pressure
    Turbulence Eddy Dissipation
    Turbulence Eddy Frequency
    Turbulence Kinetic Energy
    Velocity
    Velocity Correlation
    Velocity.Beta
    Velocity.Gradient
    Volume Porosity
    Wall Distance
    Wall Scale
    Wall Scale.Gradient
+---------------------------------------------------------------------+
|                     Average Scale Information                       |
+---------------------------------------------------------------------+
Domain Name : Domain 1
    Global Length                                    = 6.3685E+01
    Minimum Extent                                   = 2.5000E+01
    Maximum Extent                                   = 1.1500E+02
    Density                                          = 1.1850E+00
    Dynamic Viscosity                                = 1.8310E-05
    Velocity                                         = 9.2886E-01
    Advection Time                                   = 6.8563E+01
    RMS Courant Number                               = 4.3928E+01
    Maximum Courant Number                           = 1.5803E+03
    Reynolds Number                                  = 3.8284E+06
+---------------------------------------------------------------------+
|               Checking for Isolated Fluid Regions                   |
+------- ------------------------------------------------------------+
 No isolated fluid regions were found.
+---------------------------------------------------------------------+
|              The Equations Solved in This Calculation               |
+---------------------------------------------------------------------+
Subsystem : Momentum and Mass
  U-Mom
  V-Mom
  W-Mom
  P-Mass
Subsystem : TurbKE and TurbFreq
  K-TurbKE
  O-TurbFreq

CFD Solver started: Sun Jun 02 17:49:00 2013

+---------------------------------------------------------------------+
|                       Convergence History   (LAST ITERATION)        |
+---------------------------------------------------------------------+
=======================================================================
TIME STEP =   175 SIMULATION TIME = 3.5000E+02 CPU SECONDS = 4.151E+05
```

```
------------------------------------------------------------------------
COEFFICIENT LOOP ITERATION =    7             CPU SECONDS = 3.057E+05
------------------------------------------------------------------------
|       Equation       | Rate | RMS Res | Max Res |  Linear Solution |
+----------------------+------+---------+---------+------------------+
| U-Mom                | 0.98 | 1.5E-03 | 4.2E-02 |       7.7E-03  OK|
| V-Mom                | 0.99 | 3.1E-03 | 7.0E-02 |       6.9E-03  OK|
| W-Mom                | 0.98 | 1.7E-03 | 4.3E-02 |       6.3E-03  OK|
| P-Mass               | 1.00 | 3.6E-08 | 4.4E-07 |  5.4  1.3E-02  OK|
+----------------------+------+---------+---------+------------------+
| K-TurbKE             | 0.99 | 1.6E-04 | 3.2E-02 |  5.8  3.8E-03  OK|
| O-TurbFreq           | 1.00 | 1.1E-03 | 1.0E-01 | 12.9  1.8E-05  OK|
+----------------------+------+---------+---------+------------------+
```

CFD Solver finished: Sat Jun 08 09:27:08 2013
CFD Solver wall clock seconds: 4.8829E+05

```
========================================================================
             Boundary Flow and Total Source Term Summary
========================================================================
+----------------------------------------------------------------------+
|                              U-Mom                                   |
+----------------------------------------------------------------------+
Boundary         : igreja_externo                        7.0941E+03
Boundary         : igreja_interno                       -2.0375E+01
Boundary         : in                                    3.0412E-06
Boundary         : opening                               2.0800E+03
Boundary         : solo_1                               -7.0806E+03
Boundary         : solo_2                               -3.5652E-01
Neg Accumulation : Domain 1                              3.0210E+01
                                                        -----------
Domain Imbalance :                                       2.1030E+03
Domain Imbalance, in %:                                    0.0002 %
+----------------------------------------------------------------------+
|                              V-Mom                                   |
+----------------------------------------------------------------------+
Boundary         : igreja_externo                        6.1058E+06
Boundary         : igreja_interno                       -2.5454E+00
Boundary         : in                                   -3.3276E-03
Boundary         : opening                              -1.0487E+09
Boundary         : solo_1                                2.9713E+07
Boundary         : solo_2                                1.0129E+09
Neg Accumulation : Domain 1                             -1.8105E+01
                                                        -----------
Domain Imbalance :                                      -9.5541E+03
Domain Imbalance, in %:                                   -0.0009 %
+----------------------------------------------------------------------+
|                              W-Mom                                   |
+----------------------------------------------------------------------+
Boundary         : igreja_externo                        1.4179E+05
Boundary         : igreja_interno                       -1.4185E+05
Boundary         : in                                    2.2799E+08
Boundary         : opening                              -2.2799E+08
Boundary         : solo_1                               -1.0234E+00
Boundary         : solo_2                               -1.5074E+01
Neg Accumulation : Domain 1                              4.1063E+00
                                                        -----------
Domain Imbalance :                                       1.4760E+03
Domain Imbalance, in %:                                    0.0001 %
+----------------------------------------------------------------------+
|                              P-Mass                                  |
+----------------------------------------------------------------------+
Boundary         : in                                    4.7222E+03
Boundary         : opening                              -4.7212E+03
                                                        -----------
Domain Imbalance :                                       9.4873E-01
Domain Imbalance, in %:                                    0.0201 %
========================================================================
                    Wall Force and Moment Summary
========================================================================
Notes:
1. Pressure integrals exclude the reference pressure.  To include
   it, set the expert parameter 'include pref in forces = t'.
```

