

Universidade Federal de Minas Gerais

**Análise de envoltória e do sistema de iluminação a partir do
“Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética
de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos” para avaliação de
desempenho de sistemas de fachada e de proteções solares.**

Iara Gonçalves dos Santos

Belo Horizonte

Julho de 2009

Iara Gonçalves dos Santos

**Análise de envoltória e do sistema de iluminação a partir do
“Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética
de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos” para avaliação de
desempenho de sistemas de fachada e de proteções solares.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura da Escola de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, na área de concentração de Bens Culturais, Tecnologia e Território, dentro da linha de pesquisa em Tecnologia do Ambiente Construído.

Orientador:

Profa. Dra. Roberta Vieira Gonçalves de Souza

Belo Horizonte

Escola de Arquitetura da UFMG

2009

FICHA CATALOGRÁFICA

S237a

Santos, Iara Gonçalves dos.

Análise de envoltória e do sistema de iluminação a partir do “Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos” para avaliação de desempenho de sistemas de fachada e de proteções solares [manuscrito] / Iara Gonçalves dos Santos. - 2009.
146f. : il.

Orientadora: Roberta Vieira Gonçalves de Souza.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.

1. Arquitetura - Conservação de energia – Regulamentação. 2. Edifícios - Conservação de energia. I. Souza, Roberta Vieira Gonçalves de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. III. Título.

CDD 720.47

Análise de envoltória e do sistema de iluminação a partir do “Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos” para avaliação de desempenho de sistemas de fachada e de proteções solares.

Iara Gonçalves dos Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Escola de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, área de concentração em Tecnologia do Ambiente Construído.

Aprovado por:

PROF^A. ROBERTA VIEIRA GONÇALVES DE SOUZA (DRA.) – ORIENTADOR

PROF^A. ELEONORA SAD DE ASSIS. (DRA.) - MEMBRO

PROF. ALDOMAR PEDRINI (D. SC.) - MEMBRO

Belo Horizonte, MG

Julho de 2009

A Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Ao Tribunal de Justiça de Minas Gerais, pela concessão das informações necessárias para a realização desta pesquisa. De modo particular a Otto Leonardo, Márcio Lacerda, Rosana Rocha Lage e Vital de Souza Figueiredo F. pela disponibilidade em providenciá-las.

À BM Consultoria em Esquadrias, através de Maria Isabel Mol; Guardian do Brasil Vidros Planos Ltda, através de Ramon Perez; Useplac, através de Aldo Pellicciotti; a Carlos Alberto Cardoso Braga, consultor em sistemas de condicionamento de ar; DesignBuilder Software Ltd., através de Andy Tindale, pelos esclarecimentos e dados cedidos.

À equipe do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da UFSC, pelas preciosas dicas e materiais disponibilizados. Ao prof. Aldomar Pedrini, da UFRN, pela introdução ao software DesignBuilder. Aos companheiros do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (Labcon-EA) da UFMG pela ajuda técnica em vários pontos desta pesquisa. Ao Prof. José Rubens Gonçalves de Souza pela ajuda em ciências térmicas e na configuração de vidro que subsidiou parte deste estudo. Aos demais amigos e docentes vinculados à UFMG e à UFVJM pela convivência e pelas consultorias gratuitas.

Agradeço aos professores que me inspiraram a acreditar na academia. Em especial à Profa. Roberta Vieira, pela paciência em meus momentos difíceis, e à Profa. Eleonora Sad Assis, pelo exemplo de conduta.

Enfim, agradeço à minha família, pelo incentivo e apoio incondicional aos meus estudos. Aos meus amigos, pelo suporte oferecido durante minha etapa de transformação de vida durante o mestrado. Aos amigos que me animaram a confiar em Deus, a quem agradeço intensamente e dedico este trabalho.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

APP- *The Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate*

ASHRAE- *American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers*

ABC- *Asia Business Council*

BEE- *Bureau of Energy Efficiency*

BEN - Balanço Energético Nacional

DOE - *U. S. Department of Energy*

EIA- *Energy Information Administration*

GBC-BRASIL- *Green Building Council-Brasil*

IEA- *International Energy Agency*

ICC- *International Code Council*

IECC- *International Energy Conservation Code*

INMETRO- Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

IPCC- *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LABEEE- Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (UFSC)

LABCON- Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (UFMG)

LBNL- *Lawrence Berkeley National Laboratory*

MME- Ministério das Minas e Energia

NBR – Norma Brasileira

NFRC - *National Fenestration Rating Council*

PROCEL- Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

RTQ- Regulamento Técnico Metrológico e de Avaliação da Conformidade (relativo ao “Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos”)

TJMG- Tribunal de Justiça do Estado de Minas

UFSC- Universidade Federal de Santa Catarina

UFMG- Universidade Federal de Minas Gerais

UNDP- *United Nations Development Programme*

—

AU- Área Útil (m^2)

Ape- Área de projeção do edifício (m^2)

Atot- Área total de piso (m^2)

Aenv- Área da envoltória (m^2)

AHS- Ângulo Horizontal de Sombreamento ($^{\circ}$)

AVS- Ângulo Vertical de Sombreamento ($^{\circ}$)

DCI- Densidade de Carga Interna (W/m^2)

DPI- Densidade de Potência de Iluminação

DPI_A- Densidade de Potência de Iluminação Absoluta (W/m^2)

DPI_R- Densidade de Potência de Iluminação Relativa [$(W/m^2)/100lux$]

DPI_{RF}- Densidade de Potência de Iluminação Relativa Final [$(W/m^2)/100lux$]

DPI_{RL}- Densidade de Potência de Iluminação Relativa Limite [$(W/m^2)/100lux$]

DCI- Densidade de Carga Interna (W/m^2)

FA- Fator Altura (A_{pe}/A_{tot})

FF- Fator de Forma (A_{env}/V_{tot})

FS- Fator Solar

IC ou IC_{env}- Indicador de Consumo da envoltória

PAV – Pavimento

PAF_o- Percentual de Área de Abertura na Fachada oeste (%)

PAF_T- Percentual de Área de Abertura na Fachada total (%)

PAZ- Percentual de Abertura Zenital (%)

TBS – Temperatura de Bulbo Seco (°C)

TBU- Temperatura de Bulbo Úmido (°C)

T_n- Temperatura Neutra (°C)

U_{cob}- Transmitância Térmica da Cobertura [$W/(m^2K)$]

U_{par}- Transmitância Térmica das Paredes [$W/(m^2K)$]

V_{tot}- Volume Total da Edificação (m^3)

ZB- Zona Bioclimática

α – ângulo alfa (relativo a AVS) (°)

α – absorptância solar de superfície (%)

β – ângulo beta (relativo a AHS) (°)

γ – ângulo gama (relativo a AVS/AHS) (°)

RESUMO

Instrumentos reguladores de consumo de energia em edifícios são mecanismos importantes para promover a sustentabilidade no ambiente construído. O primeiro instrumento do governo brasileiro data de 2009 e é intitulado “Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos”. Neste Regulamento, o desempenho do edifício é classificado em: envoltória, sistema de iluminação e sistema de condicionamento de ar. O principal objetivo deste trabalho é o de levantar considerações sobre o Regulamento, aplicando-o num projeto de edifício a ser implantado na cidade de Belo Horizonte. A envoltória do prédio e o sistema de iluminação de um de seus ambientes típicos de escritório são analisados pelo método prescritivo do documento e por simulação termo-energética usando os *softwares* *EnergyPlus* e *DesignBuilder*. Foram realizadas análises paramétricas com variações do sistema de fachada envidraçada dupla. Os tipos de vidro sobre a abertura foram alterados, a fachada original foi substituída por alvenaria e foram inseridas proteções solares (brises e prateleiras de luz). As proteções solares foram definidas por dois princípios: um pela combinação de ângulos de sombreamento que gera um Indicador de Consumo mínimo, outro pelo método da Temperatura Neutra (T_n). Além disso, o sistema de fachada original foi simulado de dois modos diferentes. No primeiro, as múltiplas camadas que compõem a fachada - vidro, ar e placa cimentícia - foram representadas por uma superfície única com transmitância térmica equivalente. No segundo, as camadas foram modeladas como zonas térmicas individualizadas, o que permitiu simular com maior precisão os efeitos do vidro no sistema. Partindo da análise prescritiva do Regulamento, a envoltória do edifício obteve a classificação “C” e o sistema de iluminação do ambiente obteve a classificação “B”. Diante destes resultados, foram feitas proposições e avaliados os esforços necessários para obtenção de classificação “A” nestes dois critérios. Na fase de simulação do ambiente, dentre os principais resultados tem-se que o vidro tipo *low-e* de alta transmissão luminosa aumentou o consumo de energia em relação ao vidro de controle solar original, quando instalado sem proteção solar, mas mostrou-se como um dos mais favoráveis ao aproveitamento da iluminação natural. A fachada em alvenaria demonstrou ter desempenho superior à envidraçada, permitindo ainda reduções de até 13% no consumo de energia quando combinada às proteções solares. Finalmente, os resultados da simulação da fachada com transmitância equivalente e com zonas térmicas foram divergentes a ponto de se cogitar a necessidade de outra forma de abordagem deste tipo de sistema envidraçado pelo Regulamento.

Palavras-chave: código de energia em edifícios; simulação de desempenho de edifício; sistema de fachada; dispositivo de proteção solar.

ABSTRACT

Legislation about energy consumption of buildings is an important mechanism of the sustainability promotion for the built environment. The first governmental Brazilian instrument, from 2009 is the “Technical Quality Legislation of the Level of Energy Efficiency of Commercial, Service and Public Buildings, RTQ-C”. It classifies the global performance of buildings through the individual performance of the building envelope, the illumination system and the air conditioning system. The aim of this work is to study this Legislation by applying it to a public building in Belo Horizonte city. The building envelope and its illumination system are analyzed by studying a typical office configuration through the prescriptive method of the RTQ-C and also by thermal-energetic simulation using Energy Plus and Design Builder softwares. Parametrical analysis was carried out of the façade system, compounded partly by double glazing and partly by glazing over a cement plaque. The glass types of the apertures were varied; the glazing and cement plaque part of the façade was substituted by masonry and solar shading devices were introduced in the apertures. The solar protections were defined following two principles: by the better combination of vertical and horizontal angles in order to generate a minimum Consumption Index (IC) according to the prescriptive method of the RTQ-C and by the Neutral Temperature (T_n) Method. Furthermore, the original façade was simulated using two approaches. In the first one, the multiples layers of the façade – glass, air and cement plaque – were represented by a single surface with an equivalent thermal transmittance. In the second one, the layers were modeled as individual thermal zones, which allowed a better precision in obtaining the thermal effect of the glass layer in the façade system. From the prescriptive analysis of the RTQ-C, the envelope of the whole building was classified “C” and the lighting system of the office was classified “B”. From these results, changes in the building were proposed and discussed in order that both could obtain an “A” classification. In the simulation process, the main results showed that low-e glazing with high light transmittance raised the energy consumption if compared to the originally specified sun control glazing, when installed without solar shading devices, but showed to be the system with better natural light admittance. The masonry façade presented a higher performance than the glass-cement one, showing up to 13% less energy consumption when combined with solar shading devices when compared to the façade system originally proposed. Finally, the results of the simulation of the façade using an equivalent transmittance and using thermal zones were so divergent that one has to consider the need of differently approaching this kind of system in the prescriptive method of the RTQ-C.

Key words: building energy code; building performance simulation; façade system; solar protection device.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	A questão energética.....	16
1.2	Energia no Brasil	19
1.3	A proposta do trabalho	23
1.4	Objetivos	23
1.4.1	Geral:	23
1.4.2	Específicos:	24
1.5	Estrutura	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	Instrumentos reguladores de consumo.....	25
2.1.1	Tipos de Instrumentos reguladores de consumo	25
2.1.2	Característica dos códigos.....	29
2.1.3	Levantamento dos Códigos	30
2.2	Regulamento brasileiro de eficiência energética de edifícios	32
2.2.1	Breve histórico e aspectos gerais do Regulamento	32
2.3	Estudo complementar de variáveis	34
2.3.1	Iluminação.....	34
2.3.2	Vidros.....	36
2.3.3	Sistemas de fachada envidraçada	37
2.3.4	Proteções solares	39
2.4	<i>Softwares</i> de simulação de desempenho energético de edifícios	46
2.4.1	EnergyPlus	47
2.4.2	DesignBuilder.....	48
3	METODOLOGIA	49
3.1	Revisão Bibliográfica	50
3.2	Escolha do estudo de caso.....	50
3.2.1	Escolha do edifício	50
3.2.2	Escolha do ambiente	51
3.3	Avaliação de estudo de caso pelo método prescritivo do RTQ: critério envoltória..	51
3.3.1	Descrição da equação de Indicador de Consumo utilizada.....	53
3.3.2	Envoltória original.....	54
3.3.3	Envoltória com brises otimizados pelo IC	55
3.3.4	Envoltória de alvenaria e proteções otimizadas por T_n	56
3.4	Avaliação pelo método prescritivo do RTQ: critério iluminação	58
3.5	Avaliação por simulação computacional	59
3.5.1	Escolha dos softwares	59
3.5.2	Modelagem do ambiente	60
3.5.3	Simulação computacional do desempenho termoenergético dos protótipos	72
3.6	Comparação e discussão dos resultados	72
4	O EDIFÍCIO	73
4.1	O edifício.....	73
4.2	O ambiente em análise	76
4.2.1	Sistema Construtivo.....	77
4.2.2	Sistema de Iluminação	78
4.2.3	Sistema de condicionamento de ar	79
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	80
5.1	Avaliação de estudo de caso pelo método prescritivo do RTQ.....	80
5.1.1	Envoltória.....	80

5.1.2	Sistema de iluminação	86
5.2	Avaliação de estudo de caso por simulação computacional	87
5.2.1	Notas sobre o comportamento do software DesignBuilder	87
5.2.2	Resultados das simulações	91
5.2.2.1	Grupo 1: protótipos sem proteção solar	93
5.2.2.2	Grupo 2: protótipos com proteção solar	98
5.3	Comentários sobre os resultados dos dois métodos de avaliação de desempenho..	107
5.3.1	Envoltória	107
5.3.2	Sistema de iluminação	109
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
	REFERÊNCIAS	117
	APÊNDICE A: Avaliação de estudo de caso pelo método prescritivo do RTQ: Critério	
	Envoltória- Tabelas e desenhos de referência	125
	APÊNDICE B: Avaliação de estudo de caso pelo método prescritivo do RTQ: critério	
	iluminação – tabelas.....	137
	APÊNDICE C: Arquivo de Simulação do Protótipo-Base (“U-equivalente”).....	138
	APÊNDICE D: Resultados gerais das simulações dos protótipos.....	143

LISTA DE FIGURAS

FIG. 1:	Consumo mundial de energia por fonte: dados desde 1980 e projeção até 2030.	18
FIG. 2:	Consumo final de energia: evolução dos Consumos Setoriais no Brasil de 1970 a 2007.	22
FIG. 3:	“Participação percentual das fontes de energia na geração de eletricidade: ano base, cenário Tendencial e cenário Elétrico Sustentável”.	24
FIG. 4:	Compartimentação vertical (fachadas envidraçadas).	41
FIG. 5:	Frequência de ocorrência do AVS (a) e de AHS (b) de edificações comerciais amostradas no Brasil.	43
FIG. 6:	Edificações comerciais por tipo de proteção externa contra insolação - Brasil.	44
FIG. 6a:	Esquema geral da metodologia	50
FIG. 7a:	Etapas para definição gráfica de proteções solares pelo método da Tn.	59
FIG. 7:	Esquema geral dos protótipos com respectivas ramificações.	66
FIG. 8:	Protótipo “Zonas térmicas” destacando em: (a) as multi-zonas térmicas separadas; (b) zonas sobrepostas, preparadas para a simulação; (c) resultado final com renderização para as 16h do dia 15 de janeiro (orientação Oeste)	68
FIG. 9:	Protótipo “U-equivalente” voltado para Oeste em <i>wire frame</i> (a) e renderizada para as 16h de 15 de janeiro (b).	70
FIG. 10:	Corte do ambiente em estudo mostrando em (a) o projeto original e em (b) as alterações que viabilizaram o uso de prateleira de luz (<i>lightshelf</i>).	71
FIG. 11:	Imagens externas das prateleiras para cada orientação com cortes esquemáticos mostrando ângulos (em graus) e dimensões (em cm) das respectivas proteções horizontais.	73
FIG. 12:	Perspectivas do edifício (...).	76
FIG. 13:	Perímetro das plantas de cada pavimento (...).	76
FIG. 14:	Diagrama de Cobertura com hachuras indicativas do sistema construtivo adotado.	77
FIG. 15:	Plantas do pavimento-tipo e do ambiente em análise (...).	78
FIG. 16:	Corte parcial do ambiente em análise (...).	80
FIG. 17:	Máscaras para definição de ângulos de sombreamento AVS e AHS e das respectivas dimensões das proteções segundo o método da Temperatura Neutra para as quatro orientações do edifício.	87
FIG. 18:	Protótipo “Zonas térmicas” visualizado em .dxf (a) e em renderização no <i>DesignBuilder</i> (b).	91
FIG. 19:	Imagem da tela “ <i>Construction</i> ” da zona Vidro Centro (...).	92
FIG. 20:	Rosa-dos-ventos com perímetro do edifício e identificação de fachadas para cálculo de PAFt; cortes e fachadas esquemáticas do edifício.	126

LISTA DE TABELAS, QUADROS E GRÁFICOS.

TAB. 1:	<i>Status</i> do Código de Desempenho Energético de Edifícios de alguns países.	32
TAB. 2:	Propriedades de Vidros para Controle Solar.	38
TAB. 3:	Parâmetros avaliados na equação de Indicador de Consumo segundo Carlo (2008).	54
TAB. 4:	Intervalos dos níveis de eficiência para classificação final da envoltória.	56
TAB. 5:	Planilha com classificações de temperatura do ar externa em função da Temperatura Neutra para Belo Horizonte no período de um ano.	60
TAB. 6:	Dados dos vidros de controle solar para o vidro insulado duplo fornecidos pelo fabricante.	64
TAB. 7:	Respostas estimadas do vidro Silver 20 ao espectro da radiação solar externa.	69
TAB. 8:	Propriedades do Vidro Silver 20 para configuração do vidro como material de <i>construction</i> .	69
TAB. 9:	Valores dos parâmetros e classificações resultantes dos Casos 1, 2 e 3.	82
TAB. 10:	Variações experimentadas em PAFt, FS, AHS e AVS e respectivas classificações alcançadas	83
TAB. 12:	Resultados de avaliação parcial de pré-requisitos com classificação máxima permitida.	84
TAB. 13:	Combinações de características de componentes do sistema de iluminação avaliadas com respectivos níveis de iluminância e classificações segundo o RTQ	88
TAB. 14:	Propriedades dos vidros usados calculadas através do <i>DesignBuilder</i> .	90
TAB. 15:	Parte da planilha gerada pelo DesignBuilder para o Protótipo “Zonas térmicas”, zona Vidro Centro.	91
TAB. 16:	Consumo anual de “Brise TN” sem brises verticais nas Fachadas Norte e Sul	105
TAB. 17:	Dados médios anuais dos protótipos comparados ao de “Alvenaria”	108
TAB. 18:	Áreas de piso por pavimento e área total do edifício	127
QUADRO 1:	Critérios para projeto de proteções solares para aberturas de Edificação Comercial modificado de Pereira e Souza (2008)	58
GRÁFICO 1:	Indicadores de consumo de energia em escritórios de Hong Kong.	29
GRÁFICO 2:	Gráfico para benchmarking de edifícios de escritório dos E.U.A.	29
GRÁFICO 3:	Indicador de Consumo em função de PAFt, FS, AVS e AHS para a edificação do TJMG.	84
GRÁFICO 4:	Resultados médios de consumo de energia total e com iluminação de todos os protótipos do ambiente.	94
GRÁFICO 5:	Resultados médios de ganho de calor pela fachada de todos os protótipos do ambiente.	94
GRÁFICO 6:	Resultados de ganho de calor pela fachada de “U-equivalente” e de “Zonas térmicas”, protótipos construídos em dois modos diferentes.	96
GRÁFICO 7:	Resultados de ganho de calor pela fachada de “U-equivalente”, “Low-e” e de “Comum”, protótipos com variação no tipo de vidro sobre a abertura.	98

GRÁFICO 8:	Ganho de calor pela fachada em cada orientação de “RTQ” e de “RTQ-2”.	101
GRÁFICO 9:	Consumo total e com iluminação em “Brise RTQ-2” e “Brise TN” por orientação.	103
GRÁFICO 10:	Ganho de calor em “Brise RTQ-2” e “Brise TN” por orientação.	104
GRÁFICO 11:	Consumo das Prateleiras de Luz com diferentes tipos de vidros por orientação.	106
GRÁFICO 12:	Ganho de calor pela fachada das Prateleiras de Luz com diferentes tipos de vidros por orientação.	107

1 INTRODUÇÃO

1.1 A questão energética

Os esforços para redução do consumo de energia têm-se destacado como uma das principais medidas em direção à sustentabilidade no ambiente construído.

A crise do petróleo da década de 1970 intensificou a atenção internacional à eficiência no uso da energia, ao evidenciar que as reservas fósseis não seriam eternamente baratas e que seu uso implica prejuízos ao meio ambiente (BRASIL, 2007c).

As relações entre os modelos de uso de energia e os problemas ambientais, tais como poluição do ar urbano, acidificação e aquecimento global, foram claramente documentados no final do século XX (UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME, 2000). Em 2007, os relatórios do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007) sobre estes problemas foram difundidos através da mídia junto à sociedade civil, fomentando ainda mais o interesse público sobre a questão energética.

As preocupações em relação à energia se justificam, visto que as projeções até 2030 indicam que o consumo crescerá expressivamente, com as fontes não-renováveis e poluentes permanecendo como base para atendimento da demanda (FIG. 1) (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2007a).

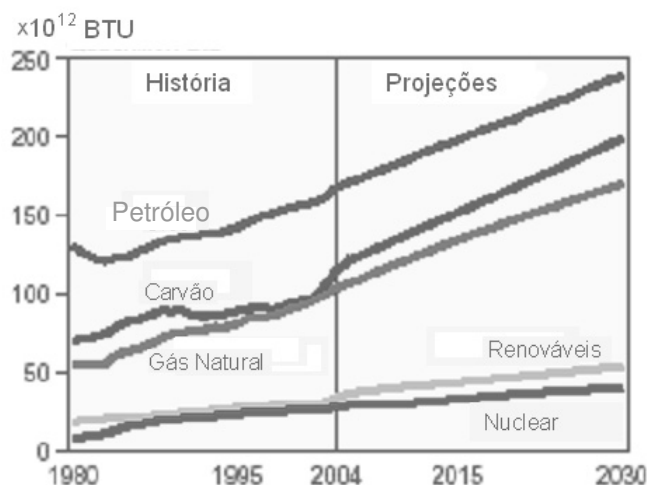


FIG. 1: Consumo mundial de energia por fonte: dados desde 1980 e projeção até 2030. Fonte: adaptado de U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (2007a).

Considerando-se apenas a energia elétrica, estima-se que da população mundial de cerca de 6 bilhões de pessoas [existente no ano 2000], entre 1,5 a 2 bilhões ainda não têm acesso à esta fonte e que o crescimento mais acelerado da demanda é observado nos países em desenvolvimento (UNDP, 2000).

Neste contexto, percebe-se que a energia pode e deve ser considerada como uma ferramenta para o desenvolvimento humano sustentável, na medida em que interfere em questões fundamentais como economia, pobreza, segurança alimentar e degradação ambiental. Para tanto, deve-se desdobrar em serviços que priorizem em grau crescente o uso de energia renovável, de combustíveis mais limpos e da eficiência energética. A implementação destes serviços, por sua vez, demanda a disponibilidade de tecnologia, a criação de mecanismos financeiros inovadores e comprometimento político (UNDP, 2000).

Por esta via, foram intensificadas nas últimas décadas as pesquisas por fontes de energia menos poluentes, destacando-se a energia eólica, solar, hidráulica e de biomassa. Além da diversificação da matriz energética, países como Alemanha, E.U.A. e Japão aumentaram o investimento no uso de tecnologias à base destas fontes, adotando também medidas para diminuição do consumo e racionalização do uso. Outros países, notadamente os europeus e os E.U.A., para cobrir despesas pela melhoria da eficiência energética de produtos ou serviços, têm aliado incentivos econômicos à programas de transferência tecnológica e à campanhas publicitárias com a finalidade de educar os consumidores a respeito do melhor aproveitamento da energia. Dentre os incentivos econômicos citam-se, por exemplo, os "fundos, subsídios, reduções de impostos, empréstimos, financiamento por terceiros, contratos de desempenho energético, garantia de contratos de economias de energia, subcontratação de energia e outros contratos afins disponibilizados no mercado dos serviços energéticos por organismos públicos ou privados" (PARLAMENTO EUROPEU, 2002).

Diversos governos passaram a exigir em seus territórios as "medidas de eficiência energética", entendidas como formas de "uso de equipamentos e hábitos que provocam menor uso da energia para auferir o mesmo serviço prestado" (BRASIL, 2007c, p.13).

Estas medidas de eficiência no consumo de energia aplicadas na construção civil deram origem aos edifícios "eficientes". Segundo Lamberts *et. al* (1997) o termo indica um edifício

que, quando comparado a outro, oferece as mesmas condições ambientais necessárias ao seu uso porém com o consumo¹ de energia inferior.

A aplicação destas medidas é importante, tendo-se em vista a estimativa de que os edifícios são responsáveis por 40% do consumo da energia produzida no mundo (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2008). E a exigência delas por parte de governos é fundamental, pois como o próprio governo brasileiro admite, “os mecanismos de mercado não são capazes de introduzir a eficiência energética no padrão desejado pela sociedade”, sendo necessário, desta forma, “políticas de incentivo à eficiência energética que minimizem as barreiras e as imperfeições de mercado” (BRASIL, 2007c, p.62).

Depois do primeiro instrumento legal que promoveu a eficiência energética de edificações na década de 1960, este tipo de mecanismo vem se difundindo a ponto de ser encontrado em quase todos os países no início do século XXI (THE DERINGER GROUP, 2005).

Dentre os efeitos relacionados a tais instrumentos, considera-se que eles contribuem para:

- reduzir as emissões de poluentes atmosféricos advindos da produção de energia a partir de combustíveis fósseis;
- estimular a ocorrência de avanços tecnológicos na área de eficiência energética aplicada à construção civil, aumentando a qualidade e a competitividade de equipamentos e sistemas construtivos;
- estimular a adoção de formas de assentamento urbano mais eficientes, com produção energética local e com aproveitamento integrado de energia;
- melhorar a eficiência da economia do país ao reduzir necessidade de investimentos em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Por um lado, a energia não desperdiçada é disponibilizada para a produção de bens na indústria; por outro, os recursos econômicos poupados podem ser revertidos para outros projetos – por exemplo, os sociais;

¹ Entende-se numa análise de ciclo de vida energético do edifício que o consumo é maior na sua etapa operacional (de uso, manutenção e reforma), mas ocorre também nas etapas pré-operacional (de fabricação de materiais, transporte, execução da obra) e na pós-operacional (demolição e reciclagem) (TAVARES e LAMBERTS, 2005). Neste trabalho o termo consumo diz respeito à fase de uso do edifício.

- contribuir para a sustentabilidade energética do país diante do eventual crescimento da demanda.

O sucesso nos resultados destes instrumentos depende de três passos: (1) Desenvolvimento, (2) Implementação e (3) Administração/Execução dos mesmos (HUANG *et al*, 2003).

Como exemplo de resultado favorável, estima-se que no estado americano da Califórnia, um código tenha permitido uma economia de 36 bilhões de dólares em custos com eletricidade e gás natural no período que compreendeu cerca de duas décadas desde sua implantação, em 1978 (GOULART, 2005a). Pela perspectiva de proprietários e gerenciadores de edifícios, uma pesquisa da Agência de Proteção Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA) também comprova que os investimentos em eficiência energética são lucrativos. No contexto norte-americano, a pesquisa estimou que: para edifícios de escritórios, a cada U\$1 investido há uma valorização do patrimônio de U\$2,5 a U\$3,75; para hospitais, a cada U\$1 economizado são gerados U\$20 em novas receitas; para supermercados, a cada 10% de redução no consumo as margens de lucro são aumentadas em 15% (ASHRAE, 2008).

No Brasil, segundo o Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2008a) os edifícios residenciais, comerciais e públicos consomem 14,7% da energia produzida. Se considerada a energia elétrica, este percentual sobe para cerca de 45%.

De acordo com Romero e Phillipi (2000), 25% da energia elétrica do setor de edifícios pode ser conservada com a implantação de regulamentos energéticos nos níveis municipais, estaduais ou federal.

Com o objetivo de contribuir para esta conservação, foi proposto em 2009 o primeiro instrumento federal para edifícios. Intitulado “Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos” (BRASIL, 2009), que é o objeto central deste estudo.

1.2 Energia no Brasil

O Brasil tem uma característica peculiar porque uma parcela significativa da energia interna ofertada tem origem em fontes renováveis. Enquanto nos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) esta taxa é de 6,7% e no mundo é de 12,9%, conforme registro de 2007, nacionalmente ela é de cerca de 45,9%. Destes, 15,9% são

de produtos da cana-de-açúcar, resultado do programa Proálcool iniciado com o decreto 76.593 de 1975. A dependência do petróleo internacional foi reduzida desde a segunda crise mundial deste recurso, em 1979. Passou de 85% neste ano à auto-suficiência em 2005, com grandes investimentos na Petrobrás. A dependência de importação de energia passou de 28% a 46% na década de 70, para cerca de 8% em 2007. Entre 1970 e 2000, o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) superou o da Oferta Interna de Energia em 0,5%. O petróleo e seus derivados predominam na composição da matriz energética, participando com 37,6% na Oferta Interna de Energia. Entretanto, a energia elétrica é predominantemente produzida por fonte hidráulica, considerada pouco poluente (BRASIL, 2008a).

O parque hidráulico teve grande desenvolvimento desde 1950 (BRASIL, 2008a), e o país tem o maior potencial hidráulico do mundo. Estima-se que 70% do potencial que ainda pode ser explorado encontra-se nas bacias do Amazonas e do Tocantins/Araguaia, visto que nas demais regiões o potencial está quase totalmente aproveitado. Entretanto, há fortes entraves judiciais e ambientais para expansão da matriz nestas regiões, os quais estão especialmente relacionados aos impactos sócio-ambientais provocados pela inundação de grandes áreas (BRASIL, 200-).

Analisando-se o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2008, observa-se que o consumo tem aumentado de maneira expressiva nas últimas décadas (FIG. 2). Na composição setorial do consumo de eletricidade, tem-se que 46,7% é destinada ao setor industrial (BRASIL, 2008a). No campo das edificações o setor residencial é o maior consumidor, com 22,1%. A soma dos setores comercial (14,2%) e público (8,2%) se aproxima do consumo residencial.

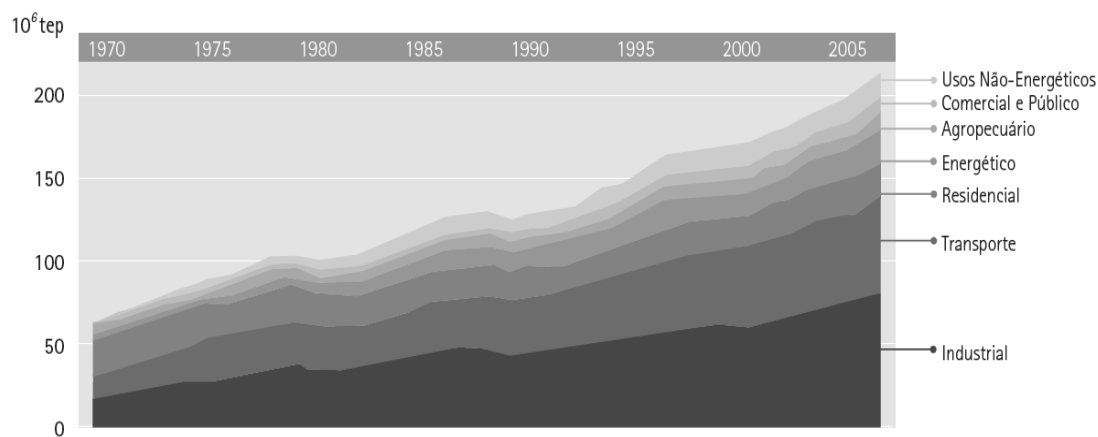


FIG. 2: Consumo final de energia: evolução dos Consumos Setoriais no Brasil de 1970 a 2007. Fonte: BEN (BRASIL, 2008a).

Nos edifícios, este crescimento acompanha o crescimento do Produto Interno Bruto (LAMBERTS *et al*, 2007). Como o crescimento econômico programado para o país depende da energia disponibilizada, entende-se que o investimento no setor e a diversificação da matriz energética devam ser estratégias para o atendimento da demanda.

A FIG. 3 mostra os resultados de uma pesquisa financiada por organização não-governamental que retrata a participação percentual de energia por diversas fontes no Brasil em 2004 (WORLDWIDE FUND FOR NATURE-BRASIL, 2007). Também estima tal participação para 2020 de acordo com dois cenários. O primeiro cenário é criado a partir da análise de tendência de investimentos governamentais, sendo denominado “Cenário Tendencial”. O segundo inclui a aplicação de medidas de uso eficiente aliadas ao crescimento do investimento em fontes renováveis, denominado “Cenário Elétrico Sustentável”. Em ambos o potencial de produção de energia solar fotovoltaica não é expressivo. Observa-se que foi incluído nos estudos o aproveitamento da energia solar térmica para substituir o chuveiro elétrico no aquecimento de água. Esta é uma estratégia importante, visto que o uso do chuveiro é responsável pelo consumo de cerca de 5% da eletricidade produzida e por 18% do pico de demanda no sistema elétrico nacional (CIDADES SOLARES, 2008).