```
+---------------------------------------------------------------------+
|                      Pressure Force On Walls                        |
+---------------------------------------------------------------------+
                                  X-Comp.      Y-Comp.      Z-Comp.
Domain Group: Domain 1
igreja_externo                -7.1062E+03  -6.1149E+06  -1.4207E+05
igreja_interno                 7.5932E+00  -2.5437E+03   1.4214E+05
solo_1                         7.1013E+03  -2.9776E+07   2.0703E-01
solo_2                        -1.0086E-11  -1.0152E+09  -4.8790E-11
                               -----------  -----------  -----------
Domain Group Totals :          2.7026E+00  -1.0511E+09   6.6910E+01
+---------------------------------------------------------------------+
|                       Viscous Force On Walls                        |
+---------------------------------------------------------------------+
                                  X-Comp.      Y-Comp.      Z-Comp.
Domain Group: Domain 1
igreja_externo                -6.0721E-03   3.1989E-01   2.2953E-03
igreja_interno                 6.5139E-04   5.7482E-04   2.3564E-03
solo_1                         4.3482E-02   1.0964E-01   1.6584E-01
solo_2                         3.5652E-01  -8.3717E-08   1.5074E+01
                               -----------  -----------  -----------
Domain Group Totals :          3.9458E-01   4.3010E-01   1.5244E+01
+---------------------------------------------------------------------+
|                      Pressure Moment On Walls                       |
+---------------------------------------------------------------------+
                                  X-Comp.      Y-Comp.      Z-Comp.
Domain Group: Domain 1
igreja_externo                -1.3332E+05  -1.8864E+04   3.5052E+04
igreja_interno                 3.2386E+05  -8.8715E-01  -2.7952E+01
solo_1                        -4.6465E+08   1.8908E+04  -6.2515E+07
solo_2                         1.3603E+10   1.2241E-10   6.2487E+07
                               -----------  -----------  -----------
Domain Group Totals :          1.3138E+10   4.3598E+01   6.7680E+03
+---------------------------------------------------------------------+
|                       Viscous Moment On Walls                       |
+---------------------------------------------------------------------+
                                  X-Comp.      Y-Comp.      Z-Comp.
Domain Group: Domain 1
igreja_externo                -1.8238E-01  -3.8761E-01  -1.5819E-01
igreja_interno                -4.2067E-03  -2.2452E-03  -5.2513E-03
solo_1                         7.4696E-01  -9.4511E-01  -2.2123E-01
solo_2                         2.9210E-06  -4.0363E+00   1.1135E-06
                               -----------  -----------  -----------
Domain Group Totals :          5.6038E-01  -5.3712E+00  -3.8468E-01
+---------------------------------------------------------------------+
|                   Locations of Maximum Residuals                    |
+---------------------------------------------------------------------+
|       Equation       |  Node # |     X     |     Y     |     Z     |
+---------------------------------------------------------------------+
| U-Mom                | 5755288 |-2.798E+00 | 4.034E+00 | 2.751E+00 |
| V-Mom                |   73040 | 1.683E+01 | 0.000E+00 | 3.886E+01 |
| W-Mom                | 5491152 | 2.093E+00 | 8.331E-01 |-2.796E+00 |
| P-Mass               |   65143 | 1.126E+01 | 0.000E+00 | 6.188E+01 |
| K-TurbKE             | 5827214 | 4.500E+01 | 2.000E-03 |-1.743E+01 |
| O-TurbFreq           | 5602334 |-5.960E+00 | 9.065E-01 |-2.224E+00 |
+---------------------------------------------------------------------+
|                      Peak Values of Residuals                       |
+---------------------------------------------------------------------+
|       Equation       |   Loop #  |  Peak Residual | Final Residual |
+---------------------------------------------------------------------+
| U-Mom                |        2  |   1.81543E-03  |   1.53079E-03  |
| V-Mom                |        3  |   4.11142E-03  |   3.11111E-03  |
| W-Mom                |        4  |   2.11664E-03  |   1.65854E-03  |
| P-Mass               |        3  |   4.07012E-08  |   3.63881E-08  |
| K-TurbKE             |      120  |   2.17601E-04  |   1.60576E-04  |
| O-TurbFreq           |        1  |   1.17792E-03  |   1.14289E-03  |
+---------------------------------------------------------------------+
|                    Average Scale Information                        |
+---------------------------------------------------------------------+
Domain Name : Domain 1
    Global Length                                    = 6.3685E+01
    Minimum Extent                                   = 2.5000E+01
    Maximum Extent                                   = 1.1500E+02
    Density                                          = 1.1850E+00
    Dynamic Viscosity                                = 1.8310E-05
    Velocity                                         = 1.0089E+00
```

```
    Advection Time                                      = 6.3126E+01
    RMS Courant Number                                  = 4.5850E+01
    Maximum Courant Number                              = 1.6505E+03
    Reynolds Number                                     = 4.1581E+06
+--------------------------------------------------------------------+
|                    Variable Range Information                      |
+--------------------------------------------------------------------+
Domain Name : Domain 1
+--------------------------------------------------------------------+
|      Variable Name                        |    min    |    max    |
+--------------------------------------------------------------------+
| Density                                   |  1.18E+00 |  1.18E+00 |
| Specific Heat Capacity at Constant Pressure|  1.00E+03 |  1.00E+03 |
| Dynamic Viscosity                         |  1.83E-05 |  1.83E-05 |
| Thermal Conductivity                      |  2.61E-02 |  2.61E-02 |
| Thermal Expansivity                       |  3.36E-03 |  3.36E-03 |
| Static Entropy                            |  0.00E+00 |  0.00E+00 |
| Velocity u                                | -2.05E+00 |  1.95E+00 |
| Velocity v                                | -2.50E+00 |  4.13E+00 |
| Velocity w                                | -2.01E+00 |  2.16E+00 |
| Pressure                                  |  1.01E+05 |  1.01E+05 |
| Turbulence Kinetic Energy                 |  1.96E-06 |  1.12E+00 |
| Turbulence Eddy Frequency                 |  2.12E-01 |  6.79E+03 |
| Eddy Viscosity                            |  4.50E-10 |  1.90E-01 |
| Temperature                               |  2.98E+02 |  2.98E+02 |
| Wall Scale                                | -4.34E-03 |  2.91E+02 |
| Wall Distance                             |  0.00E+00 |  2.40E+01 |
+--------------------------------------------------------------------+
|                          Job Information                           |
+--------------------------------------------------------------------+
Host computer:  FAPEMIG-WILLI (PID:4012)
Job finished:   Sat Jun 08 09:31:39 2013
Total CPU time: 3.061E+05 seconds
            or: (          3:        13:         1:    55.594 )
                (       Days:     Hours:   Minutes:   Seconds )
Total wall clock time: 4.889E+05 seconds
            or: (          5:        15:        47:    48.000 )
                (       Days:     Hours:   Minutes:   Seconds )
End of solution stage.
This run of the ANSYS CFX Solver has finished.
```

E.4.3- Perfil de vento polinomial, regime permanente

(Obs.: são relatadas abaixo apenas as configurações diferentes do item E.4.1)

```
+--------------------------------------------------------------------+
|                                                                    |
|                    CFX Command Language for Run                    |
|                                                                    |
+--------------------------------------------------------------------+

LIBRARY:
  CEL:
    EXPRESSIONS:
      h = y/1[m]
      udeh = \
        6*(-2.419E-07*h^6+2.3176E-05*h^5-0.00087*h^4+0.0163*h^3-0.1596*h^2+0.\
        7593*h)
    END
  END
  MATERIAL: ar corrigido
    Material Description = Ar corrigido
    Material Group = Air Data,Constant Property Gases
    Option = Pure Substance
    Thermodynamic State = Gas
    PROPERTIES:
      Option = General Material
      EQUATION OF STATE:
        Density = 1.1044 [kg m^-3]
        Molar Mass = 28.96 [kg kmol^-1]
        Option = Value
      END
```

```
      SPECIFIC HEAT CAPACITY:
        Option = Value
        Specific Heat Capacity = 1.0044E+03 [J kg^-1 K^-1]
        Specific Heat Type = Constant Pressure
      END
      REFERENCE STATE:
        Option = Specified Point
        Reference Pressure = 93247 [Pa]
        Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]
        Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]
        Reference Temperature = 21 [C]
      END
      DYNAMIC VISCOSITY:
        Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m^-1 s^-1]
        Option = Value
      END
      THERMAL CONDUCTIVITY:
        Option = Value
        Thermal Conductivity = 2.61E-02 [W m^-1 K^-1]
      END
      ABSORPTION COEFFICIENT:
        Absorption Coefficient = 0.01 [m^-1]
        Option = Value
      END
      SCATTERING COEFFICIENT:
        Option = Value
        Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
      END
      REFRACTIVE INDEX:
        Option = Value
        Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
      END
      THERMAL EXPANSIVITY:
        Option = Value
        Thermal Expansivity = 0.003356 [K^-1]
      END
    END
  END
 END
[LINES DELETED]
    FLUID DEFINITION: Fluid 1
      Material = ar corrigido
      Option = Material Library
      MORPHOLOGY:
        Option = Continuous Fluid
      END
    END
    FLUID MODELS:
      COMBUSTION MODEL:
        Option = None
      END
      HEAT TRANSFER MODEL:
        Fluid Temperature = 21 [C]
        Option = Isothermal
      END
      THERMAL RADIATION MODEL:
        Option = None
      END
      TURBULENCE MODEL:
        Option = SST
      END
      TURBULENT WALL FUNCTIONS:
        Option = Automatic
      END
    END
  END
[LINES DELETED]
```

```
 +-------------------------------------------------------------------+
 |                                                                   |
 |                              Solver                               |
 |                                                                   |
 +-------------------------------------------------------------------+
 +-------------------------------------------------------------------+
 |                         Job Information                           |
 +-------------------------------------------------------------------+
```