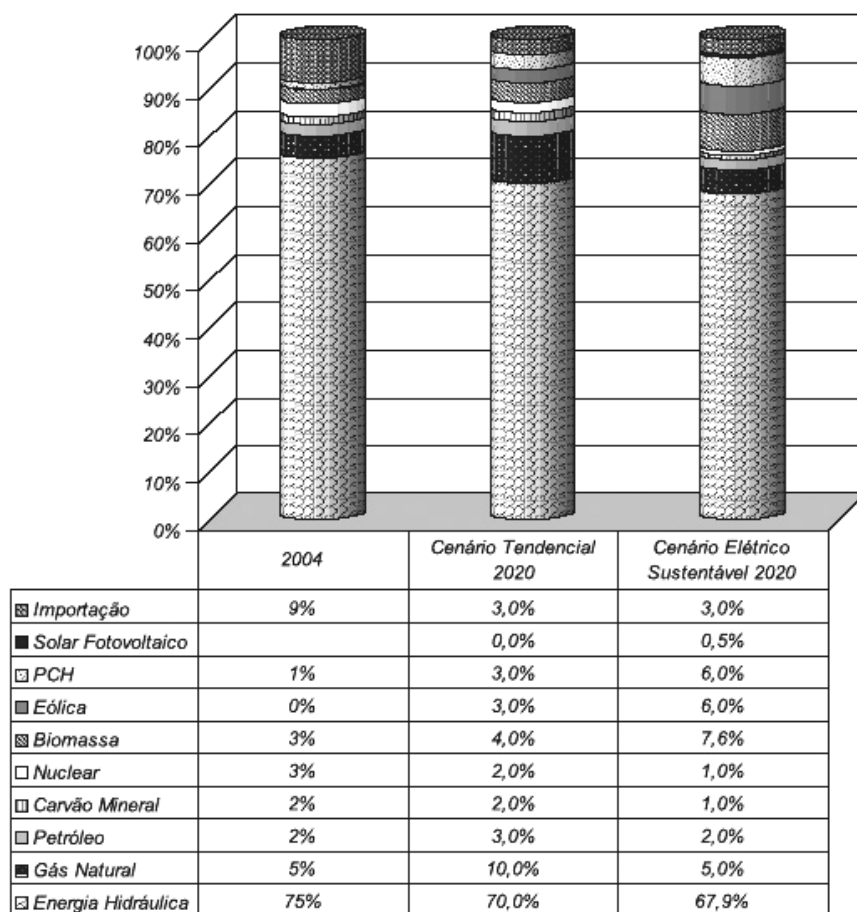


FIG. 3: “Participação percentual das fontes de energia na geração de eletricidade: ano base, cenário Tendencial e cenário Elétrico Sustentável”. Fonte: WWF, 2007.

No Brasil, por anos a questão energética foi regulada sem interferências governamentais legislativas quanto a níveis de consumo e formas de apropriação adequadas de energia no setor da construção civil.

No entanto, em 2001 uma crise de fornecimento de energia elétrica afetou quase todo o território nacional. Com a perspectiva de novos racionamentos devido ao crescimento da produção industrial, o poder público se viu pressionado a criar medidas que promovessem a efficientização do uso da energia.

Foi então lançada a Lei nº 10.295, que trata da Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Com esta lei, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) que existe desde 1985 ganhou impulso. Novas vertentes foram implementadas, dentre elas o PROCEL- Edifica, voltado para edificações. Foi formado o Comitê Gestor de Indicadores de Nível de Eficiência Energética, que desenvolveu o “Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos”.

As discussões para elaboração do Regulamento se iniciaram em 2004. A primeira versão passou por consulta pública em 2007. Em 27 de fevereiro de 2009 ela foi oficializada através do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior com a portaria n.º 53, assinada pelo presidente do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). Dentro do sistema do INMETRO, entrou em vigor como um Regulamento Técnico Metrológico e de Avaliação da Conformidade (RTQ).

Em princípio, o Regulamento seria obrigatório após cinco anos de sua entrada em vigor (CARLO, 2008), mas esta data ainda será definida (BRASIL, 2009).

O instrumento atribui cinco níveis de eficiência para edifícios, os quais variam de “A” a “E”, sendo este último considerado o menor índice de eficiência. Para tanto, avalia os seguintes aspectos: o sistema de iluminação, o sistema de condicionamento de ar e envoltória. O critério “envoltória” avalia as vedações externas dos edifícios (fachadas e cobertura); o critério “sistema de iluminação” considera basicamente a eficiência de luminárias, lâmpadas e controle de circuitos elétricos; o “sistema de condicionamento de ar” também tem o foco em equipamentos eficientes, considerando o adequado dimensionamento e manutenção correta dos mesmos.

1.3 A proposta do trabalho

O presente trabalho propõe a aplicação e avaliação dos critérios de avaliação de envoltória e do sistema de iluminação do “Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos”, de agora em diante referenciado simplesmente como Regulamento ou RTQ, em um projeto de edificação de grande porte com condicionamento predominantemente artificial.

1.4 Objetivos

1.4.1 Geral:

Através de um estudo de caso objetivou-se levantar considerações sobre os dois métodos de análise presentes no Regulamento que são voltados para o critério envoltória e sistema de iluminação de edifícios.

1.4.2 Específicos:

- Avaliar o edifício pelo método prescritivo e um de seus ambientes-padrão por simulação;
- Discutir o método de avaliação da envoltória a partir da forma de abordagem do comportamento térmico do sistema de fachada duplo envidraçado do estudo de caso;
- Avaliar a influência de proteções solares e de vidros na classificação da envoltória e no consumo de energia de um de seus ambientes;
- Avaliar o desempenho de proteções solares desenvolvidas pelo método da Temperatura Neutra, diferenciando o desempenho de brises e de prateleiras de luz.

1.5 Estrutura

Neste Capítulo 1 o contexto do trabalho foi introduzido, sua proposta foi apresentada e seus objetivos foram explicitados. O Capítulo 2 traz numa Revisão Bibliográfica alguns dos instrumentos governamentais reguladores de consumo em edifícios, o Regulamento brasileiro e os dois *softwares* utilizados neste estudo, o *EnergyPlus* e o *DesignBuilder*. No Capítulo 3 o edifício e o ambiente escolhidos como estudo de caso são descritos. No Capítulo 4, é detalhada a metodologia utilizada, pontuando a aplicação do método prescritivo do Regulamento para avaliar o edifício tanto em seu formato original quanto com algumas alterações construtivas nele propostas. O Capítulo 4 também apresenta o processo de simulações no ambiente em estudo fazendo-se variações em seu sistema de fachada para obter saídas de consumo anual de energia elétrica, consumo com iluminação artificial e ganho de calor pela fachada. No Capítulo 5, os resultados são expostos e discutidos. No Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais do trabalho, bem como suas limitações, além de sugestões para trabalhos futuros. Seguem-se a estes as Referências Bibliográficas e Apêndices citados no texto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Instrumentos reguladores de consumo

2.1.1 *Tipos de Instrumentos reguladores de consumo*

A primeira iniciativa governamental para reduzir o consumo de energia em edifícios surgiu na Suécia, em 1960 (THE DERINGER GROUP, 2005). Até a crise do petróleo em 1973, somente poucos países na Europa possuíam exigências quanto ao aspecto energético dos edifícios; geralmente estas exigências diziam respeito apenas ao isolamento térmico. Depois da crise, ampliou-se o uso destes instrumentos (DERINGER, 2001).

Eles existem na forma de códigos, critérios, guias, normas, leis, protocolos, provisões, regras, diretivas, recomendações, requerimentos, regulamentos ou regulamentações, classificações (*ratings*, ou ranques), *benchmarkings* (estabelecimento de exemplos), certificações, sistemas de etiquetagem. Janda e Busch (1994) *apud* Signor (1999), Signor (1999), Office of the Australian Building Codes (2000), Hui (2003), The Deringer Group (2005), Goulart (2005a, 2005b), The Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate (2006), Hong *et al.* (2007) e International Energy Agency (2008) realizaram levantamentos a respeito.

A abrangência destes instrumentos pode ser local, nacional, regional, internacional e o significado dos termos pode variar entre países. Destacam-se alguns.

De acordo com Deringer (2001), os códigos são uma coleção de exigências mínimas associadas a procedimentos de conformidade que fazem parte de uma lei. As normas são semelhantes aos códigos, porém são de aplicação voluntária, desenvolvidas por um grupo de profissionais ou por indústria e baseiam-se em consenso. As diretrizes são menos exigentes que as anteriores e não são obrigatórias; funcionam como fonte de informação e podem conter orientações ou requisitos mínimos. As classificações (*ratings*) são normas e diretrizes com um sistema de pontuação incluído.

No contexto da União Européia existe Regulamento, Diretiva, Decisão, Recomendação e Parecer. Tanto o Regulamento quanto a Diretiva são obrigatórios. Mas, enquanto o primeiro é diretamente aplicável a cada Estado-membro, o segundo necessita de uma transposição para o

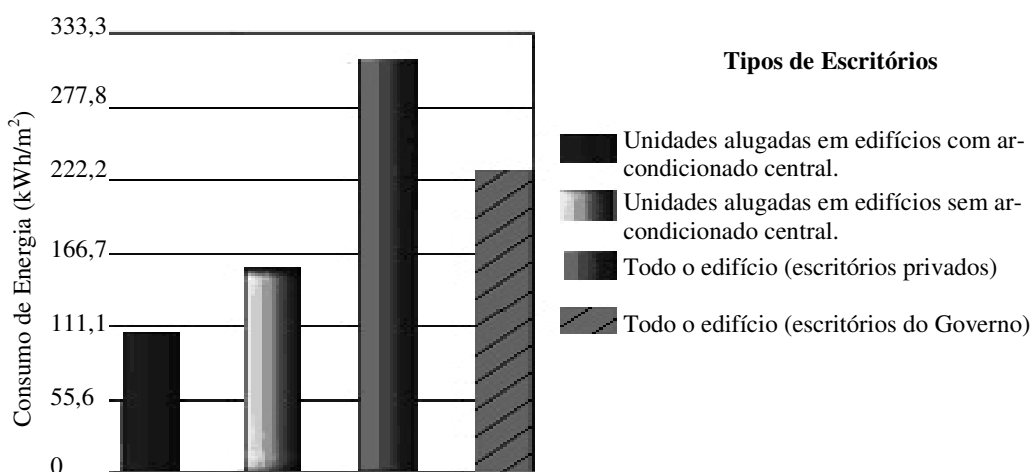
quadro jurídico de cada nação, permitindo que ela escolha a forma e os meios para alcançar o objetivo proposto. Além disto, a Diretiva pode se dirigir a uma ou a várias nações. A Decisão é obrigatória apenas para os destinatários explicitados. A Recomendação e o Parecer não são obrigatórios (COMUNIDADES EUROPÉIAS, 2007).

No contexto brasileiro, Goulart (2005a) cita o “regulamento técnico” como o instrumento que, fazendo referência ou não a alguma norma, “estabelece requisitos técnicos obrigatórios de produtos, serviços ou processos, (...) além de procedimentos para avaliação da conformidade, como certificação”.

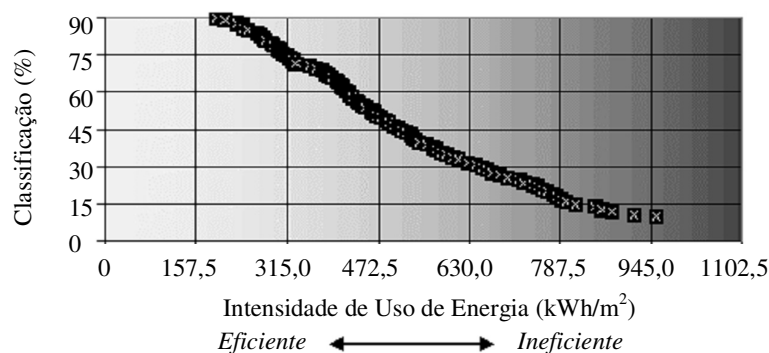
Sobre certificações, pode-se dizer que associações civis podem criá-las e concedê-las a partir de requisitos definidos por elas próprias, sem força legal. Segundo Silva *et al.* (2003a, 2003b), os principais métodos independentes de avaliação de impacto ambiental de edifícios que estão vinculados a um esquema de certificação (BREAAM, HK-BEAM, LEEDTM, por exemplo) consideram a questão energética como um indicador de sustentabilidade. No entanto, como “reflexos de práticas construtivas e de projeto, de climas, de estados do estoque construído, de prioridades de regulamentações e do mercado; de mudanças (no mercado) que se deseja encorajar; e da receptividade dos mercados à introdução dos métodos” (SILVA *et al.*, 2003a), os indicadores assumem proporções diferenciadas em cada um. À época do estudo, no HK-BEAM, o critério energético respondia por 35,6% do total dos créditos ambientais distribuídos. Já segundo o Green Building Council-Brasil (2009), na versão 3.0 de 2009 da certificação LEED-NCTM, a qual é voltada para construções brasileiras novas, o critério energético terá maior peso no seu sistema de pontuação, correspondendo a 32% do total de créditos.

No *energy benchmarking*, o desempenho do edifício é classificado conforme o critério “consumo de energia”. O *benchmark*, valor de referência a ser alcançado, pode ser estabelecido através de uma extensa base de dados de uso de energia que são medidos ou estimados através de simulações. Esta base de dados pode ser usada em comparações entre edifícios existentes ou com resultados de simulações nos casos de edifícios novos (ASHRAE, 2008). Ela tende a caracterizar uma realidade local, podendo não ser adequada para comparações entre edifícios de regiões distintas porque o padrão de consumo varia de acordo com o setor, com o clima, com a tecnologia empregada, etc. Mesmo para edifícios localizados em regiões próximas e com características semelhantes, geralmente é necessário adequar os dados através de processo estatístico para que as comparações sejam mais adequadas: no caso

de escritórios, é indicado haver normalização envolvendo número de equipamentos, densidade de ocupação, horas de operação, dentre outros fatores relevantes no consumo. O GRAF. 1 apresenta indicadores de consumo médio anual de energia em edifícios de escritórios (em kWh/m²) do governo de Hong Kong, que foram usados para subsidiar projetos de *benchmarks* locais. O GRAF. 2 traz uma curva para *benchmarking* também de edifícios de escritório, porém dos E.U.A. Este último foi desenvolvido pelo Oak Ridge National Laboratory a partir do tratamento de dados de intensidades de uso de energia (equivalente ao uso total de energia no edifício por sua área, expresso em kWh/m²) de edifícios avaliados em 2003. Para uma dada intensidade de uso no eixo x, o eixo y indica o percentual de edifícios amostrados que são menos eficientes; pelo eixo x é possível avaliar se o edifício tende à eficiência ou à ineficiência. Concluindo, destaca-se que um dos mais famosos sistemas de classificação por *benchmark* está relacionado ao programa *EnergyStar*, surgido nos E.U.A., e que a Califórnia possui uma base de dados própria chamada Cal-Arch.



GRAF. 1: Indicadores de consumo de energia em escritórios de Hong Kong. Fonte: adaptado de GovHK (2008).



GRAF. 2: Gráfico para *benchmarking* de edifícios de escritório dos E.U.A. Fonte: adaptado de Oak Ridge National Laboratory (200-).

No Brasil, certificação, etiquetagem, ensaio, inspeção e declaração da conformidade pelo fornecedor são as cinco formas básicas para se avaliar a conformidade de um produto a certos requisitos dentro do Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Sinmetro)² (BRASIL, 2007a e 2007b). Detalha-se os dois primeiros, visto que as terminologias “certificação” e “etiquetagem” podem ser encontradas aplicadas a edifícios:

- Certificação - mecanismo no qual uma organização independente executa avaliações de características de uma amostra de um produto, processo ou serviço. Pode ser compulsória ou voluntária, dependendo do risco que o item avaliado oferece à saúde e à segurança dos cidadãos.
- Etiquetagem - estratégia para informar ao consumidor uma característica identificada do produto. Se for associada a metas de desempenho, pode incentivar o aperfeiçoamento do produto.

No Brasil há ainda um selo cedido apenas aos produtos mais eficientes da categoria, o Selo PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica). Há também um modelo de etiqueta para indicar a eficiência energética de equipamentos e aparelhos através de uma escala de cores associadas a letras do alfabeto (BRASIL, 2007a). Etiqueta semelhante e de mesma finalidade encontra-se em outros países, o que demonstra o interesse na padronização e difusão da informação sobre desempenho energético desses produtos no campo do comércio internacional.

Em edifícios, acredita-se que a exposição pública das características de desempenho energético seja um fator relevante para as transações de compra, venda ou financiamento de uma propriedade; aqueles de alto consumo e alto custo de operação energética podem ser percebidos pelo mercado como sendo de menor valor (ASHRAE, 2008). Por isto, a diretiva da UE determina que edifícios com determinados atributos devam afixar “em posição de destaque, claramente visível pelo público em geral, um certificado de desempenho energético” com 10 anos no máximo de validade. Determina também que no momento “da construção, da venda ou do arrendamento de um edifício, seja fornecido um certificado de desempenho energético ao proprietário ou por este ao potencial comprador ou arrendatário”

² O Sinmetro é um sistema constituído por entidades públicas e privadas que exercem atividades relacionadas com a metrologia, normalização, qualidade industrial e avaliação da conformidade. O Inmetro é o único organismo acreditador reconhecido pelo Sinmetro e internacionalmente acreditado como tal (BRASIL, 2007a).

(EURLEX, 2007). Alguns destes certificados, como o apresentado em ASHRAE (2008), assemelham-se às etiquetas em escala de cores e letras para produtos.

Apesar das diferenças conceituais existentes entre os termos norma e código, neste trabalho o termo código é usado para descrever os dois instrumentos.

2.1.2 Característica dos códigos

Cada código possui características próprias, mas há semelhanças entre eles. A estrutura envoltória/ iluminação/ condicionamento artificial do ar associada a um zoneamento climático do país é encontrada em vários. Cita-se, por exemplo, o código do Paquistão (GOVERNMENT OF PAKISTAN, 1990); o *International Energy Conservation Code*, dos Estados Unidos (INTERNATIONAL CODE COUNCIL, 2003); os códigos do Egito (HUANG *et al.*, 2003) e da Índia (BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY, 2006)³; o do Japão (ASIA BUSINESS COUNCIL, 2007).

Geralmente os códigos de desempenho energético são divididos em edifícios residenciais e não-residenciais. Em alguns países eles são de adesão voluntária, com ou sem incentivos, e só depois de certo tempo de adaptação pública se tornam obrigatórios (THE DERINGER GROUP, 2005).

Podem ser um documento específico ou serem incorporados a outros instrumentos, como é o caso do Reino Unido, onde o código de eficiência energética faz parte do Código de Obras (chamado de “Parte L”) e, desde 2008, é previsto para ser referência para o Código para Residências Sustentáveis (COMMUNITIES AND LOCAL GOVERNMENT, 2007).

Alguns atingem edifícios novos, em ampliação ou reforma; outros são retroativos a edifícios já construídos. Por vezes se voltam apenas para edifícios de grandes áreas e/ou que consomem acima de determinada potência. Podem incluir um indicador de emissão de CO₂, associando diretamente o consumo energético do edifício à produção deste gás. É com estas características que são orientados os códigos dos países da União Europeia (PARLAMENTO EUROPEU, 2002).

3 Não foi possível o acesso ao código destes dois países, apenas aos projetos que os embasaram.

Em geral os códigos adotam métodos de prescrição, permutação e desempenho. No método de prescrição são estabelecidos requisitos mínimos de desempenho para cada parte do edifício e para cada um dos seus principais sistemas e/ou equipamentos. No método de permutação, valores de parâmetros são fixados para cada parte do edifício, mas uma troca pode ser feita de modo que a adoção de piores parâmetros sejam compensados pela adoção de parâmetros melhores em outras situações. No método de desempenho, os requisitos são baseados em uma avaliação global do consumo de energia, de consumo de combustíveis fósseis ou da quantidade de emissões de gases relacionados ao efeito estufa (ASHRAE, 2008). Os dois últimos métodos podem comparar o projeto em avaliação com um projeto de referência, feito segundo determinadas prescrições (IEA, 2008) e geralmente demandam o uso de ferramentas computacionais para se obter estimativas de consumo energético do edifício, de seus ambientes e/ou de seus sistemas.

2.1.3 Levantamento dos Códigos

No final dos anos 90, o Lawrence Berkeley National Laboratory (1999) mapeou a situação mundial dos códigos de desempenho energético de edifícios. Até então, apenas 22 países tinham códigos de aplicação obrigatória, três possuíam códigos de adesão voluntária e outros iniciavam projetos para desenvolvê-los. Praticamente todos os países nestas condições ficavam no hemisfério norte ou na Oceania. Mais tarde, The Deringer Group (2005) fez um levantamento do *status* dos códigos em mais de 60 países, organizando as características de 54 deles como está indicado na TAB. 1.

TAB. 1: *Status* do Código de Desempenho Energético de Edifícios de alguns países.

País	Código		Política de Adesão		Programa de Implementação
	Comercial	Residencial	Comercial	Residencial	
Suécia	Sim (desde 1960)		Sim		Sim
Estados Unidos	Sim (desde 1975)	Sim	Sim (mista)	Sim	
Rússia	Sim (desde 1979)		Sim		
Singapura	Sim (desde 1982)		Sim (obrigatória)		Sim
Israel	Sim (desde 2005)		Sim (voluntária)		
Colômbia	Proposto				
Arábia Saudita	Em desenvolvimento				
Emirados Árabes Unidos		Sim (apenas sobre isolamento térmico)		Sim	

Fonte: adaptado de The Deringer Group (2005).

Dos países que constam na tabela, 48 possuíam um código direcionado a edificações comerciais e cinco criaram um código para residenciais. Em 35 deles foi desenvolvida alguma política de adesão voluntária, compulsória ou mista e 17 executaram algum programa de implementação.

Dentre os códigos internacionais, destaca-se a Diretiva Européia de Desempenho de Edifícios (EBPD 2002/91/EC) (PARLAMENTO EUROPEU, 2002). Este documento traz diretrizes para que cada país-membro da União Européia (UE) faça seu próprio conjunto de códigos. Com isto, a UE pretende reduzir a dependência de gás e petróleo de exterior e reduzir a emissão de gases que contribuem para o efeito estufa (EURLEX, 2007). Estabelece que os métodos de cálculo de desempenho devam variar conforme o “tipo, dimensão e finalidade” de uso do edifício. No mínimo devem incluir características térmicas de envoltórias e de divisões internas; avaliação das condições de clima interno; sistemas de aquecimento de ar e de água; sistemas de ar-condicionado; aquecimento solar passivo; iluminação artificial fixa; posição e orientação dos edifícios; ventilação artificial e natural; proteção solar. Onde relevante, devem tratar também de sistemas solares ativos; sistemas de aquecimento e eletricidade com fonte renovável e co-geração; iluminação natural; sistemas urbanos integrados de aquecimento ou arrefecimento. Permite que “monumentos históricos, locais de culto, edifícios temporários, edifícios agrícolas e estâncias de veraneio” não obedeçam aos requisitos mínimos (EUROPEAN COMMISSION, 2007).

Relevantes também são os códigos residenciais e comerciais dos E.U.A. Goulart (2005b) apresenta tabelas com o histórico de evolução dos mesmos. Destaca-se o californiano *Title 24*; o *Model Energy Code* (MEC); o *International Energy Conservation Code* (IECC); o *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings* (tratado como Standard 90.1). O *Title 24* divide o clima do estado em zonas e as edificações por atividades realizadas. O *Model Energy Code* (MEC) é voltado para edifícios residenciais e comerciais novos e ampliações de existentes. Contém critérios para componentes construtivas, fundação, sistema de iluminação e de ar condicionado de acordo com o clima. A partir de 1998 o MEC foi alterado e convertido para o *International Energy Conservation Code* (IECC). Foram incluídas variáveis como coeficiente de sombreamento, ganho de calor interno, fatores de perda pelo sistema de distribuição e infiltração de ar, sendo acrescidas ainda prescrições para o isolamento de clarabóias. O IECC é revisto periodicamente. Em 1989, a ASHRAE lançou a Standard 90.1 – *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*, norma

para edificações em geral, excetuando-se as residenciais de poucos pavimentos. Em 1999 a Standard 90.1 foi reformulada. Abandonou um método de avaliação baseado no valor de OTTV (*Overall Thermal Transmittance Value*), que considera a transmissão de calor pela envoltória em W/m^2 . Passou a utilizar métodos prescritivos, de compensação (*trade off*) e por simulação. A norma é revista periodicamente, sendo que da versão de 1989 até a de 2004 aborda a envoltória, iluminação artificial, sistemas de ar condicionado, aquecimento de água, motores e equipamentos, balizada por fatores climáticos. Aspectos da Standard 90.1 influenciaram códigos de países como Hong Kong, Jamaica, Arábia Saudita, Singapura, Tailândia, Filipinas, Malásia (JANDA e BUSCH, 1994, *apud* SIGNOR, 1999), Egito e Brasil.

2.2 Regulamento brasileiro de eficiência energética de edifícios

2.2.1 Breve histórico e aspectos gerais do Regulamento

No Brasil entrou em vigor em 2009 o “Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos” (BRASIL, 2009), aqui abreviado como RTQ. Ele resulta do Plano de Ação para Eficiência Energética em Edificações do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL-EDIFICA), estabelecido em seis linhas: arquitetura bioclimática, indicadores referenciais para edificações, certificação de materiais e equipamentos, desenvolvimento de regulamentação e legislação, remoção de barreiras à conservação da energia e educação (BRASIL, 2003). O desenvolvimento do RTQ é de responsabilidade do LABEEE da Universidade Federal de Santa Catarina a partir de convênio firmado com a Eletrobrás.

Entre setembro de 2004 e setembro de 2006, uma primeira versão do documento foi elaborada pelo LABEEE. Seguiram-se discussões em 2006 na Secretaria Técnica do Ministério das Minas e Energia, as quais foram submetidas ao Grupo Técnico (GT) de Edificações do mesmo Ministério. O documento aprovado por este GT foi enviado para aprovação do Comitê Gestor de Índices e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE). Seu conteúdo foi então submetido à consulta pública e sofreu alterações em 2007 (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 200-). A versão final foi lançada em 2009, vinculada à estrutura de avaliação do INMETRO.

O RTQ é aplicável a edifícios novos ou existentes, com área útil acima de 500m² e/ou com tensão de abastecimento superior ou igual a 2,3 kV. Incorpora um método prescritivo e um de desempenho. O método prescritivo classifica a eficiência da envoltória, do sistema de iluminação e do sistema de condicionamento de ar do edifício em cinco níveis, de A (mais eficiente, equivalente a 5 pontos) a E (menos eficiente, equivalente a 1 ponto). Com este dado, relaciona numa equação a pontuação recebida por cada item, a área de piso do edifício e a parcela desta que é condicionada artificialmente. Associa também o peso de cada item, sendo o da envoltória de 30%, do sistema de iluminação também 30% e do sistema de condicionamento de ar de 40% (BRASIL, 2009). O peso maior para os sistemas de ar condicionado deve-se ao maior impacto que estes sistemas usualmente causam no consumo energético desagregado dos edifícios.

O texto do Regulamento é estruturado em seis capítulos. No primeiro, traz definições, símbolos e unidades. No segundo, trata dos objetivos do regulamento; dos procedimentos de avaliação; da pontuação às iniciativas em relação à água, fontes renováveis, cogeração e técnicas que aumentem a eficiência da edificação; finalmente, discorre sobre os pré-requisitos gerais. No terceiro, aborda a envoltória. Enfoca a transmitância térmica, cores e absorvância dos materiais, além de parâmetros para edifícios com iluminação zenital. Para cálculo de desempenho da envoltória, oferece equações para obtenção de um Indicador de Consumo (IC), que variam conforme o zoneamento bioclimático em que o país é dividido. No quarto capítulo, trata de iluminação artificial. Envolve a eficiência de sistemas e controles, condições para divisão de circuitos, aproveitamento da iluminação natural. Para a classificação do sistema de iluminação, inclui cálculos de Densidade de Potência de Iluminação e do nível de iluminância de projeto. No quinto capítulo trata de sistema de condicionamento do ar. Determina a eficiência mínima e as características de equipamentos e sistemas condicionadores de ar de acordo com o nível de desempenho desejado. No capítulo seis, detalha a forma de avaliação de desempenho através de simulação computacional de edifícios condicionados artificialmente ou naturalmente ventilados.

As equações de IC foram feitas a partir de resultados de simulações computacionais utilizando técnicas de regressão. Resultam da simulação de tipologias construtivas de edificações nacionais de uso comercial. Para uso destas equações, o cálculo do Percentual de Área de Aberturas nas Fachadas Total (PAFt) demanda que cada fachada tenha sua orientação geográfica escolhida entre uma das quatro principais: Norte, Sul, Leste e Oeste. Atenção

especial é dada à fachada Oeste, cujo percentual de área de abertura deve ser usado na equação caso seja 20% superior que o PAFt (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 2008).

As proteções solares de aberturas são tomadas pela média final dos ângulos verticais e horizontais de sombreamento (AVS e AHS) de cada fachada. O ângulo máximo que pode ser aplicado na equação é 45° para qualquer situação. O Regulamento adverte que “esta exigência não determina o dimensionamento das proteções solares. Elas devem ser projetadas para evitar o sobre-aquecimento dos ambientes internos considerando as necessidades de sombreamento específicas do edifício, as condições sazonais do clima local (trajetória solar e temperaturas) e a orientação de cada fachada” (BRASIL, 2009, p.20). Segundo o LABEEE (2008), esta estratégia é para “evitar o uso de proteções excessivas que possam prejudicar a penetração da luz natural difusa nos ambientes internos” (p.11). Nesta versão, as tipologias de proteção solar estão limitadas às contínuas que estão em contato direto com a fachada; às vazadas (tipo pergolado ou laminadas) cujas aletas estão paralelas à abertura e sem grande distanciamento entre si; às proteções paralelas externas à abertura (pórticos, chapas perfuradas, etc.) que estão fisicamente conectadas ao edifício e distanciadas do plano de vidro a até uma altura equivalente à do vão. Por isto os efeitos do sombreamento provocado pelo próprio edifício em suas aberturas, em termos de AVS - o que ocorre em edifícios compostos por blocos de alturas diferentes, por exemplo - nem sempre podem ser contabilizados na equação. Também não são considerados os efeitos de obstruções de entorno, tais como edifícios, relevo e vegetação, nas avaliações do RTQ.

2.3 Estudo complementar de variáveis

2.3.1 Iluminação

No campo de iluminação em edifícios, Rodrigues (2000) lista os problemas mais usuais encontrados no país: iluminação excessiva e mal aproveitada, com comandos e circuitos das luminárias em número insuficiente, com equipamentos pouco eficientes e usados inadequadamente, prejudicados ainda pela ausência de manutenção. Inclui a eficiência

energética e a integração da iluminação artificial e natural como características de um bom projeto de iluminação de interiores.

Segundo o Ministério das Minas e Energia (BRASIL, 2007c), considerando-se todos os setores (energético, industrial, de edificações, transporte, agropecuário), 17% do consumo final de energia elétrica é devido a iluminação artificial no país. Afirma que o potencial de conservação é grande e aponta três estratégias para melhorar a eficiência energética:

- Aproveitamento da iluminação natural, visto que o Brasil possui “uma das abóbadas celestes mais claras do mundo, com baixa nebulosidade em muitos pontos de seu território” (*apud* RODRIGUES, 2000);
- Controle do acendimento de lâmpadas, evitando-se que grandes áreas fiquem acesas desnecessariamente. É incentivada a instalação de dispositivos como sensores de presença, temporizadores (*timers*), etc.
- Uso de lâmpadas, reatores e luminárias eficientes. A substituição destes componentes por outros mais eficientes (*retrofit*) é estimulada desde que sejam adequados ao uso do ambiente, como nos casos em que é necessário o uso de lâmpadas com determinado índice de reprodução de cores.

Alinhando-se às estas estratégias, o RTQ determina como pré-requisito para a classificação do sistema de iluminação alguns itens voltados para a divisão dos circuitos, contribuição da luz natural e desligamento automático do sistema.

Para a determinação da eficiência do sistema, o RTQ propõe métodos relacionados a elementos especificados pelos projetistas que interferem na iluminação natural e artificial: forma do espaço, características das superfícies internas, tipos de componentes luminotécnicos, atributos das aberturas (dimensões, tipo de esquadrias, de vidros, presença de proteções solares). A seguir são feitas considerações sobre três destes elementos: vidros, sistemas de fachada envidraçada e proteções solares, os quais têm implicação direta no consumo energético tanto do sistema de iluminação artificial quanto do sistema de condicionamento artificial do ar – neste caso, devido à quantidade de carga térmica associada à radiação direta que penetra pela abertura.

2.3.2 Vidros

O espectro da radiação solar que atinge a atmosfera é composto por 1% a 5% de radiação na faixa da ultravioleta, 41% a 45% de luz visível e 52% a 60% de infravermelho. Um elemento translúcido comporta-se de modo diferente à passagem da radiação dependendo da faixa do espectro, por influência de sua própria composição química, cor, espessura ou existência de películas. Aquele com alta transmissão luminosa (TL) na faixa do espectro visível potencializa o aproveitamento da luz natural. Com baixa transmissão de ultravioleta, evita que esta radiação interfira na durabilidade dos materiais. Com baixa transmissão de infravermelho, a qual concentra a maior parte da energia térmica, diminui o aquecimento do ambiente pela radiação direta (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 200-).

No Brasil a escolha de vidros leva em conta o Fator Solar (FS) ou o Coeficiente de Sombreamento (CS), índices que não consideram as variações de resposta de um material de acordo com a faixa do espectro da radiação incidente (USP, 200-).