```
 Run mode:       serial run
 Host computer:  FAPEMIG-WILLI (PID:4540)
 Job started:    Sun Jul 28 19:37:42 2013
 +---------------------------------------------------------------------+
 |        Memory Allocated for Run  (Actual usage may be less)         |
 +---------------------------------------------------------------------+
  Data Type      Kwords  Words/Node  Words/Elem      Kbytes Bytes/Node
  Real        2864008.5      377.37      106.10  11187533.0    1509.48
  Integer     1011570.1      133.29       37.47   3951445.2     533.15
  Character      4247.3        0.56        0.16      4147.7       0.56
  Logical          95.3        0.01        0.00       372.1       0.05
  Double         1081.3        0.14        0.04      8447.8       1.14
  +--------------------------------------------------------------------+
 |                          Mesh Statistics                            |
 +---------------------------------------------------------------------+
 | Domain Name          | Orthog. Angle | Exp. Factor  | Aspect Ratio |
 +----------------------+---------------+--------------+--------------+
 |                      | Minimum [deg] |   Maximum    |    Maximum   |
 +----------------------+---------------+--------------+--------------+
 | Domain 1             |        0.6  ! |    467241  ! |   8577502  ! |
 +----------------------+---------------+--------------+--------------+
 |                      |  %!  %ok  %OK | %!  %ok  %OK | %!  %ok  %OK |
 +----------------------+---------------+--------------+--------------+
 | Domain 1             |  <1    3   97 | <1    3   97 | <1    7   93 |
 +----------------------+---------------+--------------+--------------+
Domain Name : Domain 1
    Total Number of Nodes                                =     7589414
    Total Number of Elements                             =    26994709
        Total Number of Tetrahedrons                     =    18336293
        Total Number of Prisms                           =     8647829
        Total Number of Pyramids                         =       10587
    Total Number of Faces                                =      750794
 +---------------------------------------------------------------------+
 |      Initial Conditions Supplied by Fields in the Input Files       |
 +---------------------------------------------------------------------+
 Domain Name : Domain 1
    Absolute Pressure
    Buoyancy Force.Bforce
    Courant Number
    Eddy Viscosity
    First Blending Function for BSL and SST model
    Pressure
    Pressure.Gradient
    Second Blending Function for SST model
    Shear Strain Rate
    Specific Heat Capacity at Constant Pressure
    Specific Volume
    Static Enthalpy
    Total Pressure
    Turbulence Eddy Dissipation
    Turbulence Eddy Frequency
    Turbulence Eddy Frequency.Beta
    Turbulence Eddy Frequency.Gradient
    Turbulence Kinetic Energy
    Turbulence Kinetic Energy.Beta
    Turbulence Kinetic Energy.Gradient
    Velocity
    Velocity.Beta
    Velocity.Gradient
    Volume Porosity
    Wall Distance
    Wall Scale
    Wall Scale.Gradient
 +---------------------------------------------------------------------+
 |                    Average Scale Information                        |
 +---------------------------------------------------------------------+
 Domain Name : Domain 1
    Global Length                                        = 6.3685E+01
    Minimum Extent                                       = 2.5000E+01
    Maximum Extent                                       = 1.1500E+02
    Density                                              = 1.1044E+00
    Dynamic Viscosity                                    = 1.8310E-05
    Velocity                                             = 5.1934E+00
    Advection Time                                       = 1.2263E+01
    Reynolds Number                                      = 1.9949E+07
```

```
+---------------------------------------------------------------------+
|               Checking for Isolated Fluid Regions                   |
+---------------------------------------------------------------------+
 No isolated fluid regions were found.
+---------------------------------------------------------------------+
|             The Equations Solved in This Calculation                |
+---------------------------------------------------------------------+
Subsystem : Momentum and Mass
  U-Mom
  V-Mom
  W-Mom
  P-Mass
Subsystem : TurbKE and TurbFreq
  K-TurbKE
  O-TurbFreq
```

CFD Solver started: Sun Jul 28 19:42:12 2013

Convergence History (LAST ITERATION)

OUTER LOOP ITERATION = 200 CPU SECONDS = 3.473E+05 (5.485E+04)

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.51	9.2E-04	3.2E-02	2.8E-02	OK
V-Mom	0.51	1.9E-03	2.7E-01	9.5E-01	ok
W-Mom	0.51	9.9E-04	3.3E-02	3.3E-02	OK
P-Mass	1.03	3.9E-08	3.5E-05	5.2 2.6E-02	OK
K-TurbKE	0.97	1.2E-04	2.7E-01	5.7 5.8E-03	OK
O-TurbFreq	1.72	9.1E-10	2.5E-06	12.3 3.1E-08	OK

CFD Solver finished: Wed Jul 31 09:34:51 2013
CFD Solver wall clock seconds: 2.2276E+05

Boundary Flow and Total Source Term Summary

U-Mom	
Boundary : igreja_externo	6.9085E+03
Boundary : igreja_interno	1.9989E+00
Boundary : in	1.1337E-06
Boundary : opening	-1.9199E+02
Boundary : solo_1	-6.9694E+03
Boundary : solo_2	-1.0308E+00
Domain Imbalance :	-2.5198E+02
Domain Imbalance, in %:	0.0000 %

V-Mom	
Boundary : igreja_externo	6.1052E+06
Boundary : igreja_interno	7.6803E+00
Boundary : in	-1.3239E-02
Boundary : opening	-1.0487E+09
Boundary : solo_1	2.9713E+07
Boundary : solo_2	1.0129E+09
Domain Imbalance :	-8.5760E+03
Domain Imbalance, in %:	-0.0008 %

W-Mom	
Boundary : igreja_externo	1.4037E+05
Boundary : igreja_interno	-1.4189E+05
Boundary : in	2.2812E+08
Boundary : opening	-2.2812E+08
Boundary : solo_1	4.0293E+01
Boundary : solo_2	-2.2537E+02
Domain Imbalance :	-3.2411E+03
Domain Imbalance, in %:	-0.0003 %

```
+--------------------------------------------------------------------+
|                              P-Mass                                |
+--------------------------------------------------------------------+
Boundary         : in                                    1.8322E+04
Boundary         : opening                              -1.8323E+04
                                                        -----------
Domain Imbalance :                                      -5.3125E-01
Domain Imbalance, in %:                                   -0.0029 %
======================================================================
                    Wall Force and Moment Summary
======================================================================
Notes:
1. Pressure integrals exclude the reference pressure.  To include
   it, set the expert parameter 'include pref in forces = t'.
+--------------------------------------------------------------------+
|                     Pressure Force On Walls                        |
+--------------------------------------------------------------------+
                                  X-Comp.      Y-Comp.      Z-Comp.
Domain Group: Domain 1
igreja_externo                 -6.9031E+03  -6.1052E+06  -1.4037E+05
igreja_interno                  4.8441E+00  -3.9844E+00   1.4189E+05
solo_1                          6.9769E+03  -2.9713E+07  -4.4516E+01
solo_2                         -1.0066E-11  -1.0129E+09  -4.8691E-11
                                -----------  -----------  -----------
Domain Group Totals :           7.8719E+01  -1.0487E+09   1.4789E+03
+--------------------------------------------------------------------+
|                      Viscous Force On Walls                        |
+--------------------------------------------------------------------+
                                  X-Comp.      Y-Comp.      Z-Comp.
Domain Group: Domain 1
igreja_externo                  4.6934E-01   5.8155E+00   4.6806E-01
igreja_interno                  2.3555E-03   9.1249E-04   3.6188E-02
solo_1                          9.5690E-01   1.7628E+00   6.3109E+00
solo_2                          1.0308E+00  -1.0221E-06   2.2537E+02
                                -----------  -----------  -----------
Domain Group Totals :           2.4594E+00   7.5792E+00   2.3218E+02
+--------------------------------------------------------------------+
|                     Pressure Moment On Walls                       |
+--------------------------------------------------------------------+
                                  X-Comp.      Y-Comp.      Z-Comp.
Domain Group: Domain 1
igreja_externo                 -1.2875E+05  -1.8693E+04   3.4588E+04
igreja_interno                  3.2351E+05  -1.0181E+00  -3.0751E+01
solo_1                         -4.6367E+08   1.8749E+04  -6.2380E+07
solo_2                          1.3572E+10   1.2216E-10   6.2347E+07
                                -----------  -----------  -----------
Domain Group Totals :           1.3109E+10   5.4512E+01   1.2240E+03
+--------------------------------------------------------------------+
|                      Viscous Moment On Walls                       |
+--------------------------------------------------------------------+
                                  X-Comp.      Y-Comp.      Z-Comp.
Domain Group: Domain 1
igreja_externo                 -2.3861E+00  -3.9150E+00  -7.4579E+00
igreja_interno                 -3.1519E-01  -4.0599E-03   1.8500E-02
solo_1                          1.3846E+01  -2.2416E+01  -4.2339E+00
solo_2                          7.2394E-07   4.6189E+01   5.8922E-06
                                -----------  -----------  -----------
Domain Group Totals :           1.1145E+01   1.9854E+01  -1.1673E+01
+--------------------------------------------------------------------+
|                   Locations of Maximum Residuals                   |
+--------------------------------------------------------------------+
|       Equation       |  Node # |     X     |     Y     |     Z     |
+--------------------------------------------------------------------+
| U-Mom                | 7138554 | 7.873E+00 | 6.017E-01 | 3.902E+00 |
| V-Mom                | 7473686 |-4.794E+00 | 2.000E-03 |-4.468E+01 |
| W-Mom                | 7117111 | 2.655E-02 | 3.597E+00 | 3.907E+00 |
| P-Mass               | 7046599 | 2.293E+01 | 4.402E-03 |-6.288E+00 |
| K-TurbKE             | 5380947 |-4.509E-01 | 4.535E+00 | 3.963E+00 |
| O-TurbFreq           | 7463551 |-1.427E+01 | 7.577E-09 |-2.260E+01 |
```

Peak Values of Residuals			
Equation	Loop #	Peak Residual	Final Residual
U-Mom	10	3.39027E-04	3.13704E-04
V-Mom	19	4.23932E-04	4.00551E-04
W-Mom	137	4.55071E-04	3.77103E-04
P-Mass	16	4.89151E-08	3.86647E-08
K-TurbKE	52	2.76570E-03	2.44419E-03
O-TurbFreq	117	2.20811E-09	1.02780E-09

False Transient Information		
Equation	Type	Elapsed Pseudo-Time
U-Mom	Auto	4.56256E+03
V-Mom	Auto	4.56256E+03
W-Mom	Auto	4.56256E+03
K-TurbKE	Auto	4.56256E+03
O-TurbFreq	Auto	4.56256E+03

Average Scale Information

Domain Name : Domain 1

Global Length	= 6.3685E+01
Minimum Extent	= 2.5000E+01
Maximum Extent	= 1.1500E+02
Density	= 1.1044E+00
Dynamic Viscosity	= 1.8310E-05
Velocity	= 5.1806E+00
Advection Time	= 1.2293E+01
Reynolds Number	= 1.9900E+07

Variable Range Information

Domain Name : Domain 1

Variable Name	min	max
Density	1.10E+00	1.10E+00
Specific Heat Capacity at Constant Pressure	1.00E+03	1.00E+03
Dynamic Viscosity	1.83E-05	1.83E-05
Thermal Conductivity	2.61E-02	2.61E-02
Static Entropy	0.00E+00	0.00E+00
Velocity u	-9.95E+00	9.80E+00
Velocity v	-6.67E+00	9.40E+00
Velocity w	-6.85E+00	1.04E+01
Pressure	1.01E+05	1.01E+05
Turbulence Kinetic Energy	5.35E-14	5.52E+00
Turbulence Eddy Frequency	5.16E-01	1.03E+11
Eddy Viscosity	5.75E-25	1.05E+00
Temperature	2.94E+02	2.94E+02
Wall Scale	-7.34E-03	3.18E+02
Wall Distance	0.00E+00	2.51E+01

CPU Requirements of Numerical Solution

Subsystem Name	Discretization (secs.)	Discretization %total	Linear Solution (secs.)	Linear Solution %total
Momentum and Mass	3.99E+04	42.9 %	7.37E+03	7.9 %
TurbKE and TurbFreq	1.62E+04	17.4 %	1.05E+04	11.3 %
Subsystem Summary	5.61E+04	60.3 %	1.79E+04	19.2 %
Variable Updates	1.68E+04	18.1 %		
File Reading	1.62E+01	0.0 %		
File Writing	1.74E+03	1.9 %		
Miscellaneous	4.86E+02	0.5 %		
Total	9.31E+04			