Devido ao interesse em reduzir a carga térmica relativa à incidência de radiação solar nos planos envidraçados dos edifícios, há utilização crescente de vidros “para controle solar” no país. A TAB. 2 apresenta algumas propriedades de cinco vidros da fabricante Guardian,

TAB. 2: Propriedades de vidros para controle solar

Tipo	Aparência (Coloração)	TL (%)	U (W/m ² .°C)	CGCS
Monolítico 4mm	Incolor	14	3,76	0,25
	Prata	21	3,62	0,29
	Verde	19	3,62	0,28
Laminado 4mm/PVB 0,38mm/4mm	Incolor	15	5,16	0,28
	Prata	19	5,16	0,32
	Verde	17	5,16	0,33
	Verde/Prata HP	42	5,16	0,39
	Incolor HP	73	5,15	0,59
Insulado 6mm/ar 12mm/6mm	Incolor	12	2,33	0,18
	Prata	19	2,28	0,22
	Verde	16	2,28	0,19
	Verde HP	42	1,67	0,25
	Incolor HP	69	1,90	0,53

Nota:

TL=Transmissão luminosa; U=Transmitância térmica;

CGCS= Coeficiente de Ganho de Calor Solar (Fator Solar); PVB= polivinil butiral;

Incolor= Vidro SunGuard Solar Neutral 14 on Clear;

Prata= Vidro SunGuard Solar Silver 20 on Clear;

Verde= Vidro SunGuard Solar Silver 20 on Green;

Verde/Prata HP= Vidro SunGuard High Performance Neutral Plus 50 on Green;

Incolor HP= Vidro SunGuard High Performance Neutral 70 on Clear;

Fonte: adaptado de Guardian Industries (2008).

sendo três de controle solar convencional e dois com baixa emissividade (*low-e*), identificados como HP, de “*High Performance*”. Todos são fabricados no sistema em que a camada de revestimento metalizado, o *coater*, é aplicada sobre o vidro pela deposição física de óxidos metálicos e/ou cerâmicos em linha de produção individualizada. Nos casos apresentados, verifica-se a menor transmitância térmica dos vidros insulados (duplos), com valores entre $1,67 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ e $2,33 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Os vidros de controle solar convencionais analisados possuem TL em geral abaixo de 20%, o que reduz o potencial de aproveitamento de luz natural. Se fabricado como *low-e*, o vidro incolor deste fabricante pode chegar a valores de TL em torno de 70% com FS (ou CGSC) bastante superior ao dos demais (GUARDIAN INDUSTRIES, 2008). Nota-se que estes valores variam conforme a linha de produtos e o fabricante, e foram apresentados apenas a título de exemplo.

2.3.3 *Sistemas de fachada envidraçada*

Uma pesquisa feita pelo Ministério das Minas e Energia indicou que as fachadas em vidro são o segundo tipo de sistema de vedação mais utilizado no setor comercial no Brasil, correspondendo a 11,3%. Em primeiro lugar está o sistema de alvenaria, que corresponde a 67,4% (BRASIL, 2008b).

Os sistemas de fachada envidraçada para grandes edifícios se estabeleceram no país a partir da década de 1970, com as fachadas-cortina (com colunas estruturais fixadas sobre a frente da viga, acentuando a verticalidade da fachada) e com a pele de vidro (colunas fixadas pela face interna). Nos anos 80 surgiu o *structural glazing*, sistema no qual os vidros são colados sobre os perfis metálicos para reduzir a visibilidades destes. No fim da década de 1990, apareceram os módulos unitizados com caixilhos, acessórios e vidros unidos na fábrica. Atualmente dividem o mercado com o sistema da fachada suspensa, no qual o vidro é fixado por aranhas e rótulas (SISTEMA, 2005).

O uso de fachadas envidraçadas tem sofrido alterações em alguns tipos de edifícios. Isto está relacionado a determinações vinculadas a regulamentos de segurança contra incêndio e pânico nas edificações de alguns estados brasileiros.

Por exemplo, tanto a Instrução Técnica 09 de São Paulo (CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2004), quanto a Instrução Técnica 07

de Minas Gerais (CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE MINAS GERAIS, 2006) e a Norma Técnica 013 do Ceará (CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO CEARÁ, 2008), trazem exigências sobre a Compartimentação Vertical e Horizontal de edifícios. Com a intenção de dificultar a propagação vertical do incêndio pelo exterior dos edifícios, elas determinam que nas fachadas envidraçadas:

- a) caixilhos e componentes transparentes ou translúcidos devem ser incombustíveis, aberta exceção para os vidros laminados;
- b) atrás destas fachadas devem ser “instalados parapeitos, vigas ou prolongamentos dos entrepisos”, para separar aberturas de pavimentos consecutivos. No caso de parapeitos ou vigas, estes devem ter altura mínima de 1,20m separando as aberturas;
- c) as frestas ou as aberturas entre a fachada e os elementos citados anteriormente devem ser vedados com selo corta-fogo em todo perímetro.

Assim, ao exigirem a instalação de elementos opacos por trás da fachada envidraçada, estes documentos induzem à redução da área de penetração de radiação solar direta no ambiente. Obviamente, isto altera tanto o potencial de aproveitamento de luz natural quanto o de sobreaquecimento do ambiente devido à incidência direta da radiação, o que interfere concomitantemente no desempenho energético do edifício.

As imagens da FIG. 4 foram retiradas das Instruções Técnicas de Minas Gerais (FIG.4a) e de São Paulo (FIG.4b). A figura demonstra, através de cortes ilustrativos, qual o tratamento deve ser dado à fachada envidraçada para que ela esteja em conformidade com os citados documentos. Na FIG.4a, bem como na FIG.4b, o uso de alvenaria como parapeito pode ser observado. Na FIG.4b também são indicados os elementos de isolamento vertical que funcionam como selos corta-fogo perimetrais, vedando as frestas e as aberturas situadas entre a fachada envidraçada e a alvenaria.

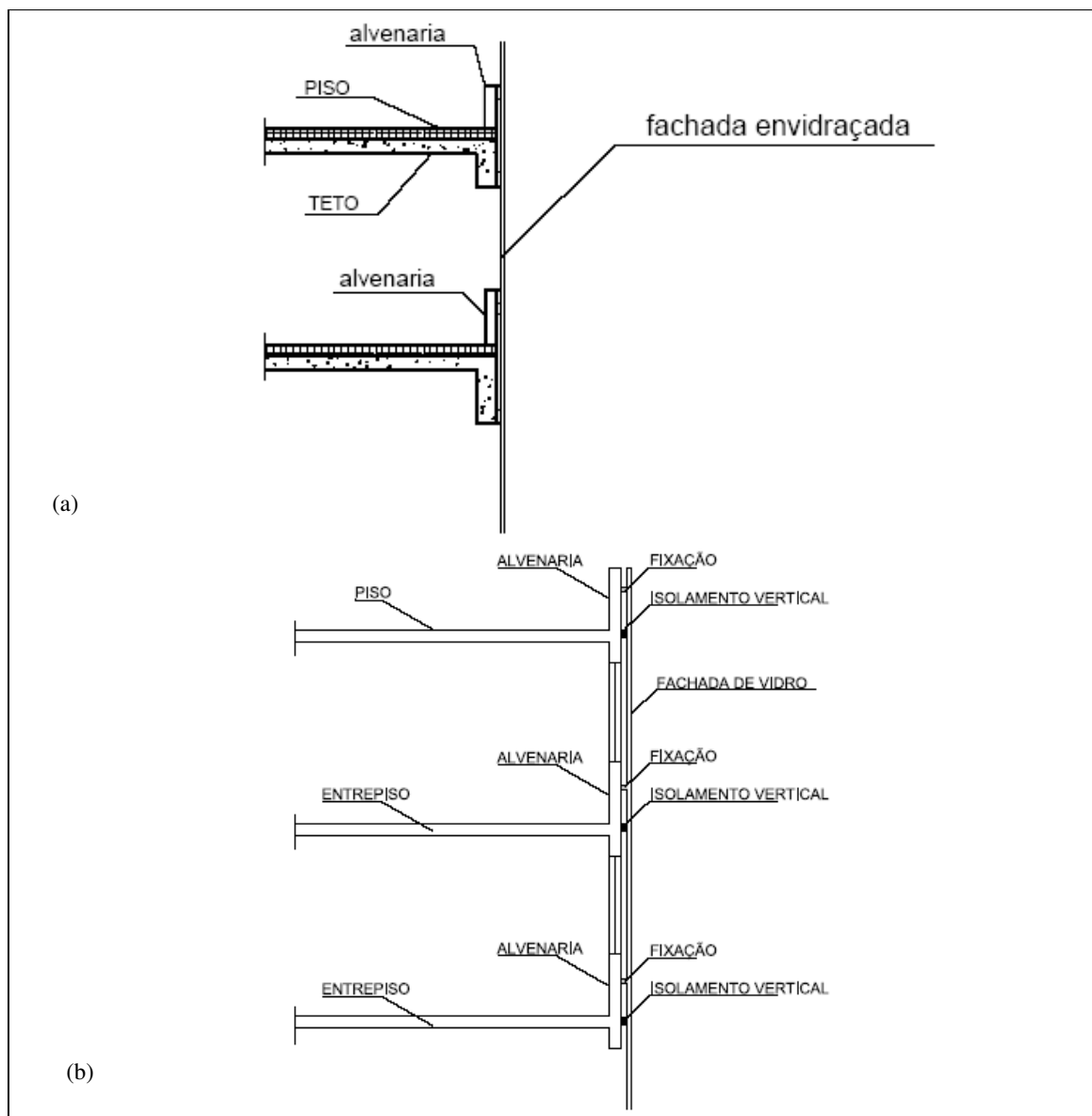


FIG. 4: Compartimentação vertical (fachadas envidraçadas). Fonte: (a) Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais, 2006; (b) Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2004.

2.3.4 Proteções solares

As proteções solares são componentes arquitetônicos também chamados de “dispositivos de proteção solar”, “protetores solares” ou “quebra-sóis”.

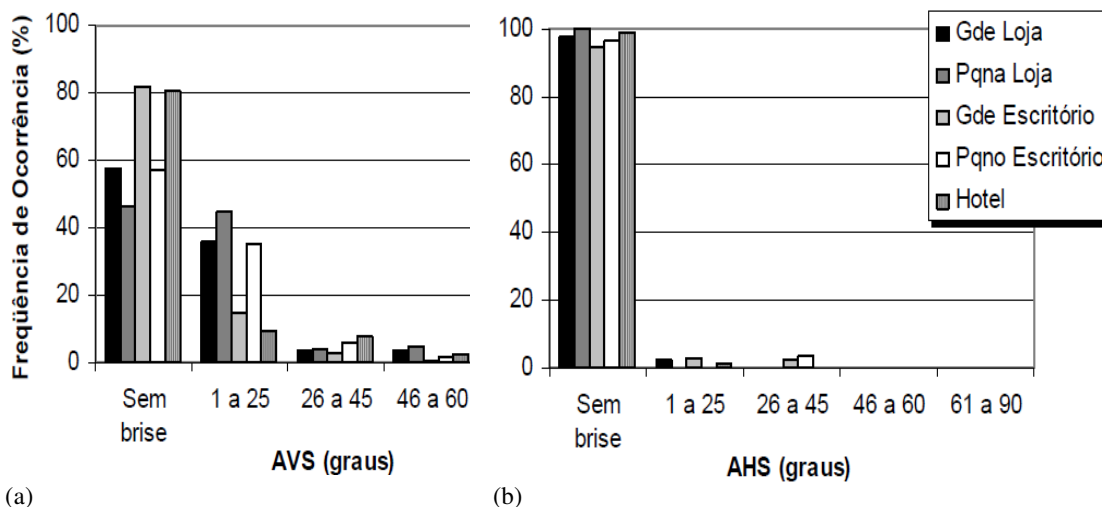
O quebra-sol é um dispositivo usado para sombrear. Reduz a incidência de insolação sobre uma construção ou sobre espaços exteriores e proporciona melhores condições de temperatura e controle da luz incidente. São exemplos a varanda, a marquise, o *brise-soleil*, as telas

especiais, os toldos, as cortinas e persianas, os elementos vazados (cobogós), as pérgulas (FROTA, 2004).

Segundo Bittencourt (2004), os protetores podem ser divididos conforme o movimento (móveis ou fixos) e posição na fachada (verticais, horizontais e mistos). Os móveis têm melhor desempenho do que os fixos porque podem ser ajustados de acordo com a variação dos raios solares ao longo do dia e do ano, mas são mais caros. O autor lembra que o tipo de proteção deve ser definido levando-se em consideração diversos fatores, como “eficiência, plasticidade, privacidade, luminosidade, ventilação, visibilidade, durabilidade, custos de implantação e manutenção, dentre outros” (p.57).

Segundo Gutierrez e Labaki (2003), a efetividade da proteção solar sobre a envoltória depende da distância relativa à fachada, o que influi na transmissão de calor; do coeficiente de reflexão e absorção do material relativo à radiação solar; da geometria do elemento, a qual influi na capacidade de sombreamento em função da trajetória solar.

Carlo (2008) citou características que interferem na eficiência energética de 1103 edificações comerciais e institucionais brasileiras, dentre elas a existência e o tipo de proteção solar. Estas edificações localizam-se em cinco capitais: Florianópolis, São Paulo, Salvador, Recife e Belo Horizonte. Os resultados indicam que as proteções horizontais são muito pouco usadas em edificações comerciais. No caso dos grandes escritórios analisados em sua tese de doutorado, mais de 80% dos edifícios levantados não apresentam nenhum dispositivo de proteção (FIG. 5). Dentre os que possuem algum dispositivo, os ângulos verticais de sombreamento (AVS) aplicados variam de 1° a 25°, estes valores correspondendo a 15% dos casos. As proteções verticais são raras, independentemente do tipo de uso do edifício. Cerca de 95% dos grandes escritórios não dispõem deste tipo de proteção. Nos 5% restantes, encontra-se o ângulo horizontal de sombreamento (AHS) entre 1° e 45°.



(a) (b)
FIG. 5: Frequência de ocorrência do AVS (a) e de AHS (b) de edificações comerciais amostradas no Brasil. Fonte: Carlo (2008).

Estes dados concordam com a pesquisa apresentada pelo MME, que relata que 15,7% dos edifícios comerciais brasileiros utilizam algum tipo de proteção externa (FIG. 6). O Ministério reconhece que a ocorrência é baixa, havendo espaço para incentivo de uso destes dispositivos através de programa de eficiência energética (BRASIL, 2008b). Li e Lam (1999) destacam que o uso de proteções solares tinha sido abandonado nas décadas de 1970-1980 em Hong Kong, período em que as fachadas envidraçadas se consolidaram no país. No entanto, após o regulamento local de 1995, houve uma retomada do uso de proteções solares em edifícios não-residenciais para ajustar o ganho de calor pelo envelope ao limite estabelecido.

Sobre pesquisas nacionais relacionadas às proteções solares e o desempenho energético, tem-se que Signor (1999) desenvolveu equações para caracterizar o consumo anual de edifícios de escritórios climatizados artificialmente para climas de 14 capitais brasileiras, usando simulação no *software* DOE2.1E. A partir dos dados apresentados pelo autor, pode-se inferir que a redução de consumo de energia elétrica devido ao aumento da proteção por brises horizontais nos casos avaliados ficou entre 3% e 14%, aproximadamente.

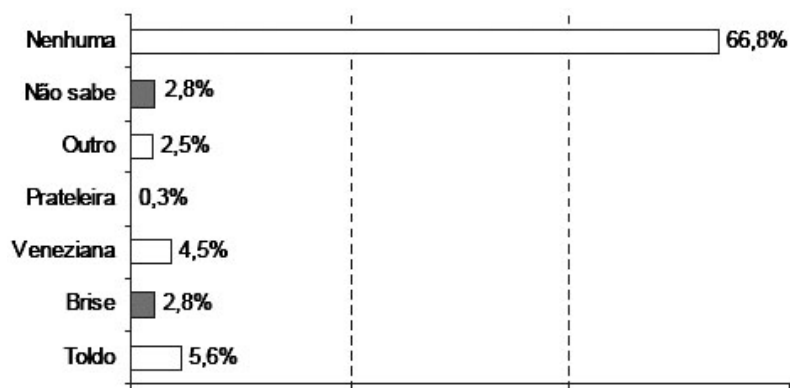


FIG. 6: Edificações comerciais por tipo de proteção externa contra insolação. Fonte: Brasil (2008b).

Santana (2006) estudou a influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório de Florianópolis através de simulações termo-energéticas no *software EnergyPlus*. Desenvolveu um caso base para simulações a partir de uma tipologia predominante observada em casos levantados na cidade. Variou características do padrão de ocupação e uso de equipamentos, do sistema de ar condicionado e do envelope, o que incluiu proteções solares simples (brises externos). Tomando o caso base, no qual não há proteção, inseriu dispositivos iguais para todas as fachadas em todas as aberturas. Simulou um AHS de 45°. A seguir, variou o AVS de 25°, 45° e 65°. Por último, inseriu simultaneamente brises verticais e horizontais com 45°. Nas condições analisadas, concluiu que a proteção vertical teve pouco impacto na redução do consumo de energia em relação ao caso base. Os outros casos produziram reduções significativas, sendo encontrado um percentual anual máximo de 11,6%. Em um dos casos, a redução chegou a 15,2% para o mês de abril.

Carlo (2008) também simulou protótipos de edificações comerciais no *software EnergyPlus*. Os resultados geraram as equações de Indicador de Consumo (IC) presentes no RTQ. Reiterou a relevância das proteções solares no desempenho energético de edificações, mantendo as variáveis AVS e AHS na equação de IC. Constatou a inter-relação entre o Percentual de área de Janela na Fachada (PJF), as propriedades de transmissão de energia térmica pelo vidro e os dispositivos de proteção solar no consumo. Aplicou Medidas de Conservação de Energia (MCE) para verificar o potencial de redução do consumo de energia elétrica nos protótipos conforme a variação de parâmetros do edifício. Como resultado deste processo, identificou que as proteções solares sucedem o PJF como medida que proporciona os resultados mais atrativos, geralmente ficando à frente do fator solar e da transmitância térmica das paredes.

2.3.4.1 Proteções solares e o método da Temperatura Neutra

Pereira e Souza (2008) propõem uma metodologia na qual são combinados quatro fatores para determinar o período em que a proteção solar é desejável em uma abertura. Estes fatores são: radiação solar incidente na fachada, dados de temperatura do ar externo, tipo de uso do edifício e proporção da área da abertura em relação à área de piso do ambiente.

Para definir critérios válidos para a diversidade de clima das cidades brasileiras e considerando as condições de aclimação da população, partem da definição de uma zona de conforto para cada cidade utilizando dados de insolação e temperatura disponíveis nas Normais Climatológicas (BRASIL, 1992). Estabelecem a zona de conforto de acordo com o modelo proposto por Auliciems (1983), cujo centro encontra-se na Temperatura Neutra (T_n) – temperatura esta definida pelas autoras como aquela em que uma população que está aclimatada e em atividade sedentária se sente confortável. A T_n é calculada por:

$$T_n = 0,31T_e + 17,6^{\circ}\text{C} \quad [\text{Eq. 3}]$$

Onde:

T_n : Temperatura Neutra

T_e : temperatura média mensal do ar, em $^{\circ}\text{C}$, extraída das Normais Climatológicas

As autoras propõem que para os edifícios comerciais, públicos e de serviços, o limite superior da zona seja tomado como dois graus acima da Temperatura Neutra ($T_n + 2^{\circ}\text{C}$); o limite inferior como quatro graus abaixo da Temperatura Neutra ($T_n - 4^{\circ}\text{C}$). Para edifícios destas tipologias, determinam que a proteção deve ser dimensionada para bloquear a incidência solar no intervalo em que:

- a temperatura do ar externa for superior a $T_n + 2^{\circ}\text{C}$ e a incidência de radiação solar na fachada for superior a 500W/m^2 , se a abertura for inferior a 25% da área do piso,
- a temperatura do ar externa for superior a $T_n + 2^{\circ}\text{C}$ ou a incidência de radiação solar na fachada for superior a 600W/m^2 , se a abertura for superior a 25% da área do piso.

Aconselham que a abertura não seja protegida no intervalo em que a temperatura do ar externa for inferior a $T_n - 4^{\circ}\text{C}$, independentemente de seu tamanho.

Para a definição final das proteções, as condições de temperatura e de radiação são combinadas graficamente a partir da sobreposição de cartas solares, diagramas com manchas de radiação incidente em planos verticais e transferidores auxiliares.

Em estudos posteriores realizados pelo LABCON-EA da UFMG e pela Secretaria Técnica do PROCEL- Edifica para o Regulamento de edifícios residenciais, foi identificado que o limite de $T_n -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ em que as proteções solares não deveriam barrar a radiação solar incidente na fachada deveria ser revisto para $T_n -6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $T_n -7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (SOUZA, 2009).

2.3.4.2 Prateleiras de luz

De acordo com International Energy Agency (2000), a prateleira de luz ou *light shelf* é conhecida desde o tempo dos faraós egípcios. Pode ser convencional ou empregar sistemas ópticos avançados para redirecionar a luz de modo que ela alcance mais longas distâncias (acima de 10m, conforme a situação) e seja distribuída mais uniformemente. Esta última é selada com vidro, impedindo que a sujeira se acumule sobre as superfícies refletoras. Pode ser inclinada, todavia a horizontal apresenta melhor associação entre proteção contra a radiação solar direta e a distribuição da luz. Sua superfície pode ser difusora, especular ou mista. Se perfeitamente difusora, apenas metade da radiação incidente será direcionada para o interior. Se muito especular, pode projetar no teto manchas ou ressaltar imperfeições contidas em sua superfície. A prateleira pode ser fixa ou móvel, a qual permite maior gama de aplicações. Não tem seu melhor desempenho nas orientações leste e oeste; nestas situações, quanto maior a latitude, maior a necessidade de haver proteções solares complementares. Também não é indicada para locais onde predominam céu encoberto, por diminuir a entrada de luz difusa.

Diversos estudos têm se voltado para estes elementos. Citam-se dois exemplos internacionais e dois nacionais.

Claros e Soler (2001) compararam o desempenho luminoso de duas prateleiras de luz e de um brise que ofereciam a mesma proteção solar a uma abertura orientada a Sul, em Madrid (latitude 40° N). Uma prateleira possuía superfície opaca de cor branca e a outra era espelhada. Usaram modelos em escala de um ambiente com abertura única. Durante um ano, realizaram medições horárias de iluminância em um ponto no interior do modelo que ficava distante da abertura. Comprovaram que mais luz alcançava o fundo do modelo com as prateleiras de luz do que com os brises. Além disto, comparando o desempenho das duas

prateleiras entre 08h30min e 11h30min, concluíram que a opaca foi mais eficiente que a espelhada nos meses centrais do ano, ou seja, próximos ao verão local. Nos demais meses, a espelhada teve melhor desempenho.

Ochoa e Capeluto (2006) avaliaram o desempenho de três sistemas de iluminação natural para uso em escritórios, incluindo a prateleira de luz horizontal. Usaram simulação computacional de modelo de escritório localizado em Israel (latitude 32° N) com abertura única, que teve a orientação variada entre Norte, Sul, Leste e Oeste. Combinaram o acionamento automático de venezianas no *software* e um índice de ofuscamento para incluir a possível influência do comportamento do usuário nos resultados. Concluíram que a prateleira, apesar de eficiente apenas nos horários e estações em que o sol atinge diretamente a placa, ajuda a reduzir o ofuscamento e a equilibrar melhor o nível de iluminância entre a área próxima à janela e o fundo da sala. Como ela reduziu os níveis de iluminância no caso estudado, afirmaram que nem sempre é recomendada para a orientação Norte, cuja fachada recebe menor quantidade de radiação direta nesta latitude.

No Brasil, Macedo e Pereira (2003) usaram modelos em escala sob o céu real de Florianópolis (latitude 27° S) para analisar o desempenho luminoso e o ganho térmico de quatro sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol: prateleira de luz espelhada, veneziana, vidro cortado a laser, zenital com sistema seletivo angular. Os modelos reproduziram um ambiente com abertura única orientada a Norte e as medições foram feitas em três dias consecutivos de céu claro. Atribuíram aos sistemas os conceitos “muito ruim”, “ruim”, “bom” e “muito bom”. O nível médio de iluminância interna proporcionado pela prateleira de luz foi considerado entre “bom” e “muito bom”, com valores oscilando entre cerca de 900 lux e 2500 lux conforme o horário do dia. O desempenho térmico foi considerado entre “ruim” e “bom”, com valores de Fator Solar entre 0,3 e 0,5. Ao final, prevaleceu o conceito “bom” em todas as análises deste sistema. Os autores concluíram que a prateleira de luz promoveu uma melhor distribuição interna da luz e menor ganho de calor em relação à fornecida abertura com vidro simples, sem proteção.

Já Santos e Bastos (2008) analisaram um escritório hipotético de planta livre localizado no Rio de Janeiro (latitude 22° S). Fizeram simulações para vários tipos de céu e elementos de fachada (transmissão visível dos vidros, elementos de proteção solar, obstruções de entorno). Verificaram o impacto de tais medidas no desempenho da iluminação natural através de simulação computacional. Dentre os resultados, concluíram que prateleiras de luz usadas

como proteção solar externa, compostas com vidros de baixa transmissão visível até o nível dos olhos do usuário e maior transmissão no alto da janela, melhoram a distribuição da luz natural sem afetar o conforto visual do ocupante. Santos e Bastos (2008) concluíram que a prateleira de luz na fachada Sul foi menos eficiente do que na fachada Norte.

A prateleira de luz é ainda pouco utilizada em edificações comerciais no país, como comprova o levantamento retratado anteriormente pela FIG. 6 (BRASIL, 2008b) em que a presença deste tipo de elemento foi identificada em apenas 0,3% dos casos analisados.

2.4 Softwares de simulação de desempenho energético de edifícios

Desde meados do século XX diversos *softwares* de energia em edifícios vêm sendo criados e aperfeiçoados. Fundamentalmente, fornecem aos usuários indicadores de desempenho do edifício tais como demanda e forma de uso de energia, temperatura e umidade do ar e custos (CRAWLEY *et al.* 2005).

Para análises de consumo de energia, estes programas devem ser testados em sua capacidade em fornecer resultados confiáveis, sendo submetidos a testes de validade que podem ser (CRAWLEY *et al.*, 2001):

- Analíticos, que comparam os resultados obtidos com cálculos matemáticos;
- Comparativos, que comparam os resultados de *softwares* diferentes;
- Sensibilizadores, que efetuam pequenas alterações nos dados de entrada e comparam as saídas com uma base;
- De faixa, que rodam o programa com grandes faixas de dados de entrada;
- Empíricos, que comparam os resultados com experimentos.

O RTQ exige que o *software* usado nas análises seja submetido aos testes comparativos da ASHRAE Standard 140, os quais são parcialmente baseados no projeto *Building EnergySimulation Test* (BESTEST). A ASHRAE Standard 140 avalia a capacidade técnica e os limites de aplicabilidade dos cálculos de desempenho térmico do edifício e de seus

sistemas de HVAC (ASHRAE, 2007), além de auxiliar na identificação de falhas nos programas.

A seguir são descritos dois programas base usados nas simulações apresentadas na presente dissertação. São eles o *software EnergyPlus* e uma derivação, o *DesignBuilder*. O *EnergyPlus* versão 3.0.0.028 foi validado pela ASHRAE Standard 140-2007 (U.S.DOE, 2009). Apenas a versão 1.2.0 do *DesignBuilder* foi validada pela ASHRAE Standard 140-2004 (DESIGNBUILDER, 2006).

2.4.1 *EnergyPlus*

O *EnergyPlus*® simula o desempenho térmico e energético de edificação e de seus sistemas. Criado e mantido pelo departamento de energia americano (DOE), tem sido internacionalmente usado em pesquisas e aplicações comerciais. É gratuito e mantém um grupo de discussões e suporte eficiente via *internet*, além de ser atualizado periodicamente, recebendo correções e incorporando novas ferramentas. É um *software* aberto baseado em parte no DOE-2. Permite que o usuário intervenha em sua estrutura e altere suas equações de cálculo.

É usado fundamentalmente para fazer a avaliação energética do edifício. Para isto, o modelo do edifício é dividido em zonas térmicas, áreas de características térmicas similares. São ainda necessários para a simulação da edificação dados de clima, orientação geográfica, geometria e características dos componentes construtivos do edifício; obstruções externas e proteção solar; padrão de ocupação, de sistemas de HVAC e de iluminação, dentre outras informações.

O *software* possui três gerenciadores. O primeiro é voltado para o balanço térmico de superfícies. Integra os modelos de céu, sombreamento, iluminação natural, janelas de vidro, com o cálculo de CFT (função de transferência por condução). O segundo é voltado para um módulo de balanço térmico do ar, o *Airflow Network*, capaz de simular fluxos associados à ventilação natural e a sistemas de distribuição mecânica de ar, além de perdas e ganhos de calor por umidade do próprio sistema de distribuição do ar. O último gerenciador, direcionado para os sistemas prediais, integra os módulos de ciclo de ar, de máquinas, do condensador, de equipamentos da zona e do sistema fotovoltaico (U.S.DOE, 2009). Foram identificados problemas como inversão de coordenada de brises verticais; deslocamento da hora solar e

imprecisão do CTF para alguns materiais (CRAWLEY *et al.*, 2001) em versões mais antigas do *EnergyPlus*. Ao que tudo indica, as versões posteriores tiveram este problema corrigido.

A iluminação natural pode ser analisada no *EnergyPlus* por meio de duas configurações, diferenciadas pelos métodos de cálculo de níveis de iluminância interna, fundamentais para o cálculo de consumo de energia integrada à iluminação natural. Na versão 3.0 o programa está pré-configurado com dois tipos de dispositivos relacionados à iluminação natural: dutos de luz e proteções solares verticais ou horizontais. No caso da prateleira de luz, a radiação direta refletida para o teto é convertida em radiação difusa de onda curta para a zona. O comportamento térmico destes dispositivos é incluído no balanço térmico da zona (U.S.DOE, 2009). Destaca-se que o *software* é limitado na simulação de iluminação natural, demandando o uso de outros programas específicos para análise desta variável de modo mais satisfatório (CARLO, 2008).

O algoritmo do *EnergyPlus* é empregado em outros programas que facilitam sua utilização e leitura de resultados, visto que sua forma textual de entrada e de saída não é amigável ao usuário leigo. A página eletrônica do DOE apresenta mais de uma dezena deles. Dentre eles, destaca-se o *DesignBuilder*, que é capaz de criar a geometria do edifício em 3D facilmente, gerando automaticamente um IDF (*Input Data File*, arquivo de entrada de dados para o *EnergyPlus*) com atributos de superfícies e suas respectivas coordenadas.

2.4.2 *DesignBuilder*

O *DesignBuilder* é um *software* desenvolvido no Reino Unido. Na página eletrônica da empresa que o comercializa (<http://www.designbuilder.co.uk/>), o programa é disponibilizado para testes.

O *software* permite a modelagem de edificações complexas com certa agilidade e de modo simplificado. Importa arquivos bidimensionais em formato.dxf. A geometria em 3D criada é editável, pode ser visualizada em corte e pode ser exportada para outros programas. Elabora animações e imagens que incluem efeitos de sombreamento provocado pelo sol através das aberturas e dispositivos de sombreamento, incluindo efeitos de reflexão. Exporta também o arquivo .idf para edição no *EnergyPlus* e consegue rodar este programa sem que seja necessário sair de sua interface. Oferece saídas de diversos parâmetros em intervalos sub-horários (por interpolação), horários, diários, mensais e anuais. Dentre os parâmetros estão o

consumo de energia por tipo de combustível e por uso (consumo desagregado) com respectiva taxa associada de emissão de dióxido de carbono (CO_2); temperatura e umidade relativa do ar externo e interno; temperatura média radiante e operativa interna; taxas de infiltração e ventilação; dados de conforto baseados em diversas metodologias; ganho de calor de superfícies; consumo com iluminação artificial, permitindo analisar a influência de sistemas de controle para aproveitamento da luz natural. Possui banco de dados de materiais, arquivos climáticos e referências de desempenho em edificações, incluindo informações advindas de alguns códigos. É capaz de modelar a ventilação natural com janelas abertas, a partir do *setpoint* de temperatura de ventilação, com referência na temperatura de ar externa. Modela diversos tipos de esquadrias e vidros, incluindo eletrocrômicos. Simula paredes Trombe, fachadas duplas, diversos dispositivos de sombreamento. Além disto, possui ferramenta para análise paramétrica (OTEC, 2008).

3 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho foi resumida no esquema abaixo (FIG. 6a). Partiu da revisão bibliográfica, que embasou a escolha do estudo de caso (edifício e ambiente-padrão) e os procedimentos a serem realizados. As análises paramétricas do estudo de caso foram feitas em duas etapas. Na primeira, realizou-se a avaliação da envoltória do edifício e da iluminação do ambiente-padrão segundo o método prescritivo do RTQ. Na segunda, foi feita a simulação computacional do ambiente-padrão. No processo, foram avaliados os efeitos de alterações na fachada tanto na classificação do prédio por RTQ quanto no consumo de energia do ambiente por simulação. Ao final, foram feitos alguns comentários sobre os dois métodos de avaliação aplicados nas etapas anteriores.

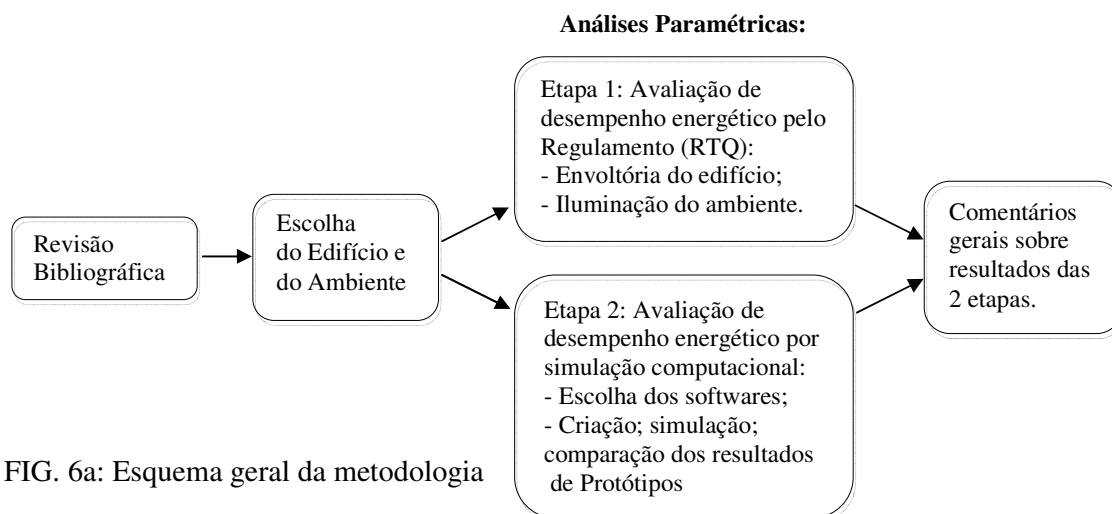


FIG. 6a: Esquema geral da metodologia

3.1 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica foi feita através de artigos de periódicos nacionais e internacionais consultados via web em sites especializados como Periódicos Capes®, Compendex® e InfoHab. Outras fontes de informação importantes foram teses, dissertações, artigos de congressos técnicos, manuais de programas computacionais e sites de organizações e de universidades.