```
 +------------------------------------------------------------------------+
 |                          Job Information                               |
 +------------------------------------------------------------------------+
 Host computer:  FAPEMIG-WILLI (PID:4540)
 Job finished:   Wed Jul 31 09:38:35 2013
 Total CPU time: 9.307E+04 seconds
             or: (          1:         1:        51:     5.625 )
                 (       Days:     Hours:   Minutes:   Seconds )
 Total wall clock time: 2.233E+05 seconds
             or: (          2:        14:         0:    53.000 )
                 (       Days:     Hours:   Minutes:   Seconds )
End of solution stage.
This run of the ANSYS CFX Solver has finished.
```

E.4.4- Perfil de vento polinomial, regime transiente

(Obs.: são relatadas abaixo apenas as configurações diferentes do item E.4.2)

```
 +------------------------------------------------------------------------+
 |                                                                        |
 |                    CFX Command Language for Run                        |
 |                                                                        |
 +------------------------------------------------------------------------+

 LIBRARY:
   CEL:
     EXPRESSIONS:
       h = y/1[m]
       udeh = \
         6*(-2.419E-07*h^6+2.3176E-05*h^5-0.00087*h^4+0.0163*h^3-0.1596*h^2+0.\
         7593*h)
     END
   END
   MATERIAL: ar corrigido
     Material Description = Ar corrigido
     Material Group = Air Data,Constant Property Gases
     Option = Pure Substance
     Thermodynamic State = Gas
     PROPERTIES:
       Option = General Material
       EQUATION OF STATE:
         Density = 1.1044 [kg m^-3]
         Molar Mass = 28.96 [kg kmol^-1]
         Option = Value
       END
       SPECIFIC HEAT CAPACITY:
         Option = Value
         Specific Heat Capacity = 1.0044E+03 [J kg^-1 K^-1]
         Specific Heat Type = Constant Pressure
       END
       REFERENCE STATE:
         Option = Specified Point
         Reference Pressure = 93247 [Pa]
         Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]
         Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]
         Reference Temperature = 21 [C]
       END
       DYNAMIC VISCOSITY:
         Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m^-1 s^-1]
         Option = Value
       END
       THERMAL CONDUCTIVITY:
         Option = Value
         Thermal Conductivity = 2.61E-02 [W m^-1 K^-1]
       END
       ABSORPTION COEFFICIENT:
         Absorption Coefficient = 0.01 [m^-1]
         Option = Value
       END
       SCATTERING COEFFICIENT:
         Option = Value
         Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
       END
```

```
      REFRACTIVE INDEX:
        Option = Value
        Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
      END
      THERMAL EXPANSIVITY:
        Option = Value
        Thermal Expansivity = 0.003356 [K^-1]
      END
    END
  END
END
[LINES DELETED]

    FLUID DEFINITION: Fluid 1
      Material = ar corrigido
      Option = Material Library
      MORPHOLOGY:
        Option = Continuous Fluid
      END
    END
+---------------------------------------------------------------------+
|                                                                     |
|                              Solver                                 |
|                                                                     |
+---------------------------------------------------------------------+
+---------------------------------------------------------------------+
|                         Job Information                             |
+---------------------------------------------------------------------+
Run mode:       serial run
Host computer:  FAPEMIG-WILLI (PID:1748)
Job started:    Thu Jul 18 18:08:15 2013
+---------------------------------------------------------------------+
|        Memory Allocated for Run  (Actual usage may be less)         |
+---------------------------------------------------------------------+
 Data Type      Kwords  Words/Node  Words/Elem      Kbytes Bytes/Node
 Real        6826029.5     1108.59      326.66  26664176.0    4434.38
 Integer     2075586.0      337.09       99.33   8107757.5    1348.36
 Character     11070.3        1.80        0.53     10810.8       1.80
 Logical         246.5        0.04        0.01       962.7       0.16
 Double         2797.3        0.45        0.13     21853.6       3.63
 +--------------------------------------------------------------------+
|                         Mesh Statistics                             |
+-----------------------------------------------------------------------+
| Domain Name          | Orthog. Angle | Exp. Factor  | Aspect Ratio |
+----------------------+---------------+--------------+--------------+
|                      | Minimum [deg] |   Maximum    |    Maximum   |
+----------------------+---------------+--------------+--------------+
| Domain 1             |        6.2  ! |       240  ! |       392 ok |
+----------------------+---------------+--------------+--------------+
|                      |  %!  %ok  %OK | %!  %ok  %OK | %!  %ok  %OK |
+----------------------+---------------+--------------+--------------+
| Domain 1             |  <1    3   97 | <1    3   97 |  0    7   93 |
+----------------------+---------------+--------------+--------------+
Domain Name : Domain 1
    Total Number of Nodes                                =     6157371
    Total Number of Elements                             =    20896507
        Total Number of Tetrahedrons                     =    13406523
        Total Number of Prisms                           =     7488044
        Total Number of Pyramids                         =        1940
    Total Number of Faces                                =      650986
+---------------------------------------------------------------------+
|                    Average Scale Information                        |
+---------------------------------------------------------------------+
Domain Name : Domain 1
    Global Length                                         = 6.3685E+01
    Minimum Extent                                        = 2.5000E+01
    Maximum Extent                                        = 1.1500E+02
    Density                                               = 1.1044E+00
    Dynamic Viscosity                                     = 1.8310E-05
    Velocity                                              = 0.0000E+00
+---------------------------------------------------------------------+
|               Checking for Isolated Fluid Regions                   |
+---------------------------------------------------------------------+
 No isolated fluid regions were found.
```