Foi levantado o estado da arte na área de instrumentos reguladores de consumo de energia em edifícios, destacando-se o de alguns países, inclusive o Brasil. Posteriormente, o Regulamento brasileiro foi descrito ressaltando-se alguns de seus pontos que serviram de subsídio ao desenvolvimento deste trabalho. Outras variáveis relevantes neste contexto foram apresentadas. Neste momento, os *softwares* escolhidos para simulação foram caracterizados.

3.2 Escolha do estudo de caso

O edifício e o ambiente de estudo são descritos no Capítulo 4. No presente item são comentados os critérios considerados para estas escolhas.

3.2.1 Escolha do edifício

Foi escolhido um edifício que atendesse às exigências básicas para classificação de um edifício pela RTQ, sendo elas: edifícios de uso comercial, de serviços ou público condicionados, parcialmente condicionados ou naturalmente ventilados com área total útil mínima de 500m² ou tensão de abastecimento maior ou igual a 2,3kV (equivalente aos subgrupos A1, A2, A3, A3a e A4). Estas características são encontradas no edifício-sede do TJMG, que foi projetado para abrigar simultaneamente os três tipos de uso, sendo predominante o público, com condicionamento artificial na maior parte de suas áreas.

Além disto, havia especial interesse no estudo das composições de fachada formadas por vidros contínuos que cobrem tanto as aberturas quanto os fechamentos opacos que formam os peitoris. Neste prédio predominam áreas com este tipo de fachada, as quais são voltadas para quatro orientações geográficas, o que permite ainda análises sobre o impacto da orientação solar no desempenho de edifício.

3.2.2 Escolha do ambiente

A análise de iluminação segundo a RTQ e as análises por simulação foram restritas a um dos ambientes do edifício, dadas as condições para desenvolvimento deste trabalho. Foram critérios de escolha deste ambiente:

- a) ser ele condicionado artificialmente, dado o grande impacto do consumo energético que sistemas de ar-condicionado têm neste tipo de edifício;
- b) possuir um padrão de uso e ocupação claramente definido em projeto;
- c) ter abertura única na envoltória em contato com o meio exterior, tendo-se em vista o interesse do estudo nas interações deste ambiente com o ambiente externo;
- d) ser um ambiente padrão que se reproduzisse nos andares do prédio, preferencialmente que pudesse ser encontrado voltado para as quatro orientações geográficas.

Estas características foram encontradas no ambiente projetado para servir como Gabinete de juiz, que foi então tomado como célula de pesquisa.

3.3 Avaliação de estudo de caso pelo método prescritivo do RTQ: critério envoltória.

A avaliação do estudo de caso seguiu a metodologia da RTQ e considerou “A” como o nível de eficiência pretendido.

As informações necessárias para os cálculos foram retirados de documentos do projeto, fundamentalmente dos desenhos digitalizados em *software Autocad* e do caderno de especificações técnicas. Quando necessário, foram complementados por informações de *sites* de fabricantes, catálogos de produtos, literatura específica, representantes comerciais e da equipe de projeto. Também foi necessário esclarecer dúvidas sobre os métodos de aplicação do Regulamento, o que foi feito junto à equipe do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE) da UFSC.

Os dados relativos ao projeto foram organizados em planilhas eletrônicas desenvolvidas no Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da UFMG para facilitar o processo de cálculo e a visualização de resultados. Foi emitido um parecer parcial para cada pré-requisito. Os casos de inconformidade da envoltória original a pré-requisitos foram identificados nesta etapa. Por fim, um parecer geral sobre a classificação do edifício foi obtido para o caso original e para os casos em que a fachada foi alterada. Um dos pontos iniciais desta etapa foi a definição das orientações das fachadas, que buscou seguir o Manual de aplicação do Regulamento (LABEEE, 2008). Nele, consta que as orientações devem ser estabelecidas “através da implantação” do “edifício dentro de um quadrante definido da seguinte forma:

- I. De 0 a 45,0° e de 315,1° a 360,0° a orientação geográfica é Norte;
- II. De 45,10° a 135,0° , a orientação geográfica é Leste;
- III. De 135,10° a 225,0° , a orientação geográfica é Sul;
- IV. De 225,10° a 315,0° , a orientação geográfica é Oeste” (p.23).

Com o objetivo de se avaliar a influência de certas variáveis na classificação final de desempenho da envoltória, também foi feito um estudo do comportamento da equação de Indicador de Consumo em relação às características deste edifício. Variou-se dados de PAFt, FS, AVS e AHS seguindo metodologia e valores apresentados por Carlo (2008). Tais valores correspondem à:

TAB. 3: Parâmetros avaliados na equação de Indicador de Consumo segundo Carlo (2008).

Parâmetro	Valores aplicados					
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
PAFt*	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
FS	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
AVS	0	10	20	30	40	50
AHS	0	10	20	30	40	50

*Carlo (2008) utiliza a sigla PJF, de Percentual de área de Janela na Fachada.

As correlações resultantes entre estas variáveis e o IC são apresentadas posteriormente no GRAF. 3. Nota-se que, apesar de RTQ determinar o ângulo máximo das proteções em 45°, nesta avaliação usou-se também os 50° propostos por Carlo (2008).

A seguir é apresentada a equação de Indicador de Consumo que foi utilizada neste estudo.

3.3.1 Descrição da equação de Indicador de Consumo utilizada

Segundo o Regulamento (BRASIL, 2009), a equação de Indicador de Consumo da envoltória a ser utilizada no caso do edifício em análise, localizado na Zona Bioclimática 3 (ABNT, 2005b) e cuja Área de Projeção (A_{pe}) é superior a $500m^2$, é:

$$IC_{env} = - 14,14.FA - 113,94.FF + 50,82.PAFt + 4,86.FS - 0,32.AVS + 0,26.AHS - 35,75 \div FF - 0,54.PAFt.AHS + 277,98 \quad [Eq.1]$$

Sendo:

$$FA = A_{pe} / A_{tot}$$

$$FF = A_{env} / V_{tot}$$

Onde:

IC: Indicador de Consumo [da envoltória] (adimensional)

FA: Fator Altura (adimensional)

FF: Fator de Forma (adimensional)

A_{pe} : Área de projeção do edifício (m^2).

A_{tot} : Área total de piso (m^2).

A_{env} : Área da envoltória (m^2).

V_{tot} : Volume total da edificação (m^3).

PAF_t : Percentual de Abertura na Fachada total (%).

FS: Fator Solar (adimensional)

AVS: Ângulo Vertical de Sombreamento (adimensional)

AHS: Ângulo Horizontal de Sombreamento (adimensional)

Nesta equação, se o FF do edifício for inferior ou igual a 0,15 ($FF \leq 0,15$), usa-se o valor calculado. Acima deste valor, usa-se 0,15.

O IC obtido para o edifício é comparado a valores de uma escala numérica. Esta escala é dividida em intervalos que correspondem a um nível de classificação que varia de “A” a “E”, respectivamente, os limites máximos e mínimos de IC para o mesmo edifício.

Para isto, usa-se a mesma equação, mas altera-se os valores de FF, PAF_t , FS, AHS e AVS do edifício conforme definido no Regulamento a fim de se estabelecer os valores limites da

edificação proposta. Para encontrar o limite máximo, o percentual de área de aberturas do edifício é aumentado e o fator solar dos vidros é reduzido (retoma-se a equação e faz-se $PA_{ft} = 0,60$; $FS = 0,61$). Para definir o mínimo, o percentual de área de abertura é reduzido a 5% e é usado FS típico de vidros comuns de 3mm de espessura (faz-se $PA_{ft} = 0,05$; $FS = 0,87$). Nestes cálculos não se considera proteções solares (faz-se $AVS=0$; $AHS=0$).

A TAB.4 apresenta os intervalos dos níveis de eficiência para classificação final da envoltória por este método:

TAB. 4: Intervalos dos níveis de eficiência para classificação final da envoltória (BRASIL, 2009).

Nível	A	B	C	D	E
Limite Mín.	-	$IC_{máxD} - 3i + 0,01$	$IC_{máxD} - 2i + 0,01$	$IC_{máxD} - i + 0,01$	$IC_{máxD} + 0,01$
Limite Máx.	$IC_{máxD} - 3i$	$máxD - 2i$	$IC_{máxD} - i$	$IC_{máxD}$	-

Onde:

$$i = (IC_{máxD} - IC_{mín}) / 4 \quad [Eq.2]$$

i: intervalo para cálculo dos níveis de eficiência.

Limite Mín: limites mínimos dos indicadores de consumo conforme a eficiência desejada

Limite Máx.: limites máximos dos indicadores de consumo conforme a eficiência desejada

$IC_{máxD}$: limite máximo do Indicador de Consumo para a volumetria obter classificação D.

$IC_{mín}$: limite mínimo do Indicador de Consumo para a volumetria

Carlo (2008) aplicou equação semelhante à Eq.1 a protótipos de volumetrias diferentes com mais de 500m². Variou PA_{ft} , ao qual chamou de PJF (Percentual de área de Janela na Fachada), FS, AVS, AHS. Nas condições avaliadas, encontrou tendência de redução de IC com o uso de proteções solares, principalmente quando o valor de PA_{ft} é elevado, demonstrando a inter-relação entre estas duas variáveis.

3.3.2 Envoltória original

A avaliação de pré-requisitos de absorância foi feita variando-se os valores possíveis para a cor da fachada uma vez que o edifício não está construído e não há ainda definição precisa do fornecedor destes materiais. Pareceres foram emitidos conforme o uso de valores mínimos, médios e máximos de absorância apresentados na NBR 15220- Desempenho Térmico de Edificações - Parte 2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a). Em alguns casos, devido à carência de base de dados compatível com a variedade de materiais brasileiros, estes valores tiveram que ser estimados a partir de materiais de características superficiais semelhantes.

Os valores de transmitância térmica dos sistemas de cobertura e dos sistemas de fachada foram determinados a partir de dados fornecidos no caderno de especificação pela equipe de projeto que pré-dimensionou o sistema de ar condicionado. Estes valores foram usados na primeira análise de conformidade. Foi necessário complementar dados de alguns materiais não especificados pela equipe, o que foi feito com cálculos baseados naquela mesma Norma e com o *software DesignBuilder*. As eventuais pontes térmicas devidas às estruturas metálicas de sustentação dos sistemas foram desconsideradas.

O pré-requisito relativo à iluminação zenital não foi plenamente avaliado conforme o RTQ. O Percentual de Abertura Zenital (PAZ) é superior a 5%, exigindo a simulação completa do edifício para análise de sua elegibilidade ao Nível “A”. A simulação completa não foi executada por indisponibilidade de tempo na execução deste trabalho de mestrado.

Para a classificação, as aberturas foram separadas por orientação da fachada, por tipo e por existência ou não de sombreamento. Como o edifício possui torres paralelas, as aberturas localizadas entre estas torres se encontram protegidas da insolação direta em algum intervalo do dia. No entanto, no cálculo do Índice de Consumo (IC) os efeitos deste tipo de sombreamento não foram considerados em termos de AVS. Segundo a RTQ, superfícies opacas à frente de aberturas envidraçadas nas fachadas são consideradas elementos de sombreamento apenas se estiverem “fisicamente conectadas ao edifício e a uma distância até o plano envidraçado inferior a uma vez a altura de seu maior vão” e com “proteção solar horizontal como beiral ou marquise” no afastamento entre os planos (LABEEE, 2008). Como estas torres estão afastadas entre si de 10m e não existe proteção solar horizontal no afastamento entre elas ou sobre as aberturas, não é permitido contabilizar qualquer AVS na equação. Além disso, neste caso o ângulo de proteção seria medido a partir do horizonte em direção ao zênite. Isto inviabiliza a entrada deste dado na equação, visto que ela foi desenvolvida para receber apenas o valor do ângulo tomado no sentido contrário, do zênite ao horizonte.

Os dados e pareceres relativos a este item são apresentados no Apêndice A.

3.3.3 *Envoltória com brises otimizados pelo IC*

Neste item foram inseridas proteções solares (brises) à envoltória original. Os demais dados relativos à envoltória permaneceram constantes.

Para definição dos brises, os parâmetros AVS e AHS tiveram os valores alterados na equação para encontrar aqueles que resultassem no menor IC possível dentro das determinações da RTQ. Assim, decidiu-se combinar três valores: 0° (correspondendo à inexistência de proteção), 45° (ângulo máximo) e $22,5^\circ$ (ângulo intermediário). Os demais parâmetros foram mantidos constantes. O IC mínimo assim obtido resultou da combinação AVS= 45° e AHS= 0° .

O processo seguinte foi o de avaliação da influência destes brises na classificação da envoltória. Assim sendo, foram feitos novos cálculos combinando a estes dois ângulos aqueles devidos à geometria do edifício. Com isto, foram incluídos os efeitos do auto-sombreamento do prédio que eram contabilizáveis na equação. Os ângulos finais gerados para aplicação na equação de IC foram AVS= 45° , valor mantido porque não há interferência da geometria neste caso, e AHS= $7,32^\circ$. As tabelas relativas a este processo estão no Apêndice A.

3.3.4 *Envoltória de alvenaria e proteções otimizadas por T_n*

Neste item a parte do sistema de fachada original em camadas foi substituída por alvenaria de tijolos de 8 furos de 20cm com revestimento em argamassa cimentícia de 2,5cm em ambas as faces, totalizando 25cm. O valor de $1,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ da transmitância térmica deste sistema foi calculado através do *DesignBuilder* e usado para obtenção de nova classificação do edifício.

Além disto, novas proteções solares foram inseridas em todas as aberturas. O conjunto de ângulos de proteções avaliado nesta etapa se difere do anterior (item 3.3.3) por ter sido calculado para o ambiente em estudo conforme a necessidade de sombreamento de cada fachada.

Este cálculo baseou-se no método inicialmente proposto por Pereira e Souza (2008) que, como dito no item 2.3.4, associa a temperatura do ar, a Temperatura Neutra, o tipo de uso do edifício, a radiação incidente na abertura e o tamanho relativo das aberturas para definir os períodos em que as proteções solares seriam necessárias. No entanto, os critérios de sombreamento foram adaptados neste trabalho em função de estudos posteriores desenvolvidos pelo LABCON-UFMG para a Secretaria do Grupo Técnico de Edificações do

PROCEL- Edifica (QUADRO 1). Foram determinados então os períodos em que a abertura do ambiente deveria ser protegida segundo as seguintes recomendações:

QUADRO 1: Critérios para projeto de proteções solares para aberturas de Edificação Comercial modificado de Pereira e Souza (2008).

Critério 1: Períodos em que as aberturas devem ser protegidas:

Aberturas superiores a 1/6 da área do piso:

$$\text{Se } [T_{\text{ar}} > (T_n + 3^\circ\text{C})] \text{ ou se } [T_{\text{ar}} > (T_n + 2^\circ\text{C}) \cap I_g > 600 \text{ W/m}^2]$$

Critério 2: Períodos em que as aberturas não devem ser protegidas:

Quaisquer aberturas:

$$\text{Se } T_{\text{ar}} < (T_n - 7^\circ\text{C})$$

Onde:

T_{ar} = temperatura média mensal horária do ar ($^\circ\text{C}$),

T_n = temperatura neutra ($^\circ\text{C}$)

I_g = radiação solar global incidente sobre o plano vertical da fachada (W/m^2).

O critério visa proteger a abertura somente nos períodos em que a temperatura do ar externa esteja no mínimo 3°C acima da temperatura neutra mensal. Protegerão a abertura também sempre que a radiação solar incidente esteja acima de 600 W/m^2 , desde que a temperatura do ar externa esteja 2°C acima de T_n . Em nenhuma condição haverá proteção se a temperatura externa for inferior a 7°C abaixo da temperatura neutra. Esta restrição tem por objetivo evitar o uso de sistemas de calefação.

Para facilitar a aplicação do método, Pereira (2008) desenvolveu uma planilha eletrônica utilizada no presente trabalho. Ela contém valores horários de temperatura do ar de cada mês do ano obtidos através do tratamento de dados das cidades apresentadas nas Normais Climatológicas (BRASIL, 1992). A planilha calcula a Temperatura Neutra mensal. Em função desta temperatura, identifica ao longo do ano, num sistema de diferenciação por cores, as temperaturas que correspondem aos critérios de proteção previamente definidos (TAB. 5).

Com ajuda do programa *Autocad* (FIG. 7a), são transferidas para uma carta solar para Belo Horizonte as informações de temperatura traduzidas por cores bem como a mancha de incidência de radiação solar em plano vertical para cada orientação de fachada. São então identificados os períodos de interesse de proteção. Com um transferidor auxiliar sobreposto à carta são definidos os ângulos de proteção solar para cada fachada.

Para cálculo de IC, as proteções definidas para este ambiente-tipo foram extrapoladas para as janelas de mesmo padrão encontradas nas fachadas do edifício. A projeção ortogonal das proteções sobre as aberturas foi considerada nula em todas as fachadas, exceto na Oeste. Por

este motivo o PAF_o – e conseqüentemente o PAF_t - foram recalculados. Nota-se que todas as proteções são fixas.

TAB. 5: Planilha com classificações de temperatura do ar externa em função da Temperatura Neutra para Belo Horizonte no período de um ano normal.

Tn-8	16,8	16,9	16,8	16,2	15,8	15,4	15,3	15,6	16,19	16,5	16,6	16,6
Tn-7	17,8	17,9	17,8	17,2	16,8	16,4	16,3	16,6	17,2	17,48	17,6	17,6
Tn-6	18,8	18,9	18,82	18,2	17,8	17,4	17,3	17,6	18,2	18,5	18,6	18,6
Tn-4	20,8	20,9	20,8	20,2	19,8	19,4	19,3	19,57	20,2	20,5	20,6	20,6
Tn	24,8	24,9	24,8	24,2	23,8	23,4	23,3	23,6	24,2	24,5	24,6	24,6
Tn+1	25,8	25,9	25,8	25,2	24,82	24,4	24,3	24,6	25,2	25,5	25,6	25,6
Tn+2	26,8	26,9	26,8	26,2	25,8	25,4	25,3	25,6	26,2	26,5	26,6	26,57
Tn+3	27,8	27,9	27,822	27,2	26,8	26,4	26,3	26,6	27,19	27,5	27,6	27,6
Tn+4	28,8	28,9	28,8	28,2	27,8	27,4	27,3	27,6	28,2	28,5	28,6	28,6
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
06:00	18,8	19,0	18,80	17,3	15,0	13,4	13,1	14,4	16,20	17,50	18,2	18,4
07:00	19,5	19,7	19,5	18,0	15,77	14,2	13,9	15,2	17,0	18,2	18,9	19,0
08:00	21,1	21,4	21,2	19,7	17,6	16,2	15,9	17,3	18,8	19,9	20,4	20,5
09:00	22,8	23,2	23,0	21,7	19,7	18,4	18,0	19,60	20,9	21,9	22,2	22,2
10:00	24,3	24,8	24,6	23,3	21,5	20,2	19,9	21,5	22,7	23,5	23,7	23,7
11:00	25,6	26,1	25,9	24,6	22,9	21,8	21,4	23,1	24,1	24,8	24,9	24,8
12:00	26,8	27,3	27,1	26,0	24,4	23,3	22,9	24,7	25,6	26,2	26,1	26,0
13:00	27,2	27,7	27,5	26,4	24,79	23,7	23,34	25,2	26,0	26,6	26,5	26,3
14:00	28,0	28,6	28,4	27,25	25,7	24,7	24,31	26,2	26,9	27,4	27,3	27,1
15:00	28,2	28,8	28,6	27,5	26,0	25,0	24,6	26,5	27,20	27,7	27,5	27,3
16:00	27,82	28,4	28,2	27,1	25,6	24,54	24,1	26,0	26,8	27,3	27,1	26,9
17:00	27,4	28,0	27,816	26,7	25,1	24,1	23,7	25,5	26,3	26,9	26,8	26,59
18:00	26,8	26,8	27,1	26,0	24,4	23,3	22,9	24,7	25,6	26,2	26,1	26,0

Fonte: adaptado de Pereira (2008) por Guidi (2009).

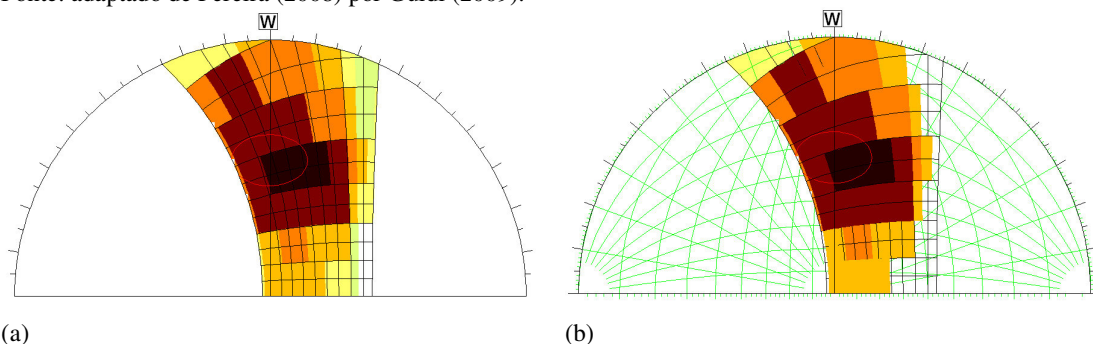


FIG. 7a: Etapas para definição gráfica de proteções solares pelo método da Tn. Exemplo para fachada Oeste, latitude de Belo Horizonte (20° S).

3.4 Avaliação pelo método prescritivo do RTQ: critério iluminação

Para obtenção da classificação de nível de iluminação, a altura do plano de trabalho foi estabelecida em 0,7m. As refletâncias de superfícies foram identificadas, sendo a do teto branco de 90%, do piso de cor cinza de 30% e das paredes de cor branca de 90%. A partir da NBR 5413- Iluminância de Interiores (ABNT, 1992) foram definidos o tipo de atividade predominante (leitura/terminais de vídeo), as características da tarefa (velocidade e precisão

importantes; refletância do fundo de tarefa superior a 70%) e características do observador (idade entre 40 e 55 anos). Combinando-se estes dados da NBR, a iluminância de projeto (E_p) foi definida em 300lux.

Constam no projeto luminotécnico o conjunto de luminária com refletor e aletas de alumínio para duas lâmpadas T5 de 28W. Especificações de fluxo luminoso de lâmpadas e de potência de reatores não foram encontrados no projeto original. Por isto, foi avaliado o uso de lâmpadas de 2400 lm e 2900 lm, além de reatores para duas lâmpadas com potência total de 62W e 65W. O uso de luminária sem aletas também foi avaliado. Verificou-se se o nível de iluminância do ambiente em análise está em conformidade com a NBR 5413. A combinação que gerou a melhor classificação para o ambiente foi assumida como a final.

A classificação geral do edifício não foi obtida porque as condições de tempo de pesquisa foram insuficientes para o levantamento e tratamento de dados de todos os ambientes. Desta forma, foi obtida apenas a classificação do ambiente em estudo.

Os dados utilizados e os resultados obtidos são apresentados no Apêndice B.

3.5 Avaliação por simulação computacional

A avaliação por simulação computacional do desempenho termoenergético do ambiente seguiu a metodologia do RTQ em todos os aspectos em que era aplicável, a começar pela escolha dos *softwares*. Foram escolhidos o *EnergyPlus* e o *DesignBuilder*, *softwares* detalhados no item 3.5.1. Conforme as características deste último programa foram construídos os protótipos (item 3.5.2), os quais foram submetidos à simulação (item 3.5.3).

3.5.1 Escolha dos softwares

Foi escolhido o *EnergyPlus* por ele ter sido o mesmo *software* usado para a determinação das equações de cálculo de IC no RTQ. Além disso, a versão 3.0.0.028 utilizada apresenta as características mínimas exigidas pelo Regulamento.

Com o interesse de se simplificar as análises, buscou-se um programa no qual os protótipos pudessem ser criados e visualizados em modo gráfico para, posteriormente, serem rodados no *EnergyPlus*. Foram testados duas opções de programas com esta capacidade, o *DesignBuilder* e o *EnergyDesignPlugin*. Por fornecer as saídas desejadas das simulações diretamente na forma de gráficos e tabelas, o que facilita a análise de resultados, o *DesignBuilder* foi escolhido.

A versão do *DesignBuilder* submetida à ASHRAE Standard 140 demonstrou nos testes realizados que o uso do *software* combinado ao *EnergyPlus* gera resultados idênticos aos produzidos pelo uso independente deste último (DESIGNBUILDER, 2006). No entanto, esta versão avaliada foi a 1.2, anterior às que são usadas neste trabalho: 1.8.1.001 e versões beta subsequentes: 1.9.2.027, 1.9.9.001, 1.9.9.006. Os desenvolvedores do *software* informam que esta característica de alinhamento de resultados permanece nas versões subsequentes à 1.2 e que a futura versão 2.0 será submetida à avaliação da ASHRAE. Por isto, a escolha deste *software* foi mantida.

O *DesignBuilder* possui uma biblioteca de arquivos climáticos baseada em banco de dados fornecido pelo Departamento Americano de Energia (U.S.DOE), o que está conforme o RTQ. Oferece duas opções para a cidade de Belo Horizonte: arquivo climático de dados Pampulha e Tancredo Neves, cujos dados foram obtidos em estações meteorológicas localizadas nestes aeroportos. Foi escolhida a primeira, em formato TMY3, por considerá-la mais representativa da zona urbana de Belo Horizonte. Um terceiro arquivo climático poderia ter sido importado para uso no *software*. Ele foi montado em formato TRY com dados de estação localizada no 5º Distrito de Meteorologia de Belo Horizonte, mais próxima ao local previsto para construção do edifício, mas foi dispensado por ainda não ter sido avaliado pelo laboratório de referência como pede o RTQ.

3.5.2 Modelagem do ambiente

Os protótipos foram montados com a versão 1.9.2.027 beta do *DesignBuilder*. O procedimento de modelagem tridimensional foi antecedido por algumas etapas. Dentre elas, a de zoneamento do ambiente e preparação do desenho de referência em formato .dxf. Os dados para composição dos materiais e elementos construtivos no *software* também foram

levantados previamente, bem como os padrões de ocupação, de uso de equipamentos, do sistema de iluminação e de condicionamento de ar.

Os materiais especificados no projeto foram listados e seus dados necessários para a configuração no *DesignBuilder* foram levantados em páginas eletrônicas de fabricantes, na literatura especializada, em normas técnicas, com o uso do *software* Arquitrop (versão 3.0), dentre outros recursos. Com eles foram montadas as bases de dados de materiais e a de componentes construtivos, os “*constructions*”. Parte do trabalho foi facilitada porque o *DesignBuilder* contém uma ampla biblioteca digital com dados de materiais. A esta biblioteca foi incorporada outra, contendo dados de materiais e componentes construtivos brasileiros compostos com dados da ABNT⁴ (PEDRINI, 2009). Quando um dado do material especificado não foi obtido, utilizou-se dado de um material similar. Esta estratégia foi usada no caso da placa cimentícia da fachada opaca, composta de concreto delgado reforçada nas faces por fibra de vidro. Como não havia o dado de calor específico para esta placa, foi adotado um valor próximo ao do concreto e ao de placa cimentícia similar. Pelo mesmo motivo para o piso elevado - composto por malha de elementos de PVC com aplicação de uma massa autonivelante - foram adotados dados de concreto leve. Algumas destas superfícies foram consideradas adiabáticas na simulação e, portanto, não houve necessidade de terem suas propriedades térmicas detalhadas.

Nas fachadas foram testados dois vidros de controle solar que possivelmente serão utilizados no edifício do TJMG.

O primeiro vidro foi escolhido por ser difundido no mercado brasileiro para edificações de maior porte, de acordo com a fabricante Guardian. É este o vidro Silver 20, na coloração verde, nos sistemas duplo insulado e laminado. Os dados foram obtidos através do *software* Thermal Program da Guardian (TAB. 6).

O segundo vidro foi escolhido por ser um duplo insulado baixo emissivo (*low-e*), que permite uma transmissão luminosa superior em relação ao Silver 20. O *low-e* foi selecionado dentre os mais simples disponíveis na biblioteca do *DesignBuilder*.

Também foi testado o vidro duplo comum da biblioteca do *DesignBuilder*.

⁴ Biblioteca desenvolvida no LabCon/UFRN.

TAB. 6: Dados do vidro insulado duplo fornecidos por representante comercial da fabricante Guardian.

Propriedades do vidro	Vidro Silver 20 on Green
Espessura (mm)	24
Transmissão Energética Direta (%)	10
Transmissão Energética Total (%) (CGCS)	28
Reflexão Energética Ext (%)	16
Reflexão Energética Int (%)	34
Transmissão Luminosa (%)	18
Reflexão Luminosa Ext (%)	26
Reflexão Luminosa Int (%)	23
Transmissão Infravermelha Ondas Longas	0
Emissividade Infravermelho Ext	0,837
Emissividade Infravermelho Int	0,406
Condutividade Térmica (W/m ² K)	3,804

Os padrões de uso e as potências de equipamentos, padrão de uso do sistema de iluminação, além dos horários e dias de ocupação foram levantados em entrevista com servidores do TJMG. O ambiente é ocupado por uma pessoa que realiza atividade de escritório, entre 9h e 18h. Os feriados e recessos usuais foram tomados pelo ano-base de 2008, sendo eles o Natal e Ano Novo (recesso entre 20/dezembro do ano anterior a 02/janeiro); Carnaval (04 a 06/fevereiro); Páscoa (21/março); Tiradentes (21/abril); Dia do Trabalho (01/maio); Corpus Christi (22/maio). A iluminação artificial foi configurada para complementar a iluminação natural no intervalo de 9h às 18h; nos demais horários, permanece desligada. O nível de iluminância mínimo do ambiente foi fixado conforme a determinação feita a partir da NBR-5413 (ABNT, 1992). O sistema de ar-condicionado adotado foi o de expansão indireta com fancoletes, funcionando apenas para resfriamento do ambiente com temperatura mantida a 24° C, das 8h às 18h. A infiltração do ar através das aberturas foi considerada nula.

Levando-se em conta os materiais especificados e as características do projeto original foram montados três modelos de elementos construtivos (“*constructions templates*”) para diferenciar os tipos de fechamentos opacos; um “*glazing template*”, modelo para fachada envidraçada e um “*lighting template*”, modelo de iluminação. Os *templates* facilitaram a caracterização dos elementos do ambiente e agilizaram o processo de substituição de dados para análises paramétricas.

Os zoneamentos foram planejados para ser de dois tipos: no protótipo “Zonas térmicas” foram utilizadas multi-zonas térmicas; nas demais, foi utilizada uma única zona. Os zoneamentos são detalhados nos itens 3.5.2.1 e 3.5.2.2.

Após estas etapas preparativas passou-se à criação dos protótipos no *DesignBuilder*. Apesar das fachadas do edifício não serem orientadas exatamente a Norte, Sul, Leste e Oeste, cada

protótipo foi voltado para cada uma destas orientações - respectivamente 0°, 90°, 180° e 270°, as mesmas orientações de fachadas usadas na análise prescritiva da envoltória.

Os protótipos são divididos em dois grupos (FIG. 7). No Grupo 1 são feitas variações nos componentes construtivos da fachada original, a qual permanece sem proteção solar. No Grupo 2 são inseridas proteções solares em um dos protótipos.

O protótipo “Zonas térmicas” é o original do qual deriva os demais modelos. A partir de alteração em sua fachada obteve-se “U-equivalente”. Este foi tomado como representação do projeto original. Com mudanças no tipo de vidro sobre a abertura de “U-equivalente” foram obtidos “Low-e” e “Comum”. Mantendo o tipo de vidro e trocando o componente construtivo do fechamento opaco de “U-equivalente” obteve-se o protótipo “Alvenaria”. Os protótipos citados compõem o Grupo 1.

Para a composição dos protótipos do “Grupo 2” foram inseridas as proteções solares em “Alvenaria”, que além de ter sido definido previamente como o protótipo de referência por representar o sistema de vedação mais utilizado no setor comercial brasileiro (vide Capítulo 2), apresentou o melhor desempenho dentre os modelos do grupo anterior. As proteções foram então estabelecidas com o intuito de verificar a potencial redução complementar no consumo de energia proporcionada por estes dispositivos. Foram feitos os brises “RTQ” e “RTQ-2”, os quais se baseiam no interesse em se obter para a fachada do edifício o menor Indicador de Consumo possível segundo o Regulamento. Foram definidos também brises para cada orientação solar segundo o método da Temperatura Neutra, resultando no conjunto de protótipos “Brise TN”. Com pequena modificação na fachada de “Alvenaria” e obedecendo aos mesmos ângulos e características gerais de “Brise TN”, foram criadas as prateleiras de luz. O vidro das aberturas destas prateleiras foi variado para compor “Prateleira- Controle Duplo”, “Prateleira- Controle e Low-e” e “Prateleira-Laminado”. Nos itens que se seguem são apresentados maiores detalhes sobre a construção e diferenciação dos protótipos.