```
+--------------------------------------------------------------------+
|              The Equations Solved in This Calculation              |
+--------------------------------------------------------------------+
Subsystem : Wall Scale
  Wallscale
Subsystem : Momentum and Mass
  U-Mom
  V-Mom
  W-Mom
  P-Mass
Subsystem : TurbKE and TurbFreq
  K-TurbKE
  O-TurbFreq
```

CFD Solver started: Thu Jul 18 18:11:05 2013

```
+--------------------------------------------------------------------+
|                       Convergence History (LAST ITERATION)         |
+--------------------------------------------------------------------+

====================================================================
TIME STEP =   175 SIMULATION TIME = 3.5000E+02 CPU SECONDS = 4.549E+05
--------------------------------------------------------------------
COEFFICIENT LOOP ITERATION =    7              CPU SECONDS = 4.570E+05
--------------------------------------------------------------------
|       Equation       | Rate | RMS Res | Max Res |  Linear Solution |
+----------------------+------+---------+---------+------------------+
| U-Mom                | 0.98 | 3.2E-04 | 6.9E-02 |       3.9E-02  OK|
| V-Mom                | 1.00 | 4.1E-04 | 1.1E-01 |       3.1E-02  OK|
| W-Mom                | 0.98 | 3.6E-04 | 8.4E-02 |       6.0E-02  OK|
| P-Mass               | 0.99 | 3.7E-08 | 2.5E-06 |  5.3  1.8E-02  OK|
+----------------------+------+---------+---------+------------------+
| K-TurbKE             | 1.04 | 3.3E-04 | 4.0E-02 |  5.7  2.5E-02  OK|
| O-TurbFreq           | 0.73 | 1.7E-03 | 2.5E-01 | 12.5  3.1E-04  OK|
+----------------------+------+---------+---------+------------------+
```

CFD Solver finished: Sat Jul 27 07:06:41 2013
CFD Solver wall clock seconds: 7.3774E+05

```
====================================================================
             Boundary Flow and Total Source Term Summary
====================================================================
+--------------------------------------------------------------------+
|                              U-Mom                                 |
+--------------------------------------------------------------------+
Boundary         : igreja_externo                        6.9435E+03
Boundary         : igreja_interno                       -3.9439E+00
Boundary         : in                                   -4.5943E-07
Boundary         : opening                              -1.5360E+03
Boundary         : solo_1                               -6.9787E+03
Boundary         : solo_2                               -1.5076E+00
Neg Accumulation : Domain 1                             -8.0627E+00
                                                        -----------
Domain Imbalance :                                      -1.5847E+03
Domain Imbalance, in %:                                   -0.0002 %
+--------------------------------------------------------------------+
|                              V-Mom                                 |
+--------------------------------------------------------------------+
Boundary         : igreja_externo                        6.1053E+06
Boundary         : igreja_interno                        4.4145E+00
Boundary         : in                                   -1.3229E-02
Boundary         : opening                              -1.0487E+09
Boundary         : solo_1                                2.9713E+07
Boundary         : solo_2                                1.0129E+09
Neg Accumulation : Domain 1                             -1.7640E+01
                                                        -----------
Domain Imbalance :                                      1.7006E+04
Domain Imbalance, in %:                                   0.0016 %
+--------------------------------------------------------------------+
|                              W-Mom                                 |
+--------------------------------------------------------------------+
Boundary         : igreja_externo                        1.4038E+05
Boundary         : igreja_interno                       -1.4189E+05
Boundary         : in                                    2.2812E+08
Boundary         : opening                              -2.2812E+08
```