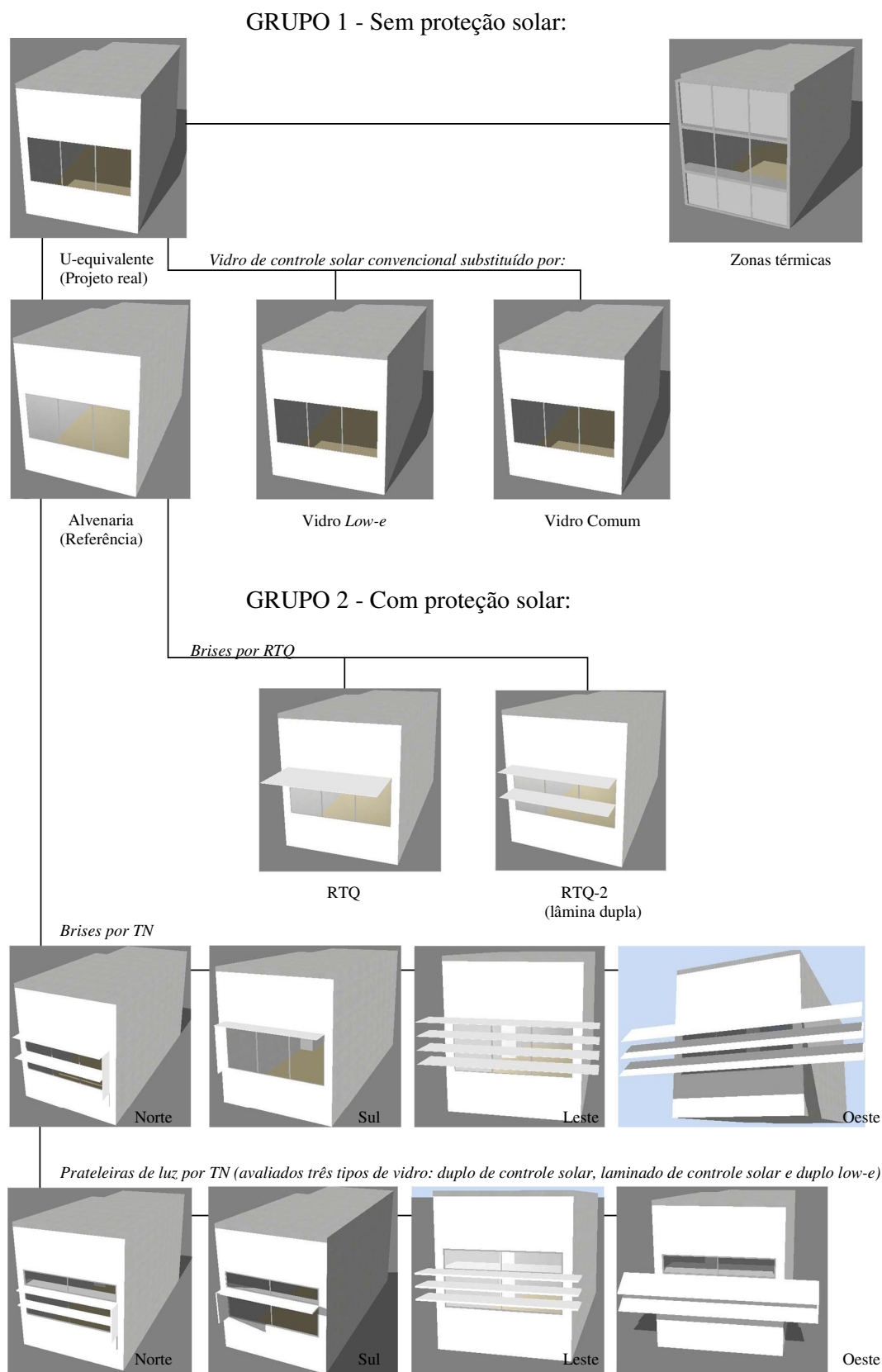


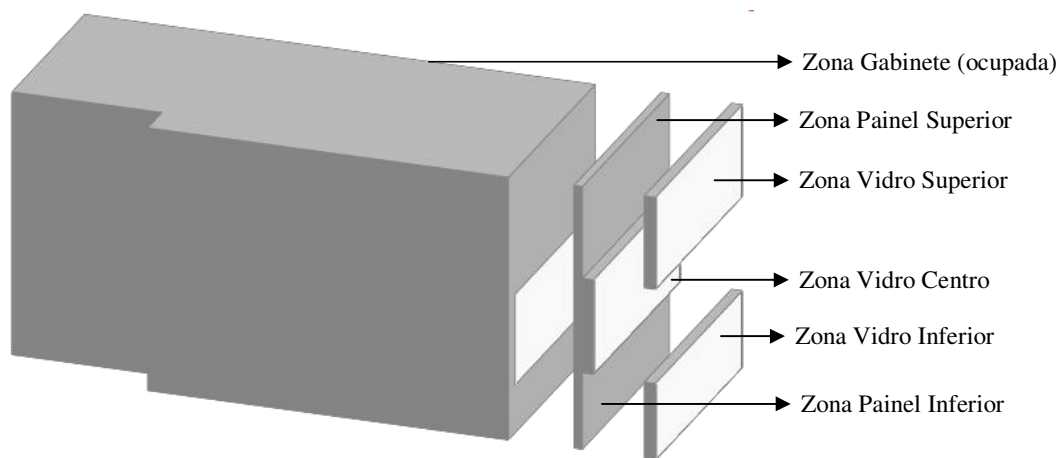
FIG. 7: Esquema geral dos protótipos com respectivas ramificações.

3.5.2.1 Protótipo “Zonas térmicas”

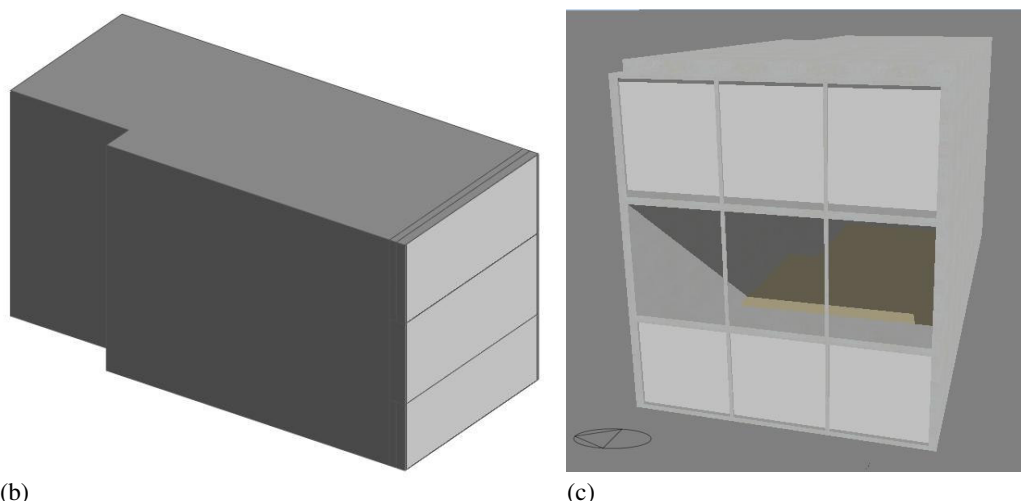
Em “Zonas térmicas” o sistema de fachada em *structural glazing* e placas cimentícias que é proposto no projeto original do edifício foi construído considerando-se cada câmara de ar como uma zona térmica.

Devido às características de criação no *DesignBuilder*, o protótipo foi segmentado em seis zonas:

- “Gabinete”, equivalente ao espaço da sala com ocupação humana e onde se concentra o consumo de eletricidade devido à instalação de equipamentos, de sistema de iluminação e de condicionamento artificial do ar;
- “Painel superior” e “Painel Inferior”, equivalentes à fachada opaca composta pelo sistema de placa cimentícia intermediada por colchão de ar interno (FIG. 8), localizados respectivamente acima e abaixo do vão da abertura;
- “Vidro Superior”, “Vidro Inferior” e “Vidro Centro”, equivalentes à fachada envidraçada subdividida respectivamente em módulos localizado acima, abaixo e no centro do vão da abertura.



(a)



(b) (c)
 FIG. 8: protótipo “Zonas térmicas” destacando em: (a) as multi-zonas térmicas separadas; (b) zonas sobrepostas, preparadas para a simulação; (c) resultado final com renderização para as 16h do dia 15 de janeiro (orientação Oeste).

Na zona “Gabinete” todas as superfícies foram tomadas como adiabáticas, exceto aquelas que estavam em contato com as zonas que caracterizam a fachada. Não foram incluídos no modelo portas e pontes térmicas dos materiais de sustentação do piso elevado e do forro. As zonas “Gabinete” e “Vidro Centro” foram caracterizadas como “*Detailed*”. As demais, como “*cavity*”.

Adotou-se o “*Detailed*” como método de cálculo dos níveis de iluminância interna por luz natural. O tipo de controle de iluminação selecionado é o de regulação contínua. Foi usado o número máximo de fotocélulas permitido pelo *DesignBuilder* para aprimorar a estimativa de redução do consumo com iluminação artificial (duas). Elas foram posicionadas a cada 2,71m ao longo do eixo longitudinal da zona, estando elevadas a 0,7m do piso.

A distribuição solar interna foi definida para quantificação da radiação solar que, transmitida pela área envidraçada, incide e reflete-se em cada superfície interna da zona. A irregularidade no formato em planta do ambiente não foi significativa a ponto de inviabilizar o uso desta configuração nos protótipos.

O vidro aplicado sobre a abertura é o Silver 20 que, como dito, é um tipo de vidro de controle solar convencional, utilizado há mais tempo no mercado brasileiro.

3.5.2.2 Protótipo “*U-equivalente*”

O protótipo “*U-equivalente*” foi criado utilizando-se somente a zona “Gabinete” do protótipo “Zonas térmicas”. O sistema de fachada antes representado por diversas zonas foi reduzido a

uma superfície formada múltiplas camadas, a qual se caracteriza por uma transmitância térmica equivalente. Assim, diferentemente de “Zonas térmicas”, o fenômeno de transferência de calor torna-se função apenas da transmitância térmica da superfície.

Para composição da superfície foi necessário converter propriedades do vidro fornecidas pelo fabricante em dados necessários à configuração deste material no *software*, a saber: calor específico (J/kg.K), densidade (kg/m³), absorptância solar (%), absorptância visível (%) e rugosidade da superfície.

Com informações sobre o vidro Silver 20, dados da literatura especializada (INCROPERA, 1992) e uma análise de parâmetros luminosos e de transmissão infravermelha, foram estimados os dados de absorção do vidro com apresenta a TAB.7. A partir disto, os dados necessários foram definidos como apresentado na TAB. 8.

TAB. 7: Respostas estimadas do vidro Silver 20 ao espectro da radiação solar externa.

Parâmetro	Faixa luminosa (%)	Faixa infravermelha (%)	Faixa ultravioleta (%)	Total (%)
. Transmissão luminosa	8,5	0	1,26	9,8
. Reflexão luminosa	12,3	45,7	1,82	58,0
. Transmissão luminosa e reflexão luminosa (soma)	20,8	45,7	3,1	67,8
. Absorção	26,5	0	3,9	32,2
. Total	47,3	45,7	7,0	100,0

Nota: pela falta de dados na literatura técnica supôs-se que a transmissividade e a reflectividade para a ultravioleta tenham os mesmos valores que os da faixa luminosa. Fonte: Souza (2009b).

TAB. 8: Propriedades do Vidro Silver 20 para configuração do vidro como material de *construction*.

Propriedade	Dado	Fonte do dado
Espessura (mm)	24,00	Projeto técnico
Calor específico (J/kg.K)	750,00	Incropera (1992)
Densidade (kg/m ³)	2500,00	Incropera (1992)
Absortância solar (%)	32,2	Tabela anterior (TAB. 7)
Absortância visível (%)	26,5	Tabela anterior (TAB. 7)
Rugosidade da superfície	Very smooth	Autor
Emissividade (infravermelho ext)	0,837	Fabricante
Condutividade (W/m ² .K)	3804,00	Fabricante

Fonte: Desenvolvida a partir de análise de Souza (2009b).

O Apêndice C apresenta dados de entrada do Protótipo “U-equivalente” usados na simulação no *EnergyPlus*. Todos os demais protótipos foram gerados a partir de alterações em “U-equivalente” e não a partir de “Zonas térmicas”, visto que o Regulamento considera a transmitância térmica equivalente na avaliação de desempenho da envoltória.

A FIG. 9 apresenta a imagem tridimensional do protótipo voltado para Oeste (a) em *wire frame*, destacando-se a simbologia usada para designar as superfícies adiabáticas (setas) e a

posição dos sensores (números 1 e 2 no piso), e em (b), renderizada para as 16h do dia 15 de janeiro.

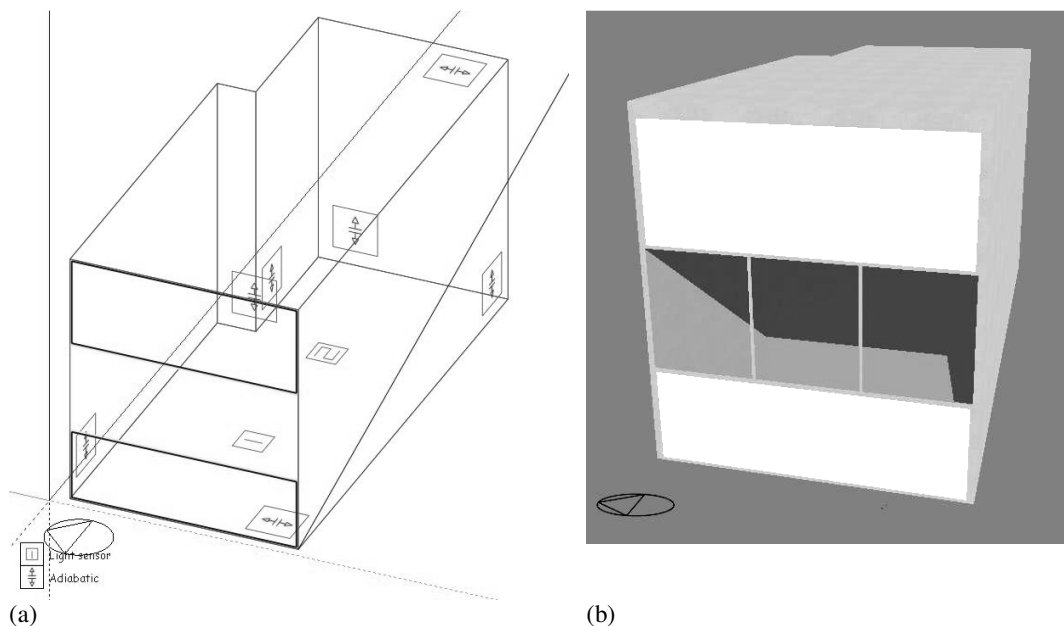


FIG. 9: protótipo “U-equivalente” voltado para Oeste em *wire frame* (a) e renderizada para as 16h de 15 de janeiro (b).

4.5.2.3 Protótipos “Alvenaria”, “Low-e” e “Comum”

Para composição do protótipo “Alvenaria”, o fechamento opaco de “U-equivalente” foi substituído por alvenaria composta de tijolos de 8 furos de 20cm com revestimento em argamassa cimentícia de 2,5cm em ambas as faces, totalizando uma espessura de 25cm. A transmitância térmica calculada pelo *DesignBuilder* foi de $1,613 \text{ W/m}^2\text{K}$. A absorptância das superfícies externas é de 0,3, correspondente a uma cor clara.

Para composição de “Low-e” e “Comum”, o vidro duplo esverdeado de controle solar convencional existente em “U-equivalente” foi substituído por outros de transmissão luminosa superior. No primeiro caso, foi adotado vidro duplo incolor de baixa emissividade (*low-e*) da biblioteca do *DesignBuilder*. No segundo caso, foi adotado vidro duplo incolor comum da biblioteca do *DesignBuilder* (*Clear 6mm/13mm Air*, espessura resultante de 25mm). Detalhes sobre as propriedades desses e de outros vidros utilizados são apresentados mais adiante, na TAB.14.

4.5.2.6 Protótipos com proteções solares

No protótipo “RTQ” são usados brises cujos ângulos geram um Indicador de Consumo mínimo quando aplicados na equação de envoltória do RTQ, sendo eles $AVS=45^\circ$ e $AHS=0^\circ$. Optou-se pela geometria mais simplificada da proteção: lâmina única de 1,55m a partir da fachada, não inclinada, sem afastamento relativo à abertura e fixa. Não há extensão do brise para além da medida horizontal da abertura, ou seja, não há ângulo gama (γ). Seu material é 100% opaco, composto de concreto liso com espessura de 3cm, branco com absorvância de 0,20. Como o Regulamento não estabelece distinção de critérios para as proteções solares dependendo da orientação da fachada na equação de IC, o mesmo tipo de proteção foi aplicado para todas as orientações. O protótipo “RTQ-2” adota os mesmos ângulos, mas usa duas lâminas paralelas de menor extensão, resultando na dimensão de 0,78m. Isto tem como principal objetivo o de se avaliar a sensibilidade do *software* a diferentes geometrias dos dispositivos de proteção solar.

O conjunto “Brise TN” baseia-se na aplicação em “Alvenaria” de brises definidos pelo método da Temperatura Neutra, como descrito no item 4.4.3. As propriedades do material da proteção são idênticas aos de “RTQ” e “RTQ-2”. As dimensões de “Brise TN” são apresentadas no item 5.1.1.4 (Caso 3).

As prateleiras de luz utilizam os mesmos ângulos de “Brise TN”. No entanto, pelas próprias características de instalação de uma prateleira, fez-se necessário alterar o protótipo “Alvenaria” e, neste sentido, a arquitetura do ambiente (FIG.10). A altura do peitoril da janela foi mantida em 105,0 cm. A janela foi subdividida em duas pela prateleira instalada a 210,0 cm de altura, paralelamente ao piso. O segmento inferior ficou com 105,0 cm de altura. A janela superior foi limitada a 60,0 cm, demandando a redução em 15cm tanto da altura do fechamento opaco acima da proteção quanto do forro. Este ficou com 97,0 cm de altura, dimensão que não inviabiliza a passagem das instalações elétricas ou do ar condicionado especificado no projeto original (aparelho de “Teto” instalado sob o forro, próximo à entrada da sala).

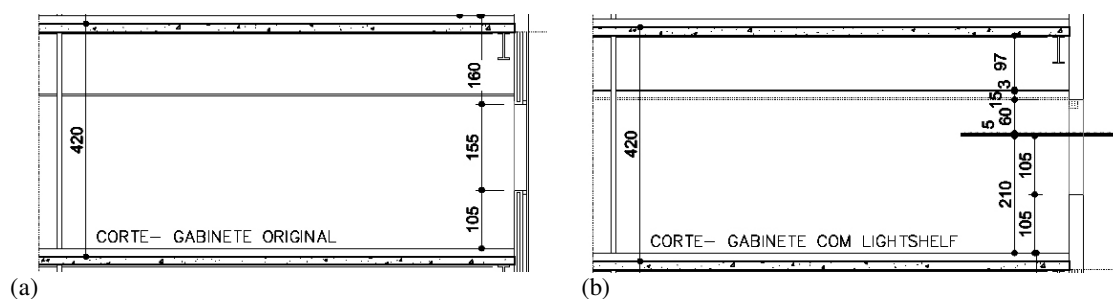


FIG. 10: Corte do ambiente em estudo mostrando em (a) o projeto original e em (b) as alterações que viabilizaram o uso de prateleira de luz (*lightshef*). Dimensões verticais em cm. Nota: as dimensões horizontais da prateleira são apenas ilustrativas. Fonte: Desenvolvido a partir de arquivos digitais do TJMG.

O material das prateleiras tem as superfícies refletoras para um maior aproveitamento da luz natural no interior do ambiente.

As imagens externas das proteções para cada orientação são apresentadas na FIG. 11 com os cortes que configuraram o dimensionamento das proteções horizontais. Observa-se que na orientação Oeste a dimensão interna da prateleira definida por T_n foi considerada demasiadamente grande. Por isto foi limitada em 150,00 cm, fazendo com que os raios solares incidam no ambiente aproximadamente a partir das 17h no verão e das 16h no inverno.

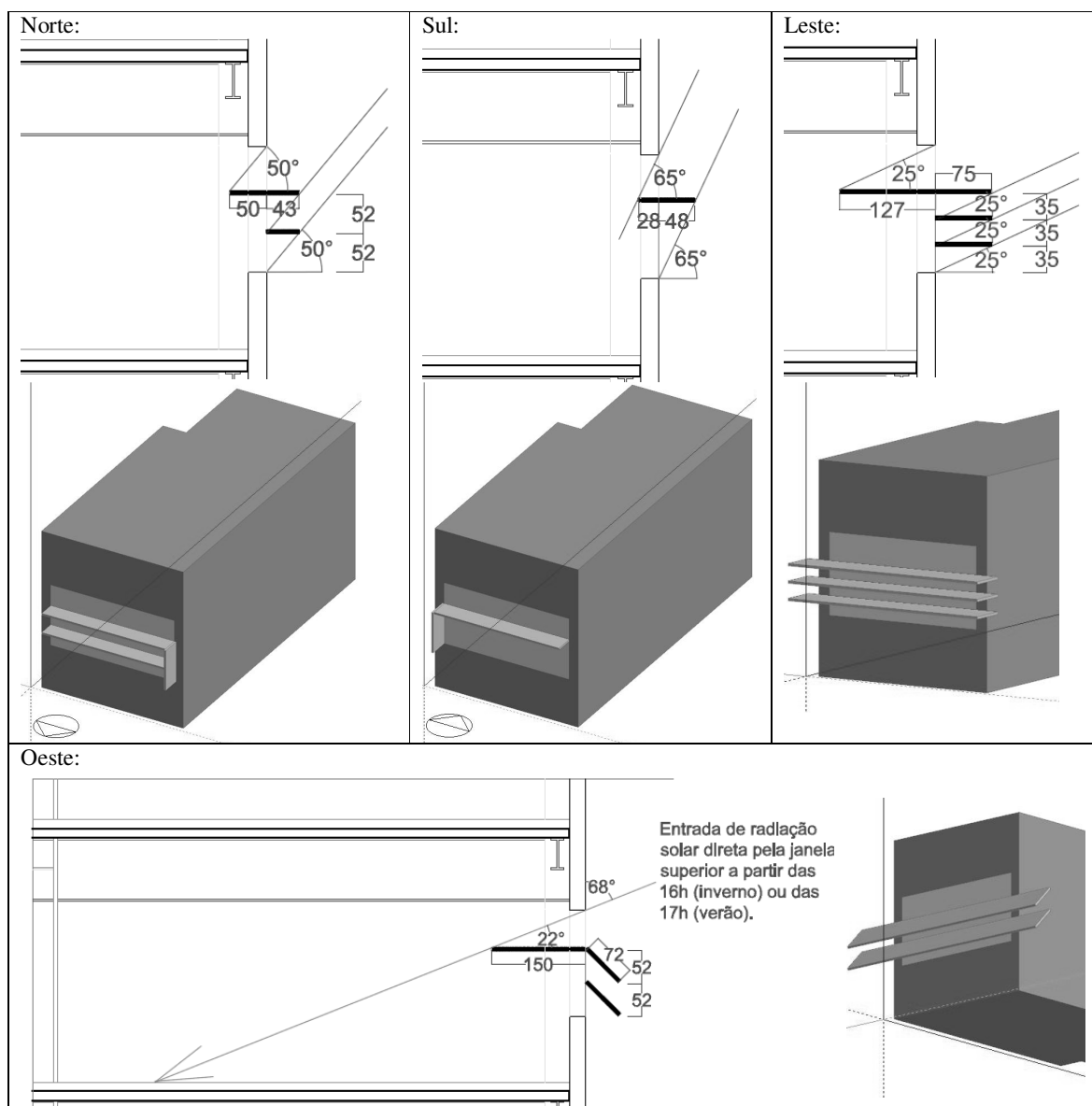


FIG. 11: Imagens externas das prateleiras para cada orientação com cortes esquemáticos mostrando ângulos (em graus) e dimensões (em cm) das respectivas proteções horizontais.

A “Prateleira- Controle Duplo” tem sobre as aberturas o mesmo vidro duplo de controle solar convencional advindo de “U-equivalente”. Em “Prateleira- Controle e Low-e” substituiu-se o vidro da janela superior pelo *low-e*, de maior transmissão luminosa, baseando-se nos resultados relatados por Santos e Bastos (2008) sobre o uso de prateleiras de luz em áreas de planta livre (ver Capítulo 2, Revisão Bibliográfica). Já em “Prateleira- Laminado” o vidro duplo insulado é substituído por vidro laminado de 8mm, também de controle solar convencional, nas duas aberturas.

3.5.3 *Simulação computacional do desempenho termoenergético dos protótipos*

Foram executadas simulações preliminares para observação da confiabilidade do modelo. Elas foram feitas para orientação norte, em dia de céu claro e de clima estável. Para a simulação final, as saídas selecionadas foram ganho de calor pela fachada, consumo de energia elétrica devido à iluminação artificial e consumo de energia elétrica total, todos medidos em kWh, para as quatro orientações das fachadas. Foram solicitados resultados anuais apenas para a zona ocupada (“Gabinete”).

3.6 **Comparação e discussão dos resultados**

A análise dos resultados foi feita em três partes: análise pelo método prescritivo, análise por simulação e comentários gerais sobre os resultados obtidos pelos dois métodos.

As comparações se estruturam em três subpartes. A primeira avalia variações na fachada original, buscando a proposta que apresente o menor consumo médio anual de energia. A segunda analisa os efeitos da inserção de proteções solares sobre a proposta de melhor desempenho encontrada na fase anterior. A terceira traz uma comparação percentual do consumo de energia entre todos os protótipos. Os resultados gerais dos protótipos são apresentados no Apêndice D.

4 O EDIFÍCIO

Neste trabalho é analisado o projeto do Edifício-Sede do Tribunal de Justiça do Estado de Minas Gerais (TJMG). O Edifício será localizado na área urbana central da cidade de Belo Horizonte (19°55'S e 43°56'O, Zona Bioclimática 3). O edifício foi projetado para ser construído entre 2009 e 2013, integrando-se a uma edificação tombada pelo patrimônio histórico municipal. No entanto, em 2008 sua construção foi suspensa pelo TJMG por tempo indeterminado.

Este capítulo se divide em duas partes. Na primeira, são detalhadas as características do edifício. Na segunda, são descritas as características de um de seus ambientes-padrão que foi escolhido para análise.

4.1 O edifício

O edifício possui área total de 136.647,36 m². Destacam-se nele as duas torres externas com onze pavimentos e duas torres internas, de sete pavimentos, revestidas em vidro e em granito. Internamente há um átrio com cobertura envidraçada que possui uma praça de convívio com um espelho d' água (FIG. 12).

Nos seus seis subsolos e térreo se localizam estacionamentos para mais de 1500 veículos, centrais elétricas, auditórios e salões de eventos, lojas, instituições bancárias, lanchonetes, dentre outros. Os pavimentos do segundo ao décimo-primeiro andar são semelhantes em planta. Do 2º ao 7º, os pavimentos têm área construída aproximada de 6.753,00 m²; do 8º ao 11º têm 4.923,00 m². Foram projetados nestes pavimentos ambientes para atividades predominantemente de escritório, além de salas de reunião, áreas técnicas, arquivos, terraços panorâmicos. Os dois últimos pavimentos foram projetados como área técnica. Os perímetros das plantas dos pavimentos são apresentados na FIG. 13.



FIG. 12: Perspectivas do edifício a partir (a) da rua Gonçalves Dias, incluindo prédio tombado no canto inferior esquerdo; (b) da rua Alvarenga Peixoto; (c) do átrio central. Fonte: imagens cedidas pelo TJMG.

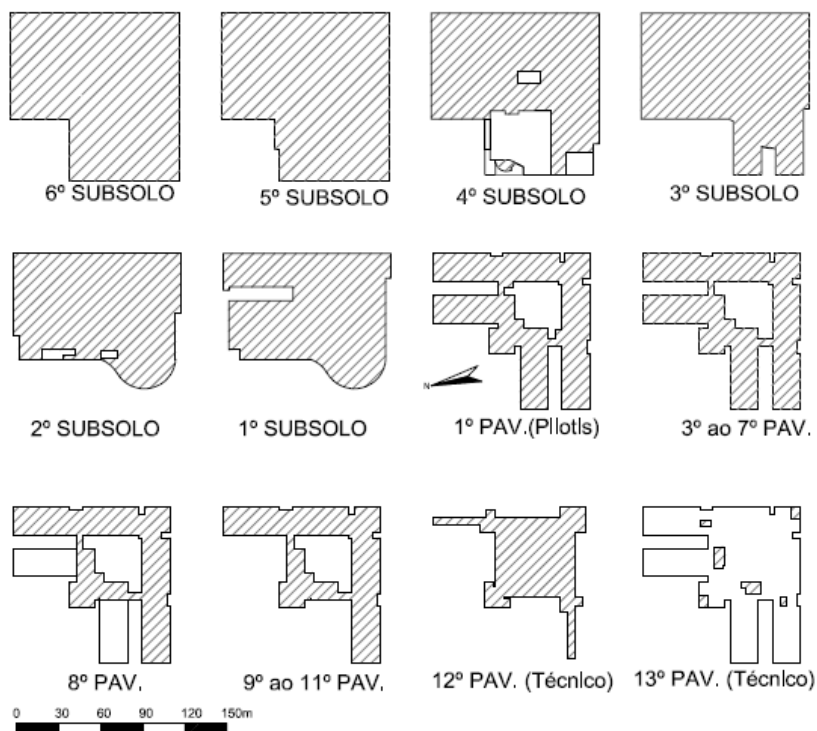


FIG. 13: Perímetro das plantas dos pavimentos. Detalhe para indicação do Norte geográfico no 1° Pav. (Pilotis) e para terraço-jardim no 8° Pav. Fonte: Adaptado de arquivos cedidos pelo TJMG.

Nas fachadas externas predominam o sistema *structural glazing* com vidros verdes e o sistema de fachada aerada com granito de cor cinza médio. No *structural glazing*, o vidro é incorporado em módulos unitizados de três caixilhos de alumínio de 1,3 x 1,4m cada. O vidro é colocado à frente de aberturas ou de um fechamento opaco de placas cimentícias pintadas externamente na cor cinza chumbo. Quando à frente da abertura, o vidro é duplo composto por 6mm de vidro de controle solar verde, camada de ar de 10mm e vidro incolor de 8mm. Quando à frente do fechamento opaco, do qual é afastado cerca de 18cm, o vidro é verde laminado 8mm de controle solar. Na fachada aerada o granito é instalado em *steel frame* a 35cm do fechamento interno, composto de placas cimentícias de 1cm em sistema *drywall*. Para a cobertura são especificados vidro laminado sobre o átrio, terraço-jardim, telha metálica e laje plana impermeabilizada. As áreas em que estes elementos são usados e a orientação do edifício podem ser vistos na FIG. 14. As características detalhadas dos sistemas construtivos da envoltória podem ser visualizadas nas tabelas do Apêndice A, que organizam estes dados para avaliação do edifício segundo o RTQ.

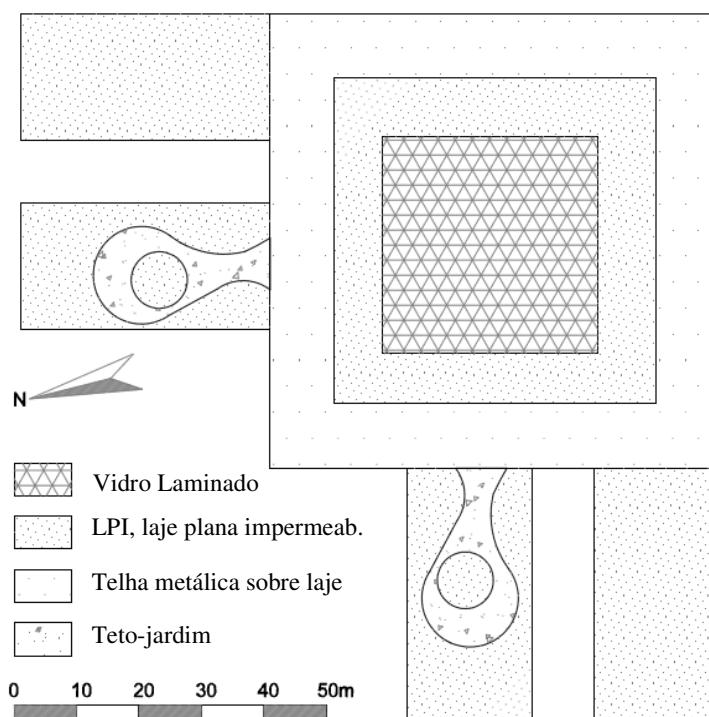


FIG. 14: Diagrama de Cobertura com hachuras indicativas do sistema construtivo adotado. Fonte: Adaptado de arquivos cedidos pelo TJMG.

O edifício foi projetado para ser condicionado artificialmente em quase todas as suas áreas internas, alimentado por energia elétrica em média tensão (13.800 volts) e a gás. Prevê um sistema de co-geração baseado em rejeitos térmicos passível de ampliação futura. Foram

previstos também reservatórios para captação de águas pluviais para atendimento das torres de resfriamento do sistema de ar condicionado e, posteriormente, para uso nos vasos sanitários e nos sistemas de limpeza do edifício.

4.2 O ambiente em análise

O ambiente-tipo em análise tem $29,5\text{m}^2$. Suas maiores dimensões internas são $3,83\text{m} \times 8,13\text{m}$. Tem pé-direito total de $4,02\text{m}$, sendo $2,75\text{m}$ do piso elevado ao forro. Possui única abertura de $3,83\text{m} \times 1,55\text{m} / 1,05\text{m}$ e três portas: uma de acesso ao sanitário privativo, outra para a sala do assessor e outra para a circulação externa também condicionada artificialmente. A FIG. 15 apresenta a planta do pavimento-tipo e destaca um exemplo deste ambiente-padrão com layout interno e distribuição das luminárias.

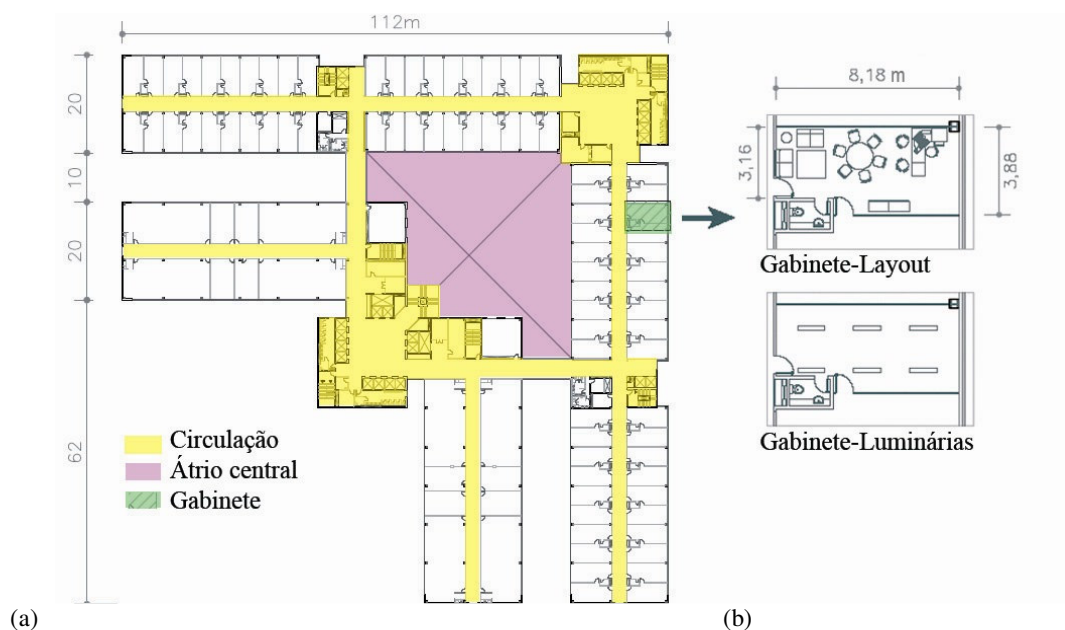


FIG. 15: Plantas do pavimento-tipo e do ambiente em análise: (a) Planta do pavimento-tipo mostrando o átrio central, as circulações e o ambiente de análise repetido ao longo das torres externas; (b) Planta do ambiente-tipo em análise com layout e, abaixo, demonstrando a distribuição das luminárias. Ambas sem escala, com medidas em metros. Fonte: Adaptado de arquivos cedidos pelo TJMG.

O ambiente foi projetado para funcionar condicionado artificialmente como gabinete de desembargador.

Este ambiente em suas várias orientações e andares contabiliza $12.093,00\text{m}^2$. É encontrado do 6º ao 11º pavimentos, mas há previsão de que seja instalado nos pavimentos inferiores com

o crescimento do número de juízes. Representa cerca de 17,5% da área útil do edifício e cerca de 9% da área total do prédio, podendo, portanto, os resultados obtidos de algumas análises referente a ele serem extrapolados para uma parte significativa da edificação.

4.2.1 Sistema Construtivo

No projeto arquitetônico, o ambiente é separado de outras salas e da circulação por paredes de sistema *drywall* de 12cm. As paredes que o separam do sanitário são de bloco de concreto celular autoclavado de 10cm revestidas por 15mm de argamassa de cimento. Suas portas são em chapas de fibra de madeira. Todas as paredes recebem internamente pintura em cor clara.

O sistema da fachada é composto por módulos unitizados instalados à frente da abertura ou do fechamento opaco (FIG. 16). Alguns dos módulos se abrem para permitir entrada de ventilação natural. Este sistema de fachada é composto por camadas de vidro laminado, câmara de ar e duas placas cimentícias na parte opaca. Os vidros laminados são afastados das placas por cerca de 18 cm. As duas placas cimentícias paralelas são por sua vez intermediadas por câmara de ar. A face externa das placas recebe pintura na cor cinza chumbo (absortância de 0,8). Sobre a abertura é especificado vidro insulado duplo de controle solar.

O teto do ambiente é formado por laje de concreto com forma de aço incorporada com nervura de altura de 50 mm e altura total de 145 mm. A laje apóia-se em estrutura de vigas de aço revestidas de argamassa projetada a base de gesso e fibras, além de pilares de aço revestidos em concreto, pintados em cor clara. Segue-se um colchão de ar de 112 cm e um forro removível em placas de fibra mineral com espessura de 1,5cm e refletância de 90%.

O piso é formado pela mesma laje de concreto do teto, colchão de ar de cerca de 13,5 cm, sistema de piso elevado monolítico de 15 mm revestidas em carpete de espessura 2mm na cor cinza médio.

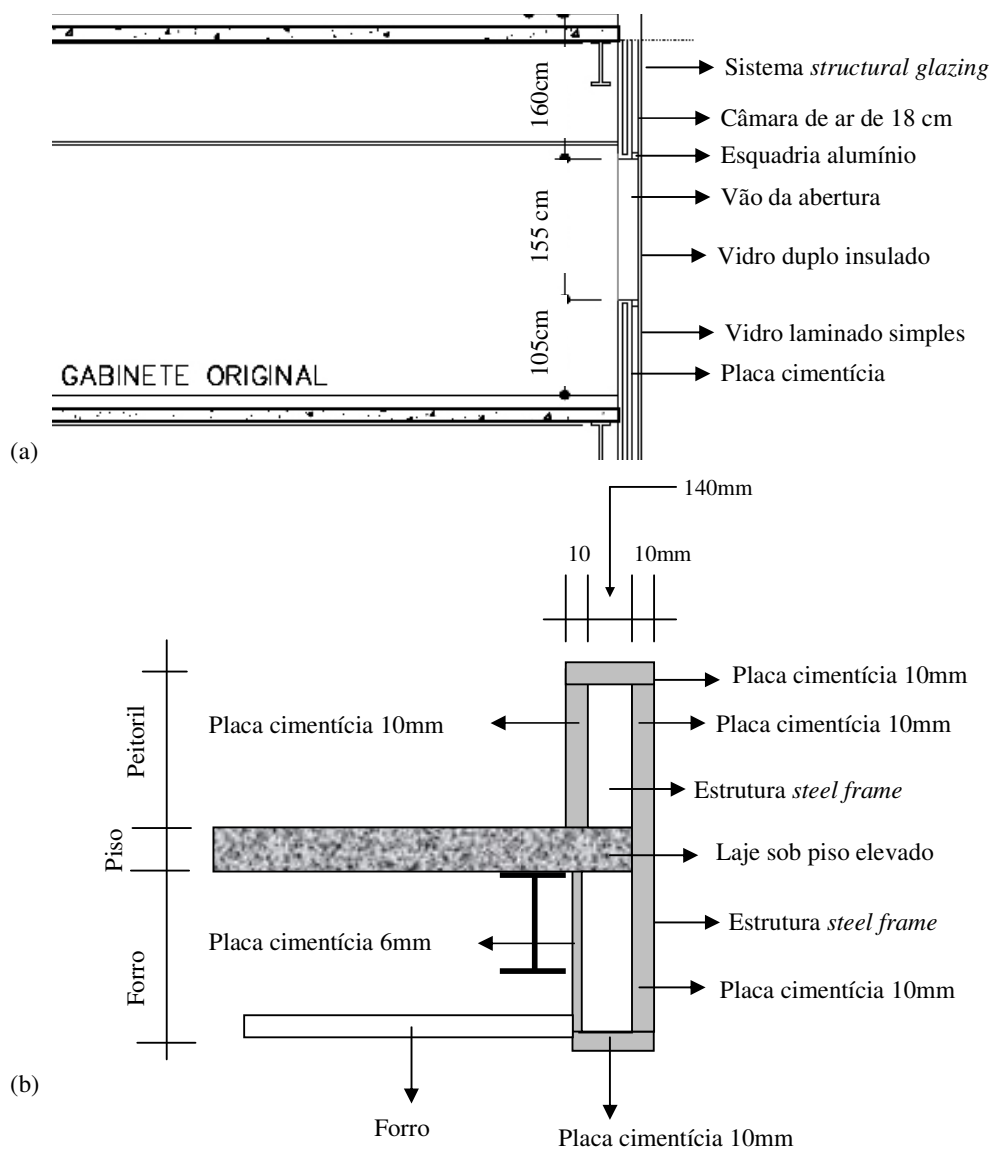


FIG. 16: Corte parcial do ambiente em análise (Gabinete) destacando: (a) o sistema de fachada original, em cm; e (b) o sistema de placa cimentícia, em mm. Ambos sem escala. Fonte: Adaptado a partir de arquivos do TJMG.

4.2.2 Sistema de Iluminação

No projeto foram especificadas “luminárias de embutir para duas lâmpadas fluorescentes de 28W/ 220V com corpo em chapa de aço tratada e pintura na cor branca; refletor e aletas parabólicas em alumínio anodizado de alto brilho e ótimo controle de ofuscamento”, além de reatores eletrônicos. As luminárias são longilíneas de 195x32cm, distribuídas em 2 colunas e 3 linhas. Entre as colunas há uma distância de 1,26m e entre as linhas de 1,67m. O projeto original não declara qual o nível de iluminância pretendido para o ambiente.

Há um dispositivo de controle manual localizado junto à porta de entrada para acionamento das luminárias. A fileira mais próxima à janela possui acionamento independente para favorecer o aproveitamento de luz natural, no entanto as luminárias são posicionadas perpendicularmente em relação à abertura, o que não é a posição mais indicada para este aproveitamento. Não é previsto nenhum sistema de controle que integre a iluminação natural e artificial para permitir que esta seja usada apenas como complementação à primeira.

4.2.3 Sistema de condicionamento de ar

A climatização do ambiente é feita por climatizadores individualizados (fancoletes).

A renovação de ar ocorre por fan-coils instalados no ambiente, do tipo “Cassete” ou “Teto”, de modo que o ar seja captado na cobertura e conduzido por shafts antes de ser filtrado e resfriado por eles. O acionamento e controle dos fan-coils é feito através de termostatos instalados junto aos climatizadores nos ambientes. O insuflamento do ar é feito pelo forro. Pequenos dutos, apenas para a renovação do ar, são instalados acima do forro. Pontos de água são disponibilizados para alimentar o sistema.

As condições internas são mantidas a 24°C (TBS), mais ou menos 2°C, com umidade relativa de 50%. O sistema não funciona para aquecimento no inverno. A taxa de renovação do ar é fixada em 27,0 m³/h pessoa.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Avaliação de estudo de caso pelo método prescritivo do RTQ

5.1.1 Envoltória

A TAB. 9 apresenta os valores encontrados e a classificação final dos três casos de envoltória propostos para análise pelo RTQ, a saber:

- Caso 1: Envoltória original (a ser tratado no item 5.1.1.2)
- Caso 2: Envoltória original com brises calculados por IC_{mín}. (item 5.1.1.3)
- Caso 3: Parcela em *structural glazing* da fachada substituída por alvenaria e inclusão de brises calculados por T_n (item 5.1.1.4).

Percebe-se pela TAB.9 que nos dois primeiros casos a classificação da envoltória é “C” e no último “A”.

TAB. 9: Valores dos parâmetros e classificações resultantes dos Casos 1, 2 e 3.

Caso	Pré-requisitos: Transmitância		Absortância		Zenital		Clas	Equação de IC:				Clas. Final
	Up _{par} W/m ² K	U _{cob} W/m ² K	Parede	Teto	PAZ %	FS		AVS (°)	AHS (°)	IC _{env}	Clas.	
1	2,33	0,60	0,42	0,48	14,14	0,65	C	0	7,32	34,72	A	C
2	2,33	0,60	0,42	0,48	14,14	0,65	C	45	7,32	20,11	A	C
3	2,04	0,60	0,37	0,40	5,00	0,30	A	55,54	19,47	18,51	A	A

O Apêndice A traz tabelas com os dados completos do edifício que foram utilizados para a classificação nestes três casos. Antes de se passar ao detalhamento dos casos, porém, a seguir é apresentado o resultado do estudo de comportamento da equação de IC.

5.1.1.1 Comportamento da equação de Indicador de Consumo

O estudo do comportamento da equação de Indicador de Consumo para o edifício do TJMG foi feito a partir da análise paramétrica de características do edifício, cujas variações são apresentadas na TAB. 10. Em negrito estão os dados reais do edifício. A última coluna apresenta a classificação obtida.

Verifica-se pela equação que acréscimos experimentados em PAF_t fazem a classificação da envoltória ir da máxima à mínima, ou seja, de “A” a “E”.

As variações em FS são menos impactantes, reduzindo a classificação de “A” a, no máximo, “B”. Esta redução no IC é obtida quando o FS é superior a 0,73.

Variações em AVS não influenciam na classificação da envoltória, que seria sempre “A” independentemente do valor deste parâmetro – ou seja, independentemente da existência e/ou das características de brises horizontais sobre as aberturas.

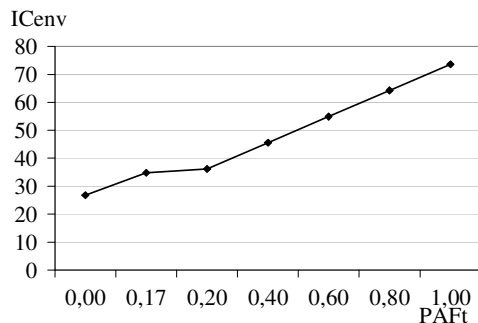
Já as variações em AHS fazem a classificação mudar de “A” a “C”. A classificação máxima “A” é obtida sem uso de proteção vertical. Um AHS entre 9,7° e 49,3° resulta na classificação “B”; a partir deste último valor, “C” é obtido.

Aplicando-se os dados de projeto original do edifício à equação (PAFT=0,17; FS=0,65; AVS=0; AHS=7,32), tem-se que o nível de eficiência da envoltória é “A”.

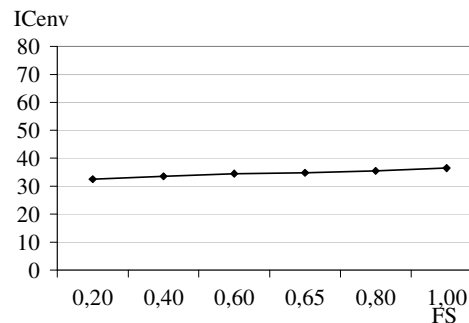
TAB. 10: Variações experimentadas em PAFT, FS, AHS e AVS e respectivas classificações alcançadas.

PAFT (PJF)	FS	AVS	AHS	ICenv	Classificação
0,00	0,65	0	7,32	26,77	A
0,17	0,65	0	7,32	34,72	A
0,20	0,65	0	7,32	36,14	B
0,40	0,65	0	7,32	45,52	C
0,60	0,65	0	7,32	54,89	D
0,80	0,65	0	7,32	64,26	E
1,00	0,65	0	7,32	73,64	E
0,17	0,20	0	7,32	32,55	A
0,17	0,40	0	7,32	33,52	A
0,17	0,60	0	7,32	34,49	A
0,17	0,65	0	7,32	34,74	A
0,17	0,80	0	7,32	35,47	B
0,17	1,00	0	7,32	36,44	B
0,17	0,65	0	7,32	34,74	A
0,17	0,65	10	7,32	31,54	A
0,17	0,65	20	7,32	28,34	A
0,17	0,65	30	7,32	25,14	A
0,17	0,65	40	7,32	21,94	A
0,17	0,65	50	7,32	18,74	A
0,17	0,65	0	0	33,51	A
0,17	0,65	0	7,32	34,72	A
0,17	0,65	0	10	35,19	B
0,17	0,65	0	20	36,87	B
0,17	0,65	0	30	38,55	B
0,17	0,65	0	40	40,23	B
0,17	0,65	0	50	41,92	C

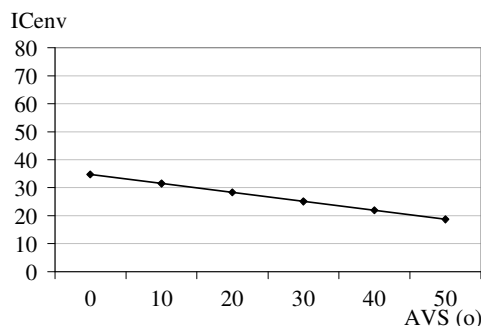
Com os dados da TAB. 10 foi produzido o conjunto de GRAF.3. Observou-se que um aumento de PAFt gera aumento de ICenv (GRAF. 3a). O mesmo acontece com FS (GRAF. 3b) e o inverso ocorre com AVS (GRAF. 3c). Estes resultados eram esperados, dadas as condições climáticas do local no qual o edifício se insere. Por outro lado, um aumento de AHS gera também um aumento em ICenv (GRAF. 3d), contradizendo a expectativa de que proteções solares verticais reduzem o consumo tendo-se em vista o clima e latitude locais.



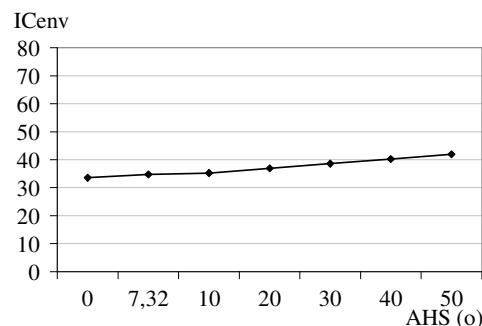
(a) ICenv x PAFt



(b) ICenv x FS



(c) ICenv x AVS



(d) ICenv x AHS

GRAF. 3: Indicador de Consumo em função de PAFt, FS, AVS e AHS para a edificação do TJMG

5.1.1.2 Caso 1: Avaliação da envoltória original

A TAB. 12 apresenta um resumo dos valores encontrados para avaliação de cada parâmetro no processo de análise de pré-requisitos da envoltória, com as respectivas classificações máximas resultantes. Os dados completos utilizados nas análises estão no Apêndice A.

De acordo com os pré-requisitos a classificação máxima possível para a envoltória é “C”. Já pelo uso da equação de IC a classificação máxima possível para a envoltória é “A”. Combinando-se estes dois resultados, tem-se que a classificação final da envoltória original é “C”.

Nesta fase de avaliação de pré-requisitos os valores de transmitância térmica dos sistemas foram tomados diretamente do caderno de especificação do projeto. Não se sabe, porém, quais foram os métodos de cálculo e os dados usados pela equipe de projeto para definição destes valores. O valor da transmitância térmica de todos os sistemas da cobertura de áreas condicionadas foi fixado em $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$. A transmitância média das paredes externas é de $2,33 \text{ W/m}^2\text{K}$. Portanto, neste pré-requisito a envoltória atende pré-requisito para classificação “A”.

TAB. 12: Resultados de avaliação parcial de pré-requisitos com classificação máxima permitida

Pré-requisito	Dados da Norma NBR 15220-2	Valor calculado do parâmetro	Classificação máxima
Transmitância das coberturas ($\text{W/m}^2\text{K}$)	-	0,60	A
Transmitância das paredes externas ($\text{W/m}^2\text{K}$)	-	2,33	A
Absortância de coberturas não aparentes	Valores mínimos	0,43	C
	Valores médios	0,48	C
	Valores máximos	0,53	C
Absortância de paredes externas	Valores mínimos	0,33	A
	Valores médios	0,42	C
	Valores máximos	0,51	C
PAZ (%)	-	14,14	B

Quanto à absortância de superfícies, houve dificuldade em se determinar os valores de alguns materiais devido à indisponibilidade deste tipo de dado junto à fabricantes, à inexistência de amostras de materiais para avaliação pelo autor, à indefinição de alguns componentes pela equipe de projeto, à inexistência de características detalhadas destes elementos no caderno de especificação, dentre outros fatores. Tendo-se em conta o processo de desenvolvimento de projetos em nível regional e talvez nacional, acredita-se que esta dificuldade será comum no momento da aplicação de RTQ em outros casos. Toma-se como exemplo no edifício o granito de revestimento externo definido como “Vermelho Capão Bonito”, de acabamento superficial flameado. O valor da absortância foi assumido como 0,74, equivalente à cor vermelha indicada pela NBR 15220-2: Norma de Desempenho Térmico de Edificações-Parte 2 (ABNT, 2005a). Porém, este valor pode não ter sido o mais adequado. Diante desta situação decidiu-se aplicar para alguns materiais os valores mínimos, médios e máximos de absortância obtidos a partir da NBR 15220-2. Os resultados indicam que a cobertura não aparente tem valor médio de absortância superior a 0,4 mesmo usando-se dados mínimos de absortância encontrados na Norma. Assim, por este pré-requisito o edifício só pode ter classificação igual ou inferior a “C”. No caso das paredes externas, a envoltória pode chegar à classificação “A” desde que usados materiais que possuam as absortâncias com os valores mínimos. Para as análises comparativas em relação à fachada de alvenaria (item 5.1.1.4), assumiu-se o resultado

advindo de valores médios como sendo o resultado final da absorptância das paredes externas do edifício.

O PAZ encontrado foi de 14,14%. Isto limita a classificação da envoltória ao nível “B”, pois o RTQ determina que em um PAZ superior a 5% a análise seja feita por simulação computacional para que o edifício seja elegível a “A”. Como colocado previamente, esta simulação completa não foi feita.

5.1.1.3 Caso 2: Avaliação da envoltória original com proteções solares externas (brises) cujos ângulos AVS e AHS geram um Indicador de Consumo mínimo.

Aplicados os valores de $AVS=45^\circ$ e $AHS=0^\circ$ diretamente na equação, tem-se um IC_{env} mínimo de 18,86. Para considerar a influência da geometria do edifício tais ângulos foram aplicados às aberturas do edifício e os ângulos médios resultantes por fachada foram recalculados. Obteve-se ao final um AVS de 45° e um AHS de $7,32^\circ$, os quais produzem um IC_{env} de 20,11. Como antecipado pela análise do comportamento da equação de IC_{env} (item 5.1.1.1), a inclusão destes ângulos não afetou a classificação parcial da envoltória, que continua atingindo o nível “A”.

5.1.1.4 Caso 3: Envoltória modificada com sistema de fachada em structural glazing substituído por alvenaria e inclusão de proteções solares calculadas pelo método da Temperatura Neutra.

Foram feitas alterações nos componentes da envoltória para obter a classificação “A” em todos os pré-requisitos, objetivo que foi alcançado.

Embora não fosse necessário reduzir mais a transmitância das paredes externas, o sistema de fachada em *structural glazing* sobre placas cimentícias foi substituído por alvenaria na intenção de que seu desempenho termoenergético fosse otimizado. A transmitância média (U_{par}) passou de $2,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ para $2,04 \text{ W/m}^2\text{K}$.

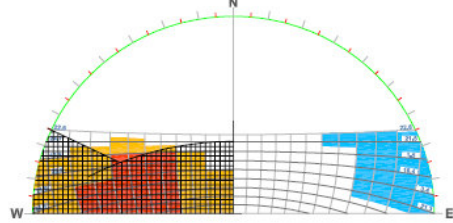
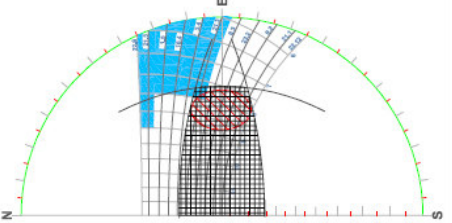
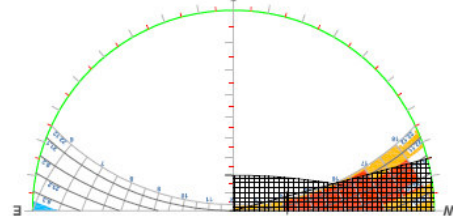
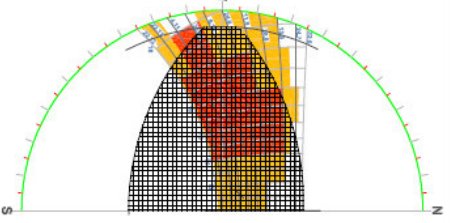
Adotou-se a absorptância de 0,30 para o sistema de alvenaria, equivalente ao uso de cor clara na superfície. A absorptância média total das paredes externas foi alterada. Observou-se que a

classificação “A” se torna possível apenas quando este valor de 0,3 é combinado aos valores mínimos da NBR 15220-2 para os demais materiais.

O valor da transmitância térmica dos sistemas da cobertura de áreas condicionadas não foi alterado. Quanto às coberturas das áreas não aparentes, a estratégia escolhida foi a redução da absorvância de 0,65 para 0,60 do sistema aplicado proporcionalmente na maior área de cobertura, a laje plana impermeabilizada (apresentada na FIG.9 como LPI). Para tanto, foi proposto que parte da superfície da laje receba pintura branca. Para obtenção de “A” foi necessário também adotar para os demais sistemas de cobertura os valores mínimos de absorvância da NBR 15220-2.

Assumiu-se um novo PAZ de 5% com fator solar de 0,30 para o edifício. Foi proposto que parte da cobertura do átrio central fosse eliminada. Esta proposta de redução da área de zenital é a única que interfere significativamente na concepção do projeto arquitetônico original.

As máscaras de sombra que definiram as proteções solares segundo o método de T_n , bem como as respectivas dimensões destas proteções, são apresentadas na FIG. 17.

Orientação Máscara	Fachada Norte					Fachada Leste				
										
Ângulo (°)	α	βd	βe	γd	γe	α	βd	βe	γd	γe
	40		15			65			25	25
Proteção (m)*	1,30		0,50			3,30			0,72	0,72
Orientação Máscara	Fachada Sul					Fachada Oeste				
										
Ângulo (°)	α	βd	βe	γd	γe	α	βd	βe	γd	γe
	20	15				90			45	50
Proteção (m)*	0,56	0,51				Infinito			1,55	1,84

* Dimensões das proteções foram estabelecidas considerando abertura de 1,65 x 3,95 / 1,05 m.

** Correção: α usado na fachada Oeste = 90°; proteção total.

FIG. 17: Máscaras para definição de ângulos de sombreamento AVS e AHS e das respectivas dimensões das proteções segundo o método da Temperatura Neutra para as quatro orientações do edifício. Fonte: Desenvolvido a partir de arquivos do Labcon-EA (UFMG).

A inclusão de proteções solares calculadas pelo método da Temperatura Neutra gerou um AHS de 19,47° e um AVS de 55,54°. No caso deste último, adotou-se o valor máximo de 45° na equação. O percentual de área de abertura na fachada Oeste foi reduzido à zero, visto que a projeção ortogonal do brise proposto para esta orientação encobre a abertura. O Indicador de Consumo então encontrado foi de 18,51, valor inferior ao de ICenv mínimo (20,11).

5.1.2 Sistema de iluminação

A combinação de um conjunto lâmpada-reator de 62W com fluxo luminoso de 2400lm de cada lâmpada gerou o melhor nível de desempenho de iluminação para o ambiente, desde que estes componentes sejam usados com luminárias sem aletas.

De fato, como mostra a TAB. 13, se forem usadas seis luminárias com aletas de alumínio como foi especificado no projeto luminotécnico, as classificações possíveis para o ambiente são “D”, “C” ou “B”. Se forem usadas luminárias sem aletas, as classificações “B” ou “A” são alcançadas.

TAB. 13: Combinações de características de componentes do sistema de iluminação avaliadas com respectivos níveis de iluminância e classificações segundo o RTQ

Luminárias	Potência total do conjunto lâmpada-reator (W)	Fluxo luminoso da lâmpada (lm)	Iluminância produzida (lux)	Classificação pelo RTQ
Sem aletas	62	2400	500	A
		2900	604	B
	65	2400	500	B
		2900	604	B
Com aletas	62	2400	363	C
		2900	438	B
	65	2400	363	D
		2900	438	B

Diante disto, assumiu-se que o ambiente alcança a classificação “A” no critério iluminação. Seguindo a NBR 5413 - Iluminância de Interiores (ABNT, 1992) e considerando o caso em estudo, o peso total dos Fatores Determinantes da Iluminância para o ambiente é de -2, o que implica numa iluminância de 300 lux. Este intervalo corresponde ao estabelecido para as atividades “sala de leitura” e “terminais de vídeo”, e foi tomado como referência. Destaca-se que a atividade caracterizada pela Norma brasileira como “escritório” não foi usada porque estabelece níveis de iluminância entre 750 e 1500lux, valores considerados altos demais para as tarefas típicas do ambiente analisado.

As combinações testadas geram níveis de iluminância entre 363lux e 604lux, todas de acordo com a Norma.

O Apêndice B traz tabelas as características do ambiente e do sistema de iluminação que produziram os resultados de classificação segundo o RTQ.

Registra-se que antes da opção de “retirada” das aletas foi avaliada a redução no número de luminárias. Se usadas cinco, a classificação do ambiente variou entre “D”, “C” e “B” com nível mínimo de iluminância de 302lux. A redução para quatro luminárias gerou essas mesmas classificações com iluminâncias abaixo de 300lux, estando fora de conformidade com a Norma.

Lembra-se que a repetição do processo de avaliação utilizando-se produtos de fabricantes diferentes dos que foram aqui utilizados podem gerar resultados divergentes. Estes resultados devem, portanto, serem analisados com cautela.

5.2 Avaliação de estudo de caso por simulação computacional

5.2.1 Notas sobre o comportamento do software DesignBuilder

O *software DesignBuilder* apresentou algum comportamento inesperado durante o desenvolvimento do trabalho. Os problemas mais significativos envolveram as propriedades dos vidros utilizados, a falta de resposta a comandos e a construção automática de um elemento de concreto em uma das zonas do ambiente.

A TAB. 14 resume as propriedades dos vidros utilizados sobre a abertura de cada protótipo. Como dito no Capítulo de Metodologia, para a configuração de vidros no *DesignBuilder* algumas propriedades destes materiais são solicitados e, a partir destas, os dados usados na simulação são calculados internamente no programa.

Houve divergências entre os dados calculados pelo *EnergyPlus/ DesignBuilder* e os calculados pelo *Thermal Program Guardian*. Tais divergências eram esperadas, visto que métodos de cálculo das propriedades nestes *softwares* podem divergir entre si. Destaca-se que

a transmissão luminosa calculada pelo software *Thermal Program Guardian* para o vidro *Silver 20* é de 0,18, o que deixaria os ambientes mais escurecidos, enquanto o *DesignBuilder* apresentou um valor de 0,505.

TAB. 14: Propriedades dos vidros usados calculadas através do *DesignBuilder*.

Propriedades do vidro calculadas pelo <i>DesignBuilder</i>	Comum	Lam	V20	LowE
Espessura total (mm)	25	8	24	25
Transmissão Energética Total (%) (SHGC)	0,697	0,602	0,481	0,629
Transmissão Luminosa (%)	0,781	0,570	0,505	0,721
Transmitância Térmica ($\text{W/m}^2\text{K}$)	2,708	6,144	2,708	1,949

Legenda:

Comum= Vidro duplo comum 25mm (*Double Clear* 6mm/13mm Air), da biblioteca do *DesignBuilder*.

Lam = Vidro laminado 8mm de controle solar *Silver 20* na coloração verde, da fabricante Guardian.

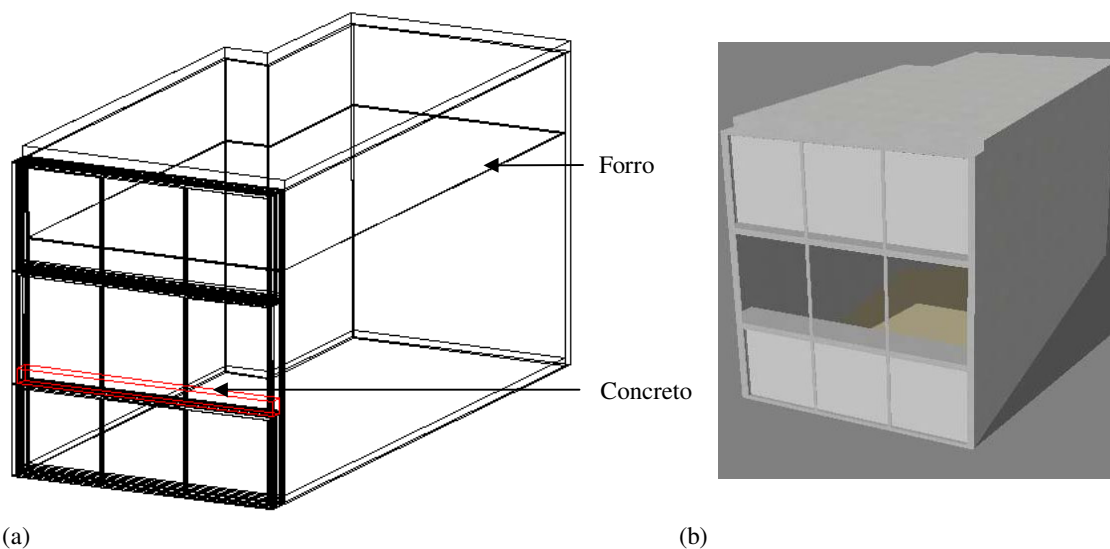
V20= Vidro de controle solar convencional: duplo *Silver 20 on Green* (6mm na coloração verde, face externa/10mm ar/8mm laminado incolor simples, face interna), da fabricante Guardian.

LowE= Vidro duplo *low-e* 25mm (*Double LoE Clear* 6mm/13Air), da biblioteca do *DesignBuilder*.

O *DesignBuilder* traz configurações-padrão que precisaram ser alteradas para desenvolvimento dos protótipos. No entanto, alguma informação residual destas configurações gerou um elemento de concreto no potótipo “Zonas térmicas” (FIG.18a).

Este elemento foi localizado na zona Vidro Centro. Possui 385x21x22cm, transmitância calculada de 2,823 $\text{W/m}^2\text{K}$ e, como sua configuração de cor é próxima à dos elementos adjacentes, sua presença dificilmente é percebida na imagem renderizada do *DesignBuilder* (FIG.18b).

Sua existência consta na planilha de dados do arquivo, exportada em formato .csv, cujo resumo é apresentado na TAB. 15. Porém, o elemento não aparece na tabela de configuração de *constructions* para esta zona (FIG.19), os quais haviam em sua totalidade sido definidos como “*Aluminium window frame*”, ou seja, esquadria de alumínio. Este elemento diminuiu a área de entrada de luz, mas não interferiu nas trocas térmicas porque a superfície à qual pertence foi definida como adiabática.



(a) (b)
FIG. 18: Protótipo “Zonas térmicas” visualizado em .dxf (a) e em renderização no *DesignBuilder* (b).

TAB. 15: Parte da planilha gerada pelo *DesignBuilder* para o Protótipo “Zonas térmicas”, zona Vidro Centro.

Zone: Vidro Centro		
Element	Adjacent condition	Flow path
Floor	Vidro Centro	Aluminium window frame (with thermal break)
Ceiling	Vidro Centro	300mm concrete slab_Reversed
Ceiling	Vidro Centro	Aluminium window frame (with thermal break)_Reversed
Partition	Vidro Centro	Aluminium window frame (with thermal break)
Wall	Outside	Aluminium window frame (with thermal break)
Partition	Gabinete	Aluminium window frame (with thermal break)
Glazing	Outside	Guardian Silver 20-Duplo- Verde 6mm/10mm Air/8mm



FIG. 19: Imagem da tela “Construction” da zona Vidro Centro, Protótipo “Zonas térmicas”. Mostra que todos os elementos opacos estão configurados como “Aluminium window frame”.

Salienta-se que os desenvolvedores do *DesignBuilder* alertam para comportamentos inesperados do *software* nas versões experimentais (beta), como são as aplicadas neste estudo. Em algumas ocorrências o suporte técnico orientou na correção dos problemas que surgiram.

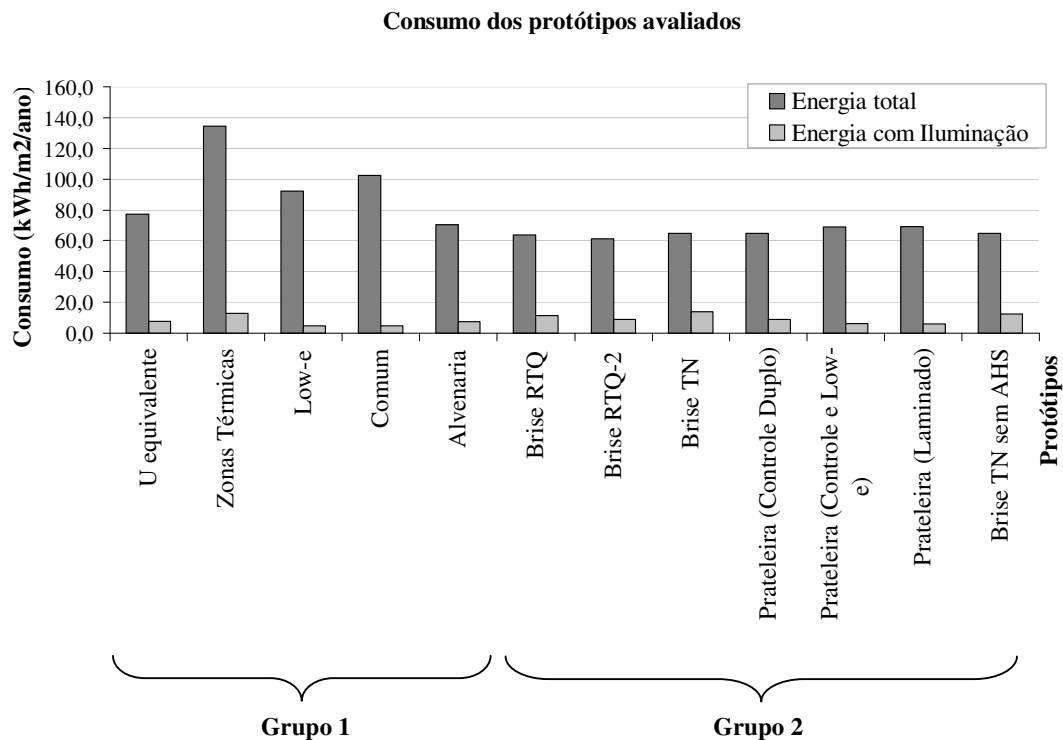
5.2.2 Resultados das simulações

Nos cálculos do *DesignBuilder*, para todos os modelos a carga anual dos equipamentos é de 516,62 kWh (17,5 kWh/m²). Este valor é 1,2 a 3,7 vezes maior que o consumo anual do sistema iluminação artificial dos protótipos. A carga anual devido à presença humana varia conforme o modelo e a orientação solar da fachada, alcançando entre 164,0 a 173,4 kWh (respectivamente 5,6 e 5,9 kWh/m²),.

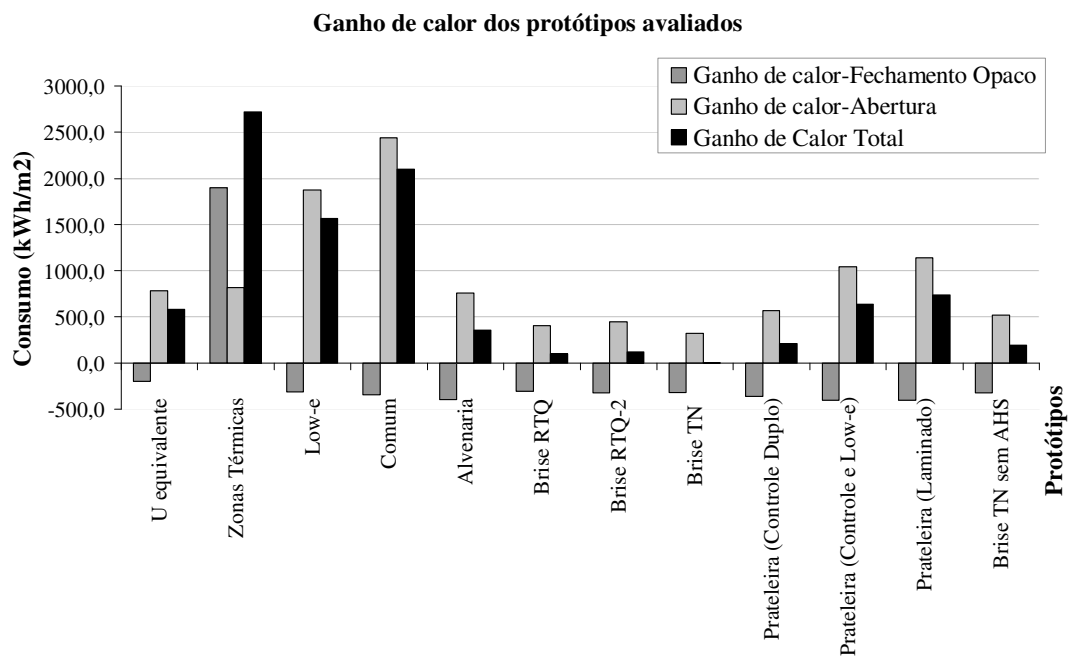
Os resultados gerais das simulações por orientação de fachada de cada protótipo são apresentados no Apêndice. A partir deles foram gerados valores médios por protótipo que constam nos gráficos a seguir.

A partir do GRÁF.4 tem-se que o menor consumo médio total de energia dentre os protótipos foi de 61,2 kWh/m², praticamente a metade do maior valor obtido, o qual foi de 134,5 kWh/m². Observa-se uma proximidade maior no consumo dos protótipos com proteção solar. O consumo com iluminação foi de 4,7 kWh/m² a quase o triplo deste valor, 13,8 kWh/m².

No GRÁF.5 observa-se que o ganho de calor pelo fechamento opaco é sempre negativo e com valores relativamente próximos, exceto no protótipo “Zonas térmicas”. Os ganhos pelo fechamento em geral variam entre cerca de -400 kWh a aproximadamente -200 kWh, enquanto em “Zonas térmicas” o valor é de 1900 kWh. O ganho de calor pela abertura é mais variado e sempre positivo, entre cerca de 320 kWh a 2440 kWh. Por isto, o ganho de calor total pela fachada, que é resultante da soma dos dois ganhos anteriores, também varia muito: fica entre 3,3 kWh (para Brise TN) e 2721,2 kWh.



GRAF. 4: Resultados médios de consumo de energia total e com iluminação de todos os protótipos do ambiente.



GRAF. 5: Resultados médios de ganho de calor pela fachada de todos os protótipos do ambiente.

A análise dos dados revela que nem sempre um menor ganho de calor total ou pela abertura implica em menor consumo de energia. Por exemplo, o ganho de calor total de “Alvenaria” é quase a metade do de “Prateleira-Laminado”, mas o consumo é um 1,6% maior.

A seguir serão feitas análises mais detalhadas reunindo as simulações em Grupos 1, referente aos protótipos sem proteção solar, e Grupo 2, dos protótipos com proteção solar.

5.2.2.1 Grupo 1: protótipos sem proteção solar

5.2.2.1.1 Ambiente projetado: “U-equivalente” x “Zonas térmicas”

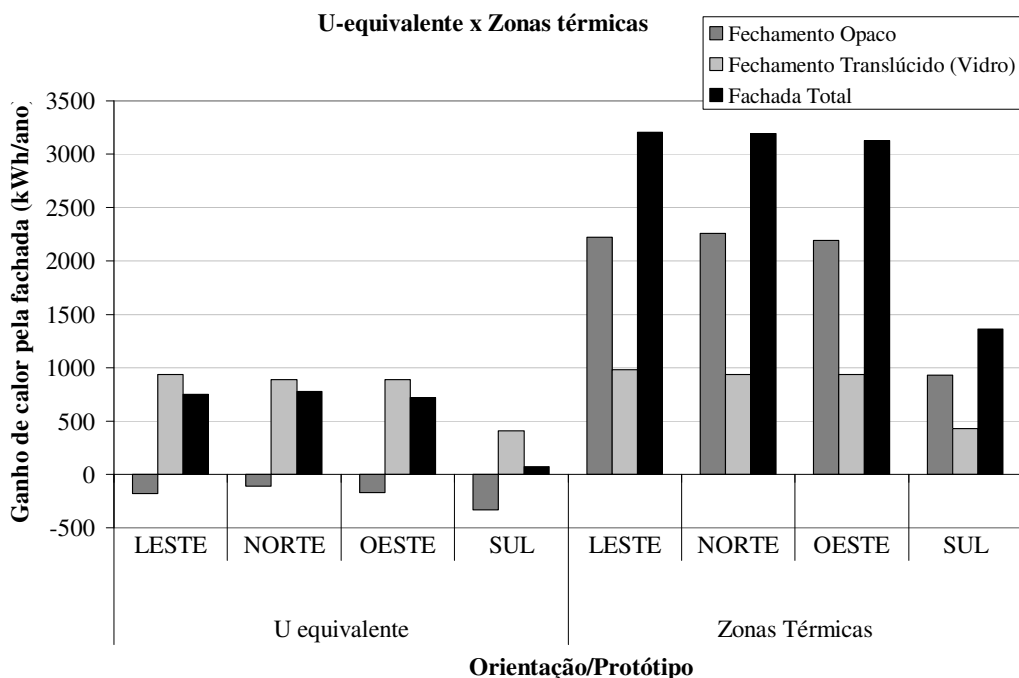
O consumo médio total de energia do protótipo “U-equivalente” ($77,1 \text{ kWh/m}^2$) é quase 74,5% inferior ao de “Zonas térmicas” ($134,5 \text{ kWh/m}^2$). Também o consumo com iluminação artificial é menor, tendo “U-equivalente” média de $7,6 \text{ kWh/m}^2$ e “Zonas térmicas” o valor de $12,8 \text{ kWh/m}^2$. Isto significa uma diferença de 70,0%. Acredita-se que parte da diferença percentual de iluminação entre os modelos seja devida ao elemento de concreto citado no item 5.2.1, que produziu variação na área de abertura em “U-equivalente”.

Se comparados os valores absolutos de modelos com mesma orientação, o consumo total de “U-equivalente” é 65,5% a 77,7% inferior ao de “Zonas térmicas”, valores que correspondem às fachadas Sul e Norte respectivamente.

Tanto em “U-equivalente” quanto em “Zonas térmicas” o consumo total decresce na ordem Norte, Leste e Oeste. Os valores são muito próximos entre estas fachadas, com diferenças percentuais da ordem de 1,2% a 2,8%. Apenas o modelo orientado a Sul tem consumo total significativamente menor que o dos demais: 37,4% em “U-equivalente” e 47,1% em “Zonas térmicas”, tendo como base de comparação a fachada Oeste, de menor consumo.

Este comportamento era esperado, visto que a fachada Norte recebe maior carga de radiação direta sobre a fachada ao longo de praticamente todos os dias do ano. A fachada Leste demanda maior carga de iluminação no período da tarde e o inverso acontece na fachada Oeste, que consome mais com iluminação no período da manhã. Sobre a diferença entre as fachadas Leste e Oeste é importante lembrar ainda que na simulação foi usado modelo de céu “real”, no qual a nebulosidade varia ao longo do dia e do ano para a cidade de Belo Horizonte. Isto interfere na quantidade de radiação incidente nas fachadas, principal componente responsável pelo aumento no consumo do ambiente em análise.

A grande diferença de consumo total entre “U-equivalente” e “Zonas térmicas” pode ser compreendida através dos resultados dos ganhos de calor pela fachada apresentados no GRAF. 6.



GRAF. 6: Resultados de ganho de calor pela fachada de “U-equivalente” e de “Zonas térmicas”, protótipos construídos em dois modos diferentes.

Em “U-equivalente” o ganho de calor total pela fachada está relacionado ao maior ganho pela abertura em todas as orientações, principalmente a Leste, Norte e Oeste. Ao longo do ano, o fechamento opaco atenua o ganho total pela fachada porque predominam nele as perdas de calor. Na fachada Sul o ganho pela abertura não é tão elevado quanto o das demais orientações, mas ainda supera as perdas pela parede externa.

Ao contrário, em “Zonas térmicas” tanto os ganhos pela abertura quanto pelo fechamento opaco são positivos em todas as orientações e, ao se sobreporem para resultar no ganho de calor total, fazem o consumo com arrefecimento mais que dobrar em relação ao protótipo de único *construction*. Os ganhos pela abertura são muito próximos ao de “U-equivalente”, como também pode ser observado pelo GRAF. 6. Já os ganhos pelo fechamento opaco são praticamente o dobro do da abertura, revelando que o fechamento opaco composto por vidro, câmaras de ar não-ventiladas e placas cimentícias funciona claramente como um acumulador de calor.

Entende-se que os resultados de “Zonas térmicas” tendem a representar melhor o fenômeno termo-físico que ocorre na fachada. Entretanto, como no método prescritivo de RTQ a fachada deve ser considerada como foi representada em “U-equivalente”, reitera-se que os resultados dos demais protótipos foram comparados ao deste último.

5.2.2.1.2 Ambiente projetado (“U-equivalente”) x ambiente com vidro de alta TL (“Low-e” e “Comum”)

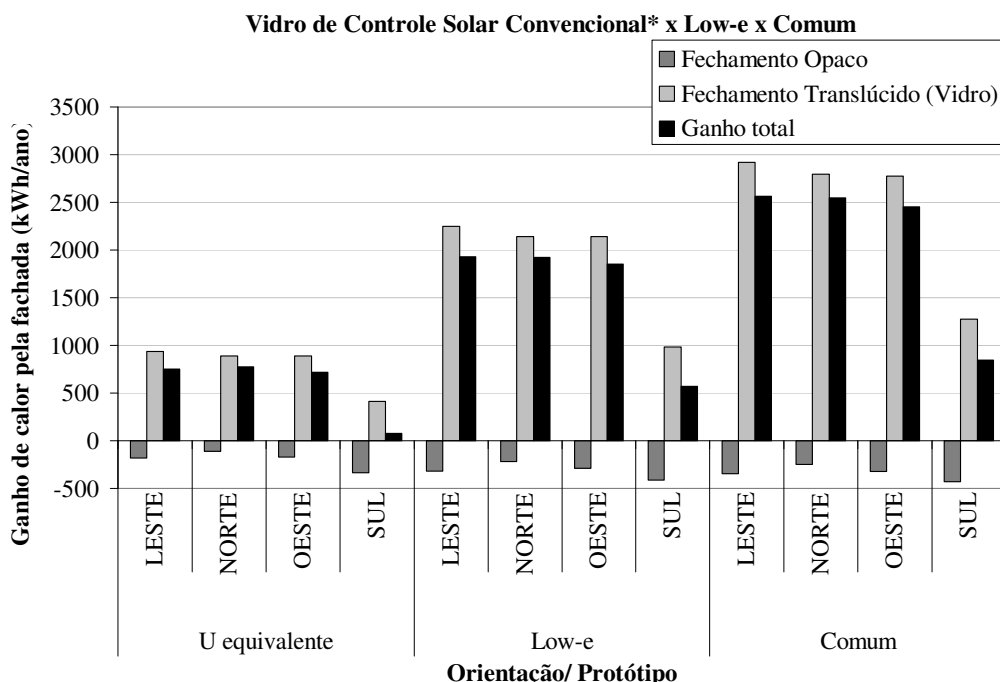
O protótipo do ambiente projetado (“U-equivalente”) recebeu vidro duplo de controle solar convencional, com transmissão luminosa de 50,5%. Como dito, em “Low-e” este vidro foi substituído por duplo de controle solar de baixa emissividade com transmissão luminosa de 72,1% e em “Comum”, por vidro duplo comum de TL de 78,1%. O Fator Solar do vidro *low-e* (62,9%) (TAB. 14) é bem maior que o de controle solar tradicional (48,1%).

O consumo médio do protótipo “U-equivalente” foi de 77,1 kWh/m² no total, sendo 7,6 kWh/m² gastos com iluminação. “Low-e” obteve um total de 92,3 kWh/m², sendo 4,8 kWh/m² com iluminação. “Comum” tem consumo total de 102,4 kWh/m² e 4,7 kWh/m² de iluminação. O maior responsável pela diferença de consumo entre os protótipos foi o ganho de calor pela abertura.

Comparando-se os valores de cada orientação de fachada (GRÁF. 7) observa-se que as perdas pelo fechamento opaco de “Low-e” e “Comum” são semelhantes. Nestes protótipos, na orientação Sul a perda é aproximadamente 1,2 vez maior do que em “U-equivalente”; nas demais orientações a perda é cerca de duas vezes maior.

Em todas as orientações os ganhos pela abertura - ou seja, pelo vidro - são cerca de 2,4 vezes maior em “Low-e” e 3,1 vezes maior em “Comum” quando comparados a “U-equivalente”.

Como resultado, tem-se que o ganho de calor total de “U-equivalente” é cerca de 2,5 vezes menor que o de “Low-e” e cerca de 3,4 vezes menor que o de “Comum” nas orientações Norte, Leste e Oeste. Na orientação Sul esta proporção sobe para 7,6 e 11,3 vezes, respectivamente.



* Controle Solar Convencional: tipo de vidro usado em “U-equivalente”.

GRAF. 7: Resultados de ganho de calor pela fachada de “U-equivalente”, “Low-e” e de “Comum”, protótipos com variação no tipo de vidro sobre a abertura.

Estes protótipos são exemplos de que, se analisadas as médias, um menor consumo com iluminação pode não significar menor consumo total de energia no caso em análise. Apesar da iluminação média em “Low-e” ser 56,3% mais baixa em relação a “U-equivalente”, o consumo total é 19,7% superior ao deste último. Já o protótipo “Comum” tem consumo com iluminação 59,3% inferior, mas consumo total 32,8% superior ao de “U-equivalente”.

Na análise de consumo de energia total por fachadas, o do “Low-e” foi inferior a “U-equivalente” apenas quando aplicado à fachada Sul, mas foi inferior ao de “Comum” em todas as orientações.

Assim, percebe-se que os vidros *low-e* e comum escolhidos têm comportamento semelhante do ponto de vista do consumo com iluminação, tendo o primeiro melhor desempenho térmico geral, como esperado. Quanto ao desempenho luminoso - em termos de quantidade e qualidade da distribuição da luz natural no interior do ambiente - não foi possível caracterizar os vidros analisados com as ferramentas do *software DesignBuilder*.

O vidro *low-e* não foi mais eficiente que o de controle solar tradicional para reduzir o consumo de energia. Neste caso, o *low-e* permitiu maior aproveitamento da luz natural que o de controle solar convencional. Mas em situações reais o desconforto visual (com

ofuscamento, por exemplo) que vidros de maior transmissão luminosa porventura causem pode ser superior ao do de controle tradicional, induzindo o usuário do ambiente a utilizar mais recursos para reduzir a entrada de luminosidade do que usariam com o convencional. Dentre estes recursos citam-se películas para vidros, toldos, persianas, etc., elementos que alteram o balanço termo-energético das edificações.

5.2.2.1.3 Ambiente projetado (“U-equivalente”) x ambiente de referência (“Alvenaria”)

São comparados os resultados do protótipo que adota o sistema de fachada envidraçada original, com transmitância térmica equivalente de $1,574 \text{ W/m}^2\text{K}$ calculada pelo software *DesignBuilder*, ao protótipo de referência, cuja fachada é em alvenaria de transmitância térmica calculada de $1,613 \text{ W/m}^2\text{K}$.

O consumo médio anual de energia do protótipo “Alvenaria” ($70,2 \text{ kWh/m}^2$) mostrou-se 9,8% inferior ao de “U-equivalente” ($77,1 \text{ kWh/m}^2$). Aliás, foi o menor dentre todos os que utilizam o sistema de fachada dupla envidraçada. Destaca-se a diferença de resultados quando “Alvenaria” é comparado a “Zonas térmicas” ($134,5 \text{ kWh/m}^2$), de consumo 91,6% superior.

Quanto ao consumo com iluminação, “Alvenaria” tem consumo próximo ao de “U-equivalente”, já que possuem o mesmo tipo de vidro sobre a abertura. A diferença entre eles é de 1,2%, o que mostra a sensibilidade do software *DesignBuilder* a pequenas alterações no modelo.

Sobre ganho de calor pela fachada opaca, “Alvenaria” possui perda de 399,2 kWh ao ano. A perda é menor em “U-equivalente”, de 199,0 kWh. Em relação ao ganho de calor pelo vidro da abertura, tem-se que ambos têm desempenho próximo.

Sobre o ganho de calor total pela fachada, “U-equivalente” acumula 62,0% a mais de calor pela fachada que “Alvenaria”. Nota-se que a fachada de “Zonas térmicas” acumula cerca de 7,6 vezes mais calor que o protótipo de referência, com um ganho percentual 658,5% maior.

Resumindo, o protótipo com a fachada de alvenaria consome menos energia que os demais, apesar de demandar mais energia para iluminação artificial do que os outros dois que possuem vidro de alta transmissão luminosa sobre a abertura. Sua média de ganho de calor total pela fachada também é a menor dentre todos os protótipos avaliados neste Grupo 1. Por isto,

conclui-se que “Alvenaria” apresentou melhor desempenho geral dentre os modelos sem proteção solar analisados.

5.2.2.2 Grupo 2: protótipos com proteção solar

5.2.2.2.1 Brises por RTQ

A proteção solar do protótipo “RTQ” foi desenvolvida pela combinação de AVS e AHS que gera um ICenv mínimo. “RTQ-2” adota os mesmos ângulos, porém em AVS usa duas lâminas paralelas.

O consumo médio de energia de “RTQ-2” é de 61,2 kWh/m², valor 4,6% menor que o de “RTQ”, que é de 64,0 kWh/m². Em relação ao protótipo-base “Alvenaria”, “RTQ-2” reduziu em consumo médio total em 12,9% e “RTQ” em 8,9%. Estas foram as maiores reduções obtidas dentre todas as proteções solares avaliadas neste trabalho.

Em ambos a ordem crescente de consumo por orientação de fachada é Oeste, Norte, Leste e Sul. Na fachada Sul, o uso dos dois tipos de proteção aumentou o consumo total em relação à “Alvenaria”. Houve acréscimo de 10% no caso de “RTQ” e de 3,8% para “RTQ-2”. Destaca-se que este tipo de aumento se repetiu nos resultados das outras proteções analisadas. Nas demais orientações, houve redução do consumo total. As diferenças entre o consumo de Leste e Oeste nestes modelos com brises são maiores em “RTQ-2”, de apenas 4,4%.

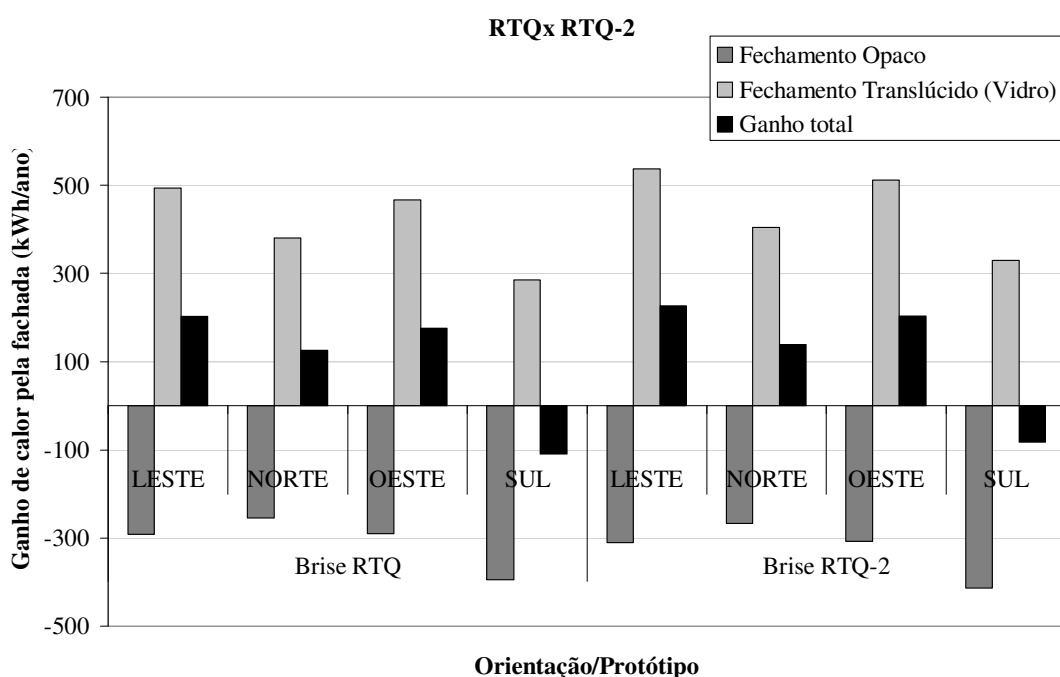
O consumo médio com iluminação em “RTQ-2” (9,7 kWh/m²) é 27,4% inferior ao de “RTQ”(11,0 kWh/m²). Isto era esperado, visto que em “RTQ-2” a menor extensão da lâmina favorece a entrada de luz difusa, além da lâmina inferior de cor clara refletir luz para o interior do ambiente. Em “RTQ-2” a fachada Oeste tem o menor consumo de iluminação, enquanto em “RTQ” a maior economia ocorre na fachada Norte. Nos dois protótipos a fachada Sul é a de maior consumo neste aspecto.

Em termos de consumo de energia total e consumo com iluminação, as diferenças percentuais obtidas com a variação de orientação de fachadas são geralmente menores em “RTQ”.

Sobre o ganho de calor total pela fachada, “RTQ” e “RTQ-2” têm comportamento semelhante (GRÁF. 8). Entretanto, “RTQ-2” perde mais calor pela fachada opaca, ganha mais pelo vidro

e acaba ficando com média de ganho total maior que “RTQ”. O ganho médio deste é de 98,8 kWh ao ano, e de “RTQ-2” é de 121,5 kWh.

A diferença percentual de ganho de calor pela fachada opaca comparando-se orientações idênticas dos modelos é pequena, entre 4% e 7%. Já no ganho de calor pelo vidro observam-se diferenças maiores. O modelo a Sul de “RTQ-2” tem ganho 15,8% maior que o de “RTQ”. “RTQ-2” orientado a Norte tem ganho 6,5% superior ao de “RTQ”. Em “RTQ-2” a Oeste o aumento é de 9,6% e a Leste é de 8,9%. Apenas na fachada Sul predomina a perda de calor pela fachada nos dois protótipos.



GRAF. 8: Ganho de calor pela fachada em cada orientação de “RTQ” e de “RTQ-2”.

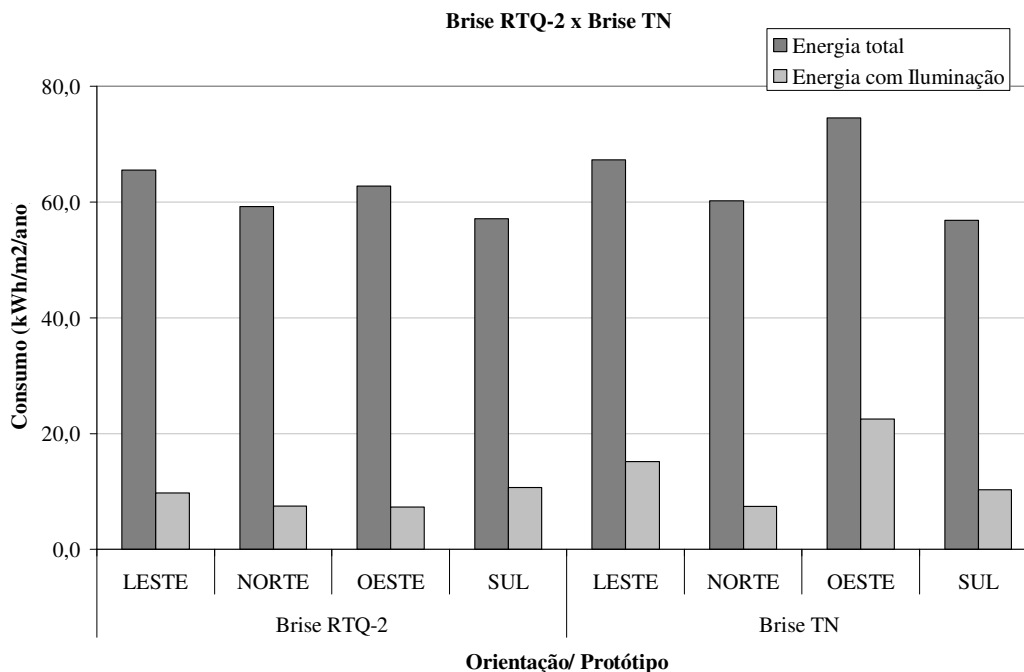
Resumindo, “RTQ-2” tem consumo total e com iluminação menor que “RTQ”, apesar do maior ganho anual de calor pela fachada. Assim, percebe-se que o *software* é sensível à diferentes geometrias de brise para uma mesma máscara de proteção solar. Conclui-se que “RTQ-2” neste caso tem melhor desempenho que seu similar “RTQ”.

5.2.2.2.2 Brise “RTQ-2” x Brise TN

Estes protótipos se diferenciam pela proteção solar. Como mostrado, “RTQ-2” possui brise em lâmina dupla calculado a partir do Regulamento, enquanto em “Brise TN” foram definidas proteções para cada orientação usando-se o método da Temperatura Neutra.

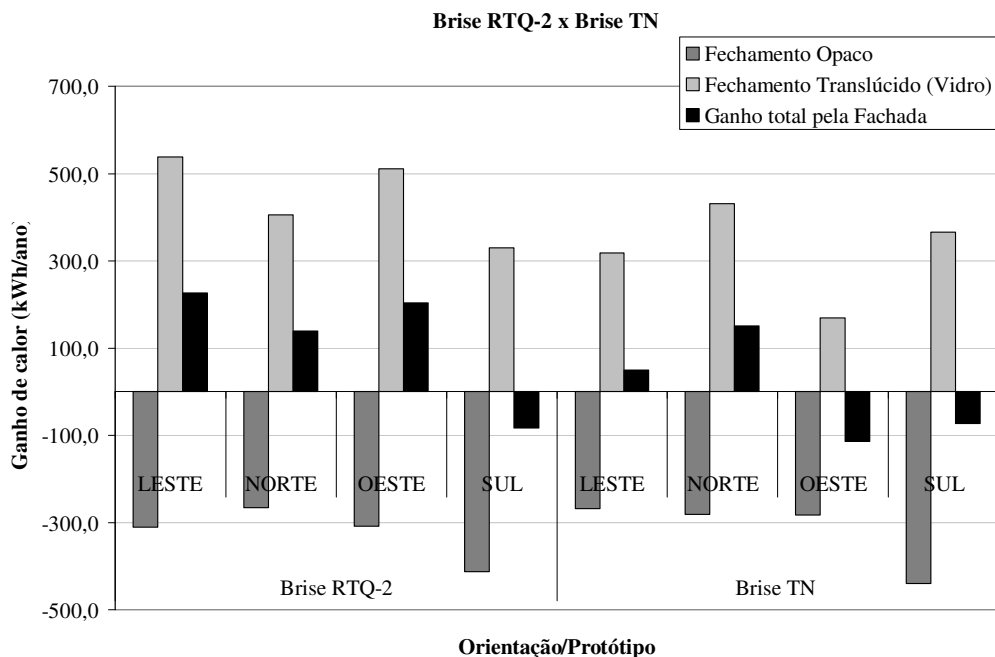
O consumo médio anual de energia de “RTQ-2” é 5,9% inferior ao consumo de “Brise TN”, o qual é de 64,7 kWh/m². Comparando-se os dados por fachada, tem-se que o consumo é sempre menor em “RTQ-2”, exceto na fachada a Sul (GRÁF. 9). Nesta orientação a diferença entre os protótipos é muito pequena: 0,5%. A diferença para Norte e Leste também é pequena, de 1,7% e 2,7% respectivamente. A maior diferença entre os protótipos está na orientação Oeste, condição na qual “RTQ-2” tem consumo total 18,8% inferior ao de “Brise TN”, o que em muito se deve ao consumo com iluminação.

O consumo médio anual com iluminação de “RTQ-2” é inferior ao de “Brise TN”: 8,8 kWh/m² contra 13,8 kWh/m², uma diferença média de 57,9% em sua maior parte devida à fachada Oeste. Entre os modelos “RTQ-2” e “Brise TN” orientados a Norte, “Brise TN” consome 0,7% a menos que “RTQ-2”. “Brise TN” a Sul consome 3,8% a menos que “RTQ-2”. Deste modo, o desempenho dos dois protótipos a Norte e a Sul é parecido. No entanto, “RTQ-2” orientado a Leste consome 56,4% a menos que “Brise TN” para a mesma orientação. A Oeste a diferença ainda é mais considerável, de 210,4%. Em “RTQ-2” a Oeste o consumo é de 7,3 kWh/m², o menor de todos os modelos. E “Brise TN” voltado para esta orientação consome 22,5 kWh/m², tendo o maior consumo com iluminação dentre todos os tipos de proteção avaliados neste trabalho. Este maior consumo a Oeste era previsto, já que a proposta de proteção pela Temperatura Neutra impede completamente a entrada de radiação solar direta no ambiente apenas nesta orientação. Por outro lado, acredita-se que o menor consumo com iluminação a Oeste em “RTQ-2” seja possível às custas de certo desconforto luminoso e térmico dos ocupantes, que estariam sujeitos à penetração da radiação solar direta pela abertura na maior parte da tarde.



GRAF. 9: Consumo total e com iluminação em “Brise RTQ-2” e “Brise TN” por orientação.

Em ambos predomina a perda de calor pela fachada opaca (GRÁF. 10). Em “RTQ-2” a média anual é de $-324,7$ kWh. Em “Brise TN”, a perda pela parte opaca é menor: $-317,9$ kWh. O ganho médio de calor pelo vidro em “RTQ-2” ($446,1$ kWh) é quase 40% maior que em “Brise TN” ($321,2$ kWh). Isto confirma que a proteção da abertura em “Brise TN” é mais eficiente. A média anual de ganho pela fachada em “RTQ-2” é positiva, equivale a $121,5$ kWh. Em “Brise TN” a média pela fachada é de $3,3$ kWh, notando-se que tanto na fachada Sul quanto na Oeste os ganhos totais pela fachada são negativos.



GRAF. 10: Ganho de calor em “Brise RTQ-2” e “Brise TN” por orientação.

Diante desses resultados, entende-se que o desempenho final de “RTQ-2” é superior ao de “Brise TN”.

Nesta etapa também foi feita a retirada dos brises verticais a Sul e a Norte para avaliar se, conforme previsto na equação de IC (item 5.1.1.1, GRAF. 3), o consumo de energia diminui com a redução do AHS.

Na simulação, o consumo anual de energia dos protótipos cujos brises foram retirados teve comportamento oposto, diminuindo na fachada Sul e aumentando a Norte (TAB. 16). Ao final, a média de consumo total de “Brise TN” considerando-se as quatro orientações simuladas passou de 64,7 kWh/m² para 65,0 kWh/m², um aumento de 0,4%. Como na orientação Sul a placa vertical protege a abertura em horários de menor carga térmica da radiação, a carga acrescentada provavelmente não foi suficiente para aumentar o consumo com arrefecimento, enquanto a área de penetração de luz natural foi aumentada reduzindo o consumo de iluminação. A Norte a radiação incidente fez aumentar o consumo de energia, e também houve redução do consumo com iluminação pelo mesmo motivo de aumento da área de entrada de luz. O consumo médio com iluminação, considerando as quatro orientações, reduziu 13,0%.

TAB. 16: Consumo anual de “Brise TN” sem brises verticais nas Fachadas Norte e Sul

Orientação	Consumo de Energia total (kWh/m ²)		Consumo com Iluminação (kWh/m ²)	
	Com brise vertical	Sem brise vertical	Com brise vertical	Sem brise vertical
Norte	60,2	64,7	7,4	5,1
Sul	56,9	53,4	10,3	6,2
Leste	67,3	-	15,1	-
Oeste	74,6	-	22,5	-
Média (inclui N,S,L,O)	64,7	65,0	13,8	12,2

Nota-se que as fachadas Leste e Oeste não receberam brises verticais porque estes foram substituídos pelo prolongamento lateral de brises horizontais. Esta decisão de projeto partiu apenas da autora, pois não há recomendação ou padrão estabelecido sobre quando se deve substituir o ângulo gama, que é paralelo ao plano da abertura, pelo beta que se traduz em AHS. Com esta decisão, não foi possível avaliar o impacto da retirada de brises verticais destas fachadas nos resultados médios de consumo, sendo mantidos nos cálculos seus dados originais.

5.2.2.2.3 Proteções por TN: Prateleiras de Luz

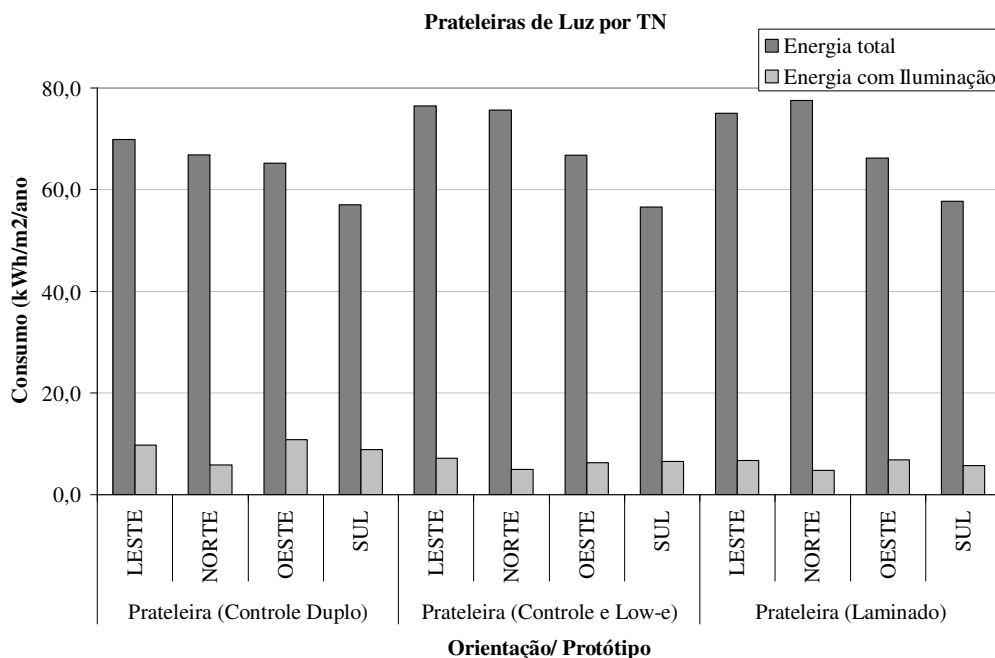
Os protótipos com prateleiras de luz tiveram o tipo de vidro sobre a abertura variado. “Prateleira-Controle Duplo” usa vidro duplo de controle solar tradicional. “Prateleira-Controle e Low-e” usa esse vidro na abertura inferior e duplo *low-e* na superior. “Prateleira-Laminado” usa laminado de controle solar tradicional em ambas.

O consumo médio total de energia de “Prateleira-Controle e Low-e” (68,9 kWh/m²) e de “Prateleira-Laminado” (69,1 kWh/m²) é muito próximo, com diferença de apenas 0,4% entre eles. Já “Prateleira-Controle Duplo” apresentou um consumo médio cerca de 6,5% inferior aos demais: 64,8 kWh/m², demonstrando ser o mais eficiente dos três neste aspecto.

A ordem decrescente de consumo total por orientação em “Prateleira-Controle Duplo” e em “Prateleira-Controle e Low-e” é Leste, Norte, Oeste e Sul (GRÁF. 11). Em “Prateleira-Laminado” a orientação Norte assume a posição de maior consumo com 77,6 kWh/m², o maior valor obtido dentre todas as situações com prateleiras de luz avaliadas.

As maiores diferenças estão no consumo com iluminação artificial. O consumo médio de “Prateleira-Laminado” é o menor dentre os três: 6,0 kWh/m². Porém, fica apenas 3,7% abaixo do consumo de “Prateleira-Controle e Low-e” (6,2 kWh/m²). O consumo médio com iluminação em “Prateleira-Controle Duplo” é de 8,8 kWh/m², diferença de 46,6% em relação

a “Prateleira-Laminado” e valor muito próximo ao obtido em “RTQ-2”. Em todos a fachada Norte é a de menor consumo, mas a sequência que se segue depende do tipo de vidro utilizado. Para “Prateleira-Laminado” e “Prateleira-Controle Duplo” é Norte, Sul, Leste e Oeste. Para “Prateleira-Controle e Low-e” é Norte, Oeste, Sul e Leste.

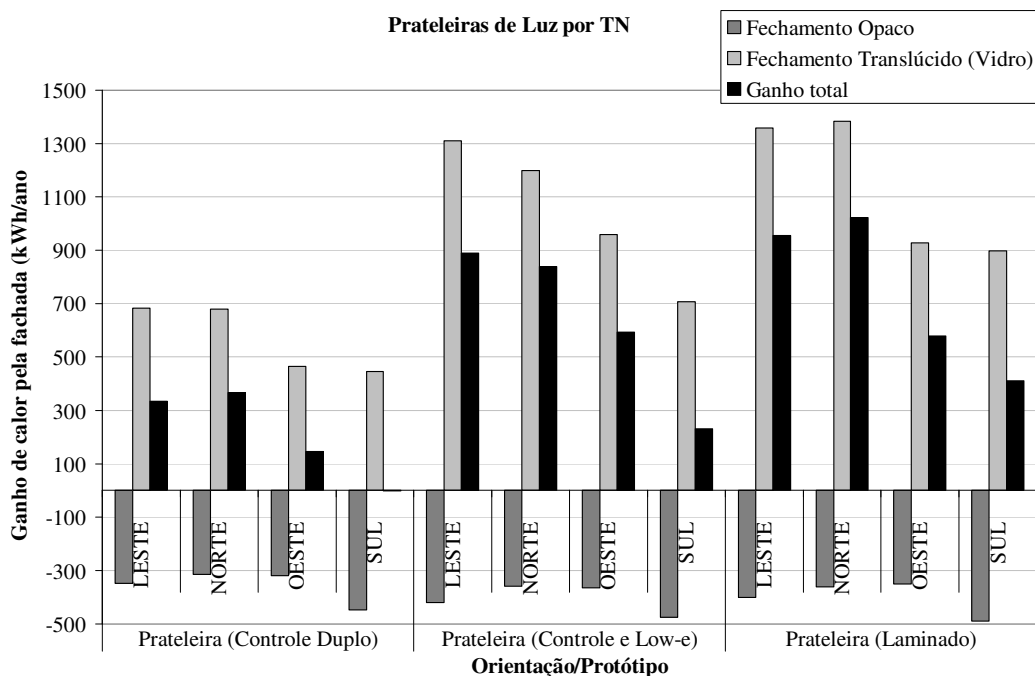


GRAF. 11: Consumo das Prateleiras de Luz com diferentes tipos de vidros por orientação.

Pelo fechamento opaco em todas as orientações predomina a perda de calor com valores relativamente semelhantes (GRÁF. 12).

Comparando-se os valores por orientação de fachada, tem-se que o ganho de calor pelo vidro de “Prateleira-Controle Duplo” é cerca de metade dos outros dois protótipos em cada uma delas. Conseqüentemente, a média de ganho pelo vidro em “Prateleira-Controle Duplo” (568,7 kWh) é cerca de metade dos demais: em “Prateleira-Controle e Low-e” é de 1044,3 kWh e em “Prateleira-Laminado” é de 1142,3 kWh.

Com isto, o ganho médio total pela fachada também é menor para “Prateleira-Controle Duplo” (210,9 kWh), enquanto a das demais se aproximam: 638,7 kWh para “Prateleira-Controle e Low-e” e 741,6 kWh para “Prateleira-Laminado”.



GRAF. 12: Ganho de calor pela fachada das Prateleiras de Luz com diferentes tipos de vidros por orientação.

Observa-se que a abertura acima da prateleira não é protegida, elevando o ganho de calor pelo vidro em relação ao brise. As prateleiras com vidro de controle solar convencional aplicado nas duas aberturas tiveram melhor desempenho: o vidro duplo reduziu mais o consumo médio de energia total e o laminado reduziu mais o consumo médio com iluminação. Novamente, reitera-se que é preciso aprofundar os estudos para compreender aspectos de desempenho luminoso que não foram abordados neste tipo de simulação.

5.2.3.4 Desempenho geral dos protótipos em relação à “Alvenaria”

Como visto, o protótipo de referência “Alvenaria” apresentou menor consumo médio total dentre os modelos do Grupo 1. A TAB.17 apresenta os valores médios anuais de todos os protótipos comparados, em valores percentuais, ao de “Alvenaria”.

O consumo médio total de “U-equivalente” é 9,8% superior ao de “Alvenaria”. Seguem-se o consumo de “Low-e”, de valor 31,5% maior ao de referência, e o consumo de “Comum”, com percentual 45,9% superior. Por fim, “Zonas térmicas” apresentou consumo quase 100% maior do que o da fachada em alvenaria.

Quando inseridas as proteções solares em “Alvenaria” são alcançadas reduções de até 12,9% no consumo médio total. Este percentual é obtido com a aplicação do brise de lâmina duplo baseado em RTQ, ou seja, “Brise RTQ-2”.

A redução no consumo total proporcionada pelo “Brise TN” foi de 7,8%, valor equivalente ao da prateleira de luz associada ao vidro duplo em “Prateleira- Controle Duplo”.

As prateleiras com vidro laminado e com vidro low-e proporcionaram reduções pouco significativas no consumo total de “Alvenaria”, com valores inferiores a 2%. Porém, foram as únicas proteções solares avaliadas que provocaram diminuição no consumo com iluminação em relação à referência. O protótipo “Prateleira- Controle e Low-e” obteve redução de 16,6% e “Prateleira- Laminado” de 19,6%, valores que indicam o maior potencial de aproveitamento de iluminação natural destas proteções quando associadas a determinados tipos de vidro.

Assim, apesar de “RTQ-2” ter alcançado a maior redução no consumo médio total, “Prateleira- Laminado” apresenta melhor desempenho dentre as proteções porque, devido ao tipo de vidro utilizado e ao dimensionamento das lâminas por T_n , combina tanto a redução no consumo total quanto no de iluminação.

Além das duas prateleiras no Grupo 2, apenas os protótipos “Comum” e “Low-e” no Grupo 1 conseguiram reduzir o consumo com iluminação em relação à “Alvenaria”. Neste grupo, observa-se que esta redução está vinculada ao uso de vidros de alta transmissão luminosa.

TAB. 17: Dados médios anuais dos protótipos comparados ao de “Alvenaria”

Protótipo	Variáveis			Diferença sobre "Alvenaria"		
	Energia* kWh/m ²	Iluminação kWh/m ²	Calor pela Fachada** kWh	Energia %	Iluminação %	Calor pela Fachada** %
U equivalente	77,1	7,6	581,1	9,8	1,2	62,0
Zonas Térmicas	134,5	12,8	2721,2	91,6	71,0	658,5
Low-e	92,3	4,8	1569,0	31,5	-35,2	337,3
Comum	102,4	4,7	2102,7	45,9	-36,5	486,1
Alvenaria	70,2	7,5	358,8	0,0	0,0	0,0
Brise RTQ	64,0	11,2	98,8	-8,9	49,4	-72,5
Brise RTQ-2	61,2	8,8	121,5	-12,9	17,3	-66,1
Brise TN	64,7	13,8	3,3	-7,8	85,2	-99,1
Prateleira (Controle Duplo)	64,8	8,8	210,9	-7,8	17,9	-41,2
Prateleira (Controle e Low-e)	68,9	6,2	638,7	-1,9	-16,6	78,0
Prateleira (Laminado)	69,1	6,0	741,6	-1,5	-19,6	106,7
Brise TN sem vertical	65,0	12,2	194,1	-7,4	63,8	-45,9

* Energia média total anual. ** Ganho de calor total pela fachada.

5.3 Comentários sobre os resultados dos dois métodos de avaliação de desempenho

5.3.1 Envoltória

A transmitância térmica dos sistemas da envoltória foi estabelecida pela equipe de projeto do edifício. No sistema em *structural glazing* sobre placa cimentícia da fachada esta transmitância foi estabelecida em $2,3 \text{ W/m}^2\text{K}$. Este valor foi usado para análise de pré-requisitos. Já para o uso na simulação, a transmitância do sistema envidraçado como *construction* foi calculada pelo *DesignBuilder* e teve valor menor, equivalente a $1,574 \text{ W/m}^2\text{K}$. Os dois valores contribuíram para que a média de transmitância das paredes externas fosse inferior ao limite estabelecido pelo RTQ para a Zona Bioclimática 3, o qual corresponde a $3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Salienta-se porém que os valores de transmitância calculados pelo *DesignBuilder* não consideram a resistência superficial externa, que varia conforme a intensidade e direção do vento.

Na simulação, a relevância da forma de concepção do sistema de fachada no software foi evidenciada nos resultados contrastantes de consumo total entre os protótipos “U-equivalente” e “Zonas térmicas”.

Como se verifica nos resultados, esta diferença é majoritariamente devida ao ganho de calor pelo fechamento opaco da fachada. Isto confirma que, coerentemente, o fenômeno térmico está sendo interpretado de modo discrepante pelo *software* nos dois casos.

Considerando que a forma correta de modelagem é a de “Zonas térmicas”, os resultados confirmam também que na situação avaliada este sistema envidraçado duplo, com câmara de ar selada, tende a funcionar como um acumulador de calor. Conclui-se também que haveria uma economia de cerca de 90% no consumo total de cada ambiente se alvenaria fosse utilizado em substituição ao fechamento opaco da fachada envidraçada que foi projetada.

Diante disto, entende-se que o método prescritivo de avaliação de envoltória proposto pelo Regulamento brasileiro, na qual o fenômeno da transferência de calor é baseado apenas na transmitância térmica resultante da fachada, não seja suficiente para retratar o que ocorre em sistemas de fachada envidraçada como o aqui é estudado. Neste sentido, talvez fosse apropriado que o RTQ incluísse alguma estratégia específica para abordagem destes sistemas envidraçados.

A elaboração de tal estratégia pode ser relevante se houver difusão destes sistemas no país. Não foi encontrado na literatura quaisquer dados que indiquem a tendência de crescimento na utilização de fachadas envidraçadas no país. Porém, como colocado no Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica), o uso destes sistemas tem respaldo e é regulado por instrumentos legais de combate a incêndio de pelo menos três Estados que concentram alguns dos maiores centros urbanos brasileiros – São Paulo, Belo Horizonte e Fortaleza. E estes instrumentos são alheios ao desempenho energético de envoltórias que pretende ser tratado no RTQ.

Por outro lado, se os resultados de “U-equivalente” e “Zonas térmicas” fossem comparados aos valores de referência expostos no GRÁF. 2, poder-se-ia dizer que o consumo do ambiente em ambos os casos contribuiria para que o edifício tenha um nível de eficiência bastante alto. No entanto, é desaconselhável a comparação com tal gráfico, visto que não se tem conhecimentos aprofundados sobre os métodos utilizados para sua elaboração. Sobretudo, pelos motivos expostos no item 2.1.1, não é indicado utilizar referências internacionais nestas análises. Estas podem ser feitas futuramente, a partir de dados conhecidos, próximos da realidade brasileira e do edifício em questão _ dados estes que não foram encontrados até o momento.

Quanto às proteções solares, pelo índice de consumo para a Zona 3 (IC-3) do RTQ os brises verticais aumentariam o consumo de energia no caso estudado. A simulação demonstrou que o consumo médio de “Brise TN” diminuiu sem os brises verticais, mas se o dado for tomado por orientação, observa-se que houve aumento de consumo na fachada Norte neste caso.

Os resultados diferenciados de “RTQ” e “RTQ-2”, ambos de $AVS=45^\circ$, reiteram que a geometria do brise é importante na melhoria da eficiência. Como “RTQ-2” possui lâmina dupla, parte da luz refletida pela lâmina inferior pode penetrar no ambiente e melhorar o aproveitamento da luz natural.

Neste ponto, lembra-se que o Manual do RTQ coloca que a limitação do AVS em 45° é para contribuir no aproveitamento da luz difusa. No entanto, lembra-se que outros fatores interferem neste aproveitamento: uma proteção com ângulo de 45° oferece resultados diferentes de consumo dependendo do número de lâminas e, principalmente, da inclinação das mesmas em relação à fachada.

Apesar de qualquer valor de AVS na equação do Indicador de Consumo proporcionar a classificação “A” para este edifício, a simulação demonstrou redução no consumo quando a

proteção solar é usada, o que atesta a relevância deste dispositivo. Mas novamente a eficiência deste dispositivo deve ser estudada para cada caso. Neste trabalho a redução foi de 1,5% a 12,9% em relação à fachada não protegida de alvenaria. Supondo a existência de proteção sobre o sistema de fachada em questão (por exemplo, brises aplicados no protótipo “Zonas térmicas” de modo a sombrear parte do fechamento opaco e reduzir o acúmulo de calor), a redução percentual no consumo provavelmente seria maior. Comparando-se as reduções percentuais por orientação da fachada e não em termos médios globais, pode haver reduções ainda maiores.

Lembra-se que os percentuais apresentados neste estudo dependem de muitos fatores relativos à configuração dos protótipos, tais como as propriedades dos vidros e as cargas internas escolhidas. Por exemplo, em uma simulação prévia na qual a carga de equipamentos e o nível mínimo de iluminância eram cerca de duas vezes maior em relação aos que aqui foram usados, as diferenças percentuais no consumo total do Grupo 1 diminuiriam quase à metade. Apesar disto, elas continuaram significativas: a diferença entre “U-equivalente” e “Zonas térmicas” foi de 39,0%, e entre “Zonas térmicas” e “Alvenaria” foi de cerca de 45,0%. Já as reduções provocadas pela inserção de proteções na alvenaria foram menores, variando de 0,3% a 4,5%. A maior redução foi alcançada pela prateleira de luz com vidro laminado.

Nota-se que os resultados de consumo dos protótipos com as proteções não retratam a situação real com precisão. Isto ocorreu porque as proteções solares não foram determinadas para a orientação exata do edifício. O desvio de 14° da fachada Norte em relação ao Norte geográfico foi desconsiderado. Entretanto, este fato não invalida os resultados comparativos entre as fachadas.

5.3.2 Sistema de iluminação

Para obter a classificação do sistema de iluminação pelo método prescritivo do RTQ foi necessário escolher o fluxo luminoso da lâmpada e a potência total do reator, duas informações que não estavam definidas em projeto, apesar do detalhado caderno de especificações. Acredita-se que a partir da existência do RTQ, especificações técnicas como estas serão encontradas de modo mais padronizado em projetos, influenciando positivamente na qualidade e quantidade das informações disponíveis.

O resultado da classificação foi “A” porque se escolheu componentes dentre os mais eficientes do mercado. Com eles obteve-se uma Densidade de Potência Instalada Absoluta (DPI_A) de $12,7 \text{ W/m}^2$, com nível de iluminação de 604 lux. Signor (1999) expõe que os valores para carga interna instalada de iluminação de edifícios de escritórios recomendados pelo *Energy Code* da ASHRAE, documento de 1993, estão entre $9,5 \text{ W/m}^2$ e $19,0 \text{ W/m}^2$. Já o IECC de 2003, define o valor de $1,1 \text{ W/ft}^2$ - cerca de $11,8 \text{ W/m}^2$ - como prática geral aceitável para a iluminação de ambientes de edifícios comerciais (ICC, 2003, tabela 805.5.2). Percebe-se que o DPI_A do ambiente analisado se aproxima destas faixas recomendadas.

Segundo o RTQ, o ambiente é aprovado no critério de contribuição da luz natural por possuir a fileira de luminárias mais próxima à janela com acionamento independente. No entanto, pelas análises paramétricas percebe-se que esta contribuição pode ser mais efetiva, dependendo do tipo de vidro aplicado sobre a abertura. O vidro duplo *low-e* traria benefício neste sentido, mas como seu fator solar é maior, tende a piorar o Indicador de Consumo. Com isto, pode piorar também a classificação da envoltória.

Realmente, o uso do vidro *low-e* provocaria um aumento no consumo de energia total no caso em estudo. Contudo sua transmissão luminosa é 30% maior (pelos cálculos do *EnergyPlus/DesignBuilder*) e cerca de 80% maior (pelos cálculos do *software* do próprio fabricante) do que a do vidro de controle solar tradicional. Este, cujo FS é 0,48, permite maior margem para obtenção de “A”.

Neste edifício do TJMG a aplicação do *low-e* (de FS igual a 0,63) não chegaria a mudar a classificação para “B”, pois o limite de FS para haver tal mudança é de 0,73 segundo a equação de IC. Entretanto, se em edifícios com outro tipo de volumetria a mudança de classificação vier a ocorrer devido a FS mais altos, a adoção do vidro *low-e* pode ser desestimulada.

Como visto as prateleiras de luz também podem contribuir no aproveitamento da luz natural, reduzindo o consumo com iluminação, deste que associadas aos tipos de vidros mais apropriados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo abordou aspectos do “Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos” (RTQ-C) através de sua aplicação em um estudo de caso, o projeto do Edifício-Sede do Tribunal de Justiça de Minas Gerais para a cidade de Belo Horizonte. Analisaram-se os critérios envoltória do edifício e sistema de iluminação de um ambiente-padrão. Foram aplicados o método prescritivo do documento e simulação termo-energética com os *softwares EnergyPlus e DesignBuilder*. A seguir são retomados os principais resultados.

No critério envoltória foram identificadas inconformidades a alguns pré-requisitos que limitavam a classificação do edifício em estudo ao nível “C”. Diante disto, foram estabelecidas propostas de alteração na envoltória tendo em vista a obtenção de classificação “A”. A única proposta que interferiu significativamente na concepção do projeto original diz respeito à diminuição da área da cobertura zenital do prédio. Também houve alteração de cores e absorvância de parte da cobertura não aparente.

Retoma-se que a classificação da envoltória pelo método prescritivo divide-se nas etapas de análise de pré-requisitos e da equação de Indicador de Consumo. No estudo de caso desenvolvido foram encontrados alguns complicadores nessas duas etapas de avaliação.

A análise de pré-requisitos da envoltória se baseia na avaliação de transmitância térmica e de absorvância térmica.

Por simulação foi demonstrado que a transmitância térmica não é suficiente para representar os efeitos térmicos através do sistema de fachada envidraçada adotado no estudo de caso. Este sistema é composto, a partir do meio externo, por módulos de vidro unitizado no sistema *structural glazing*, câmara de ar e placas cimentícias paralelas também intercaladas por câmara de ar. As placas são pintadas em cor escura na face externa e o sistema de fachada não é ventilado. Na simulação o consumo de energia do protótipo cuja fachada envidraçada foi representada por uma superfície com transmitância térmica equivalente foi subestimado quando comparado ao do protótipo cuja fachada foi representada por camadas de zonas térmicas individualizadas. Mais que isto, os dados de ganho de calor pela fachada do protótipo com zonas térmicas indicam que este sistema de fachada tem comportamento semelhante ao de um coletor solar térmico, funcionando como um acumulador de calor.

Diante deste resultado, estima-se que seja necessário complementar ou alterar a forma de análise do RTQ para que este tipo de fachada tenha seu desempenho melhor avaliado. Antes, porém, é recomendável referendar os resultados obtidos através de medição.

Sugere-se a continuidade de estudos semelhantes de fechamentos opacos de alta absorvência externa, intercalados com câmara(s) de ar ventilada(s) ou selada(s).

Sobre a absorvência para radiação solar observaram-se dois problemas durante esse trabalho.

O primeiro é a inexistência de um amplo banco de dados que quantifique a absorvência de materiais. Isto pode inviabilizar a aplicação do RTQ em algumas situações, aumentando a resistência à sua implementação no país. Pode também gerar na construção civil a preferência por materiais cuja absorvência é conhecida ou facilmente determinável, interferindo na dinâmica do mercado de produtos e insumos. De qualquer modo, ainda que o banco de dados seja criado e disponibilizado, eventualmente será necessário que o aplicador estime a absorvência de alguns materiais – processo que ainda não está regulamentado.

Observou-se no estudo de caso que a classificação da envoltória é muito sensível a variações no dado de absorvência. As variações experimentadas causaram mudança de até dois níveis na classificação da envoltória. De fato, para caracterizar alguns materiais, o uso de valores mínimos obtidos a partir da norma brasileira NRB15220-2 (ABNT, 2005a) implicou na possibilidade de classificação “A”. O uso de valores médios ou máximos implicou na possibilidade de classificação limitada a “C”. Entende-se o interesse do RTQ no incentivo ao uso de materiais mais claros, mas acredita-se que variações pequenas na absorvência podem não resultar em um aumento tão expressivo no consumo do edifício a ponto de justificar uma mudança significativa na classificação da envoltória. Por isto, estima-se que seja relevante haver uma revisão do Regulamento de forma a reconsiderar-se o impacto da absorvência nessa classificação.

Na equação de Indicador de Consumo (IC) observa-se que têm menor peso os fatores relativos aos ângulos AVS e AHS, os quais representam respectivamente os dispositivos de proteção solar horizontal e vertical das aberturas. Entretanto, trabalhos encontrados na literatura sinalizam que eles podem influenciar bastante o consumo de energia. Na simulação verificou-se que o consumo do ambiente padrão reduziu em até 12,9% com a instalação de proteções horizontais (brises) sobre a abertura. Este percentual é resultado da média de consumo das quatro orientações de fachada a qual o protótipo foi submetido. Se tomado o

consumo por orientação, foram observadas reduções ainda maiores. Por outro lado, pela equação de IC a classificação da envoltória do edifício em análise não é alterada pela existência de proteção horizontal para a edificação analisada, localizada na Zona 3.

A equação de IC para a Zona 3 também indica que o uso de brises verticais aumentaria o consumo do edifício, contradizendo a concepção usual de projetistas segundo a qual o uso deste tipo de proteção ajudaria a reduzir o consumo neste local em qualquer orientação. A previsão de IC em parte converge com os resultados da simulação. Em um protótipo orientado a Sul, retirando-se o brise vertical o consumo reduziu. No mesmo protótipo, porém orientado a Norte, esta retirada fez o consumo aumentar. Na avaliação final pela média dos resultados, como o aumento a Norte foi muito superior em relação à redução a Sul, tem-se que o consumo geral do protótipo aumentou com a retirada dos brises. Estes resultados reiteram a importância de se considerar a orientação da fachada em análises de consumo. Porém, este tema merece estudos complementares, nos quais sejam experimentadas mais variações em fatores como dimensões das proteções, orientações de fachada, condições de clima e latitude locais.

A falta de padronização de dados fornecidos tanto por fabricantes quanto por projetistas dificultou o processo de avaliação tanto no método prescritivo quanto na simulação.

Por exemplo, apesar do detalhado projeto do edifício, não foram fornecidos no projeto luminotécnico dados de fluxo luminoso das lâmpadas tubulares fluorescentes e da potência do conjunto lâmpada-reator para a análise prescritiva do sistema de iluminação. Foram então adotados dados de sistemas dos mais eficientes disponíveis no mercado nacional, com a intenção de se obter a melhor classificação possível do ambiente. Neste caso, entretanto, além da alta eficiência destes componentes foi necessário alterar o tipo de luminária de teto para obtenção da classificação “A”. Substituíram-se as luminárias com aletas pelas sem aletas, de maior Coeficiente de Utilização (Cu). Esta substituição pode comprometer o conforto visual do usuário, já que as aletas contribuem para limitar o ângulo de ofuscamento da lâmpada no campo visual do observador. No entanto, luminárias com aleta não possibilitam a obtenção de bons níveis de classificação de eficiência energética em relação ao quesito iluminação.

Na simulação, o uso de vidro *low-e* de alta transmissão luminosa sobre as aberturas provocou aumento no consumo de energia total. Isto foi antecipado pela equação prescritiva, pois seu Fator Solar (FS) é superior ao do vidro de controle solar convencional cogitado para uso no

edifício e por isso aumenta o valor de IC. Todavia, o vidro *low-e* reduziu o consumo com iluminação artificial, o que indica maior potencial de aproveitamento de iluminação natural. Esta vantagem da aplicação do *low-e* não é considerada no método prescritivo do Regulamento, que até o momento avalia o potencial de aproveitamento de luz natural apenas em termos de acionamento independente da fileira de luminárias mais próxima à abertura. De qualquer modo, sugere-se para trabalhos futuros a análise da aplicação deste tipo de vidro de alta transmissão luminosa combinado a proteções solares adequadas, com o objetivo de se evitar o aumento no consumo de energia ao mesmo tempo em que se preserva os benefícios da iluminação natural para o usuário. Aqui, a simulação demonstrou que as prateleiras de luz com vidros de alta transmissão luminosa –comum e *low-e*– fizeram o consumo total reduzir. Entende-se que os estudos devem prosseguir, preferencialmente complementados por análises criteriosas do desempenho luminoso do vidro através de métodos e *softwares* específicos de iluminação, o que não foi possível efetuar no momento.

A simulação também confirmou a importância da geometria das proteções solares, ao evidenciar as diferenças no consumo provocadas por dois brises desenvolvidos a partir de um mesmo conjunto de ângulos de sombreamento vertical e horizontal (vide protótipos RTQ e RTQ-2).

Concordando com a equação de IC, os brises gerados por esta combinação de ângulos proporcionaram um consumo inferior ao dos brises gerados pelo método da Temperatura Neutra (T_n). Todavia, reitera-se que esse consumo foi inferior se tomados os resultados médios, e não por orientação. E que o método da Temperatura Neutra, além do interesse na redução do consumo de energia, leva em conta aspectos de conforto térmico e visual do usuário que não considerados pelo RTQ. Lembra-se que desempenho pior do conjunto de brises dimensionados por T_n em muito se deve à orientação Oeste, pois esses dispositivos impediram totalmente a entrada de radiação solar direta e fizeram o consumo com iluminação artificial ser alto.

O consumo total de energia dos brises por T_n foi semelhante ao das prateleiras de luz dimensionadas pelo mesmo método e com mesmo tipo de vidro. Contudo, o consumo com iluminação da prateleira foi bem inferior.

Ao final simulação comprovou que o método de T_n é eficiente na redução da incidência de radiação solar direta sobre a abertura.

Pondera-se que o potencial de aproveitamento de luz natural pode ter sido superestimado neste trabalho porque foi avaliado através de dimerização contínua. Novas simulações nas quais sejam configurados outros tipos de sistema de controle de iluminação ajudariam a compreender melhor este potencial, especialmente se forem escolhidos sistemas mais usuais no país.

As iluminância mínimas definidas para os dois sensores localizados no interior do ambiente, bem como as cargas internas, influenciaram muito nos resultados. Por isto é interessante em estudo futuro realizar nova análise paramétrica variando seus valores, para investigar mais detalhadamente os efeitos sobre o consumo.

Reitera-se que a análise de consumo de energia deve integrar o balanço térmico e luminoso, principalmente considerando-se que os resultados de desempenho das envoltórias e da iluminação por orientação foram diferentes dos resultados combinados na forma de médias. Além disto, deve integrar análises de conforto ambiental do usuário. As avaliações sobre como o RTQ-C pode impactar questões relacionadas a este tema merecem ser ampliadas acima de tudo porque, provavelmente na maioria dos casos, o usuário