```
Boundary         : solo_1                                   3.9180E+01
Boundary         : solo_2                                  -2.2326E+02
Neg Accumulation : Domain 1                                 1.3789E+01
                                                           -----------
Domain Imbalance :                                          8.6971E+02
Domain Imbalance, in %:                                       0.0001 %
+--------------------------------------------------------------------+
|                              P-Mass                                |
+--------------------------------------------------------------------+
Boundary         : in                                       1.8322E+04
Boundary         : opening                                 -1.8322E+04
                                                           -----------
Domain Imbalance :                                         -1.9922E-01
Domain Imbalance, in %:                                      -0.0011 %
====================================================================
                    Wall Force and Moment Summary
====================================================================
Notes:
1. Pressure integrals exclude the reference pressure.  To include
   it, set the expert parameter 'include pref in forces = t'.
+--------------------------------------------------------------------+
|                      Pressure Force On Walls                       |
+--------------------------------------------------------------------+
                                    X-Comp.      Y-Comp.      Z-Comp.
Domain Group: Domain 1
igreja_externo                  -6.9397E+03  -6.1053E+06  -1.4038E+05
igreja_interno                   2.2545E+00   5.0156E+00   1.4190E+05
solo_1                           6.9782E+03  -2.9713E+07  -4.4617E+01
solo_2                          -1.0066E-11  -1.0129E+09  -4.8691E-11
                                 -----------  -----------  -----------
Domain Group Totals :            4.0786E+01  -1.0487E+09   1.4759E+03
+--------------------------------------------------------------------+
|                       Viscous Force On Walls                       |
+--------------------------------------------------------------------+
                                    X-Comp.      Y-Comp.      Z-Comp.
Domain Group: Domain 1
igreja_externo                   5.4181E-01   5.7250E+00   7.4412E-01
igreja_interno                   1.5086E-03  -5.4888E-03   4.8895E-02
solo_1                           9.7007E-01   1.7530E+00   5.5474E+00
solo_2                           1.5076E+00  -1.1940E-07   2.2326E+02
                                 -----------  -----------  -----------
Domain Group Totals :            3.0210E+00   7.4725E+00   2.2960E+02
+--------------------------------------------------------------------+
|                      Pressure Moment On Walls                       |
+--------------------------------------------------------------------+
                                    X-Comp.      Y-Comp.      Z-Comp.
Domain Group: Domain 1
igreja_externo                  -1.2869E+05  -1.8708E+04   3.4727E+04
igreja_interno                   3.2350E+05   7.1934E-01  -9.5349E-01
solo_1                          -4.6367E+08   1.8817E+04  -6.2380E+07
solo_2                           1.3572E+10   1.2216E-10   6.2347E+07
                                 -----------  -----------  -----------
Domain Group Totals :            1.3109E+10   1.1007E+02   1.1280E+03
+--------------------------------------------------------------------+
|                       Viscous Moment On Walls                      |
+--------------------------------------------------------------------+
                                    X-Comp.      Y-Comp.      Z-Comp.
Domain Group: Domain 1
igreja_externo                  -5.4566E-01  -4.0528E+00  -6.6964E+00
igreja_interno                  -2.7695E-01  -2.4458E-03   1.6085E-02
solo_1                           1.3218E+01  -2.2350E+01  -4.3653E+00
solo_2                           1.0745E-05   1.0663E+02   8.7289E-06
                                 -----------  -----------  -----------
Domain Group Totals :            1.2395E+01   8.0228E+01  -1.1046E+01
+--------------------------------------------------------------------+
|                  Locations of Maximum Residuals                    |
+--------------------------------------------------------------------+
|       Equation       |  Node # |     X     |     Y     |     Z     |
+--------------------------------------------------------------------+
| U-Mom                | 5801716 | 4.669E+00 | 6.018E-01 | 3.902E+00 |
| V-Mom                | 5887789 | 3.892E+00 | 4.901E+00 |-3.902E+00 |
| W-Mom                | 5887789 | 3.892E+00 | 4.901E+00 |-3.902E+00 |
| P-Mass               |    4628 | 3.890E+00 | 4.900E+00 |-3.900E+00 |
| K-TurbKE             |  440327 |-1.051E+00 | 8.790E+00 | 5.308E-01 |
| O-TurbFreq           |  184198 |-2.693E-01 | 4.583E+00 | 3.900E+00 |
+--------------------------------------------------------------------+
```

```
+--------------------------------------------------------------------+
|                      Peak Values of Residuals                      |
+--------------------------------------------------------------------+
|       Equation       |   Loop #  |  Peak Residual | Final Residual |
+--------------------------------------------------------------------+
| U-Mom                |        1  |   7.58873E-03  |   3.19341E-04  |
| V-Mom                |        1  |   1.29269E-02  |   4.06823E-04  |
| W-Mom                |        1  |   1.80037E-02  |   3.57530E-04  |
| P-Mass               |        1  |   1.08472E-05  |   3.67496E-08  |
| K-TurbKE             |        1  |   1.23691E-01  |   3.27987E-04  |
| O-TurbFreq           |        1  |   5.92193E-02  |   1.72102E-03  |
+--------------------------------------------------------------------+
|                    Average Scale Information                       |
+--------------------------------------------------------------------+
Domain Name : Domain 1
    Global Length                                      = 6.3685E+01
    Minimum Extent                                     = 2.5000E+01
    Maximum Extent                                     = 1.1500E+02
    Density                                            = 1.1044E+00
    Dynamic Viscosity                                  = 1.8310E-05
    Velocity                                           = 4.9803E+00
    Advection Time                                     = 1.2787E+01
    RMS Courant Number                                 = 1.8304E+02
    Maximum Courant Number                             = 8.2573E+03
    Reynolds Number                                    = 1.9131E+07
+--------------------------------------------------------------------+
|                    Variable Range Information                      |
+--------------------------------------------------------------------+
Domain Name : Domain 1
+--------------------------------------------------------------------+
|      Variable Name                          |    min    |    max    |
+--------------------------------------------------------------------+
| Density                                     |  1.10E+00 |  1.10E+00 |
| Specific Heat Capacity at Constant Pressure|  1.00E+03 |  1.00E+03 |
| Dynamic Viscosity                           |  1.83E-05 |  1.83E-05 |
| Thermal Conductivity                        |  2.61E-02 |  2.61E-02 |
| Static Entropy                              |  0.00E+00 |  0.00E+00 |
| Velocity u                                  | -9.68E+00 |  1.00E+01 |
| Velocity v                                  | -6.56E+00 |  8.37E+00 |
| Velocity w                                  | -6.72E+00 |  9.99E+00 |
| Pressure                                    |  1.01E+05 |  1.01E+05 |
| Turbulence Kinetic Energy                   |  4.63E-07 |  5.03E+00 |
| Turbulence Eddy Frequency                   |  3.69E-01 |  3.89E+03 |
| Eddy Viscosity                              |  1.54E-09 |  9.21E-01 |
| Temperature                                 |  2.94E+02 |  2.94E+02 |
| Wall Scale                                  | -3.22E-03 |  2.92E+02 |
| Wall Distance                               |  0.00E+00 |  2.40E+01 |
+--------------------------------------------------------------------+
|                          Job Information                           |
+--------------------------------------------------------------------+
Host computer:  FAPEMIG-WILLI (PID:1748)
Job finished:   Sat Jul 27 07:12:14 2013
Total CPU time: 4.575E+05 seconds
            or: (          5:         7:         5:    39.406 )
                (       Days:     Hours:   Minutes:   Seconds )
Total wall clock time: 7.382E+05 seconds
            or: (          8:        13:         3:    59.000 )
                (       Days:     Hours:   Minutes:   Seconds )
End of solution stage.
This run of the ANSYS CFX Solver has finished.
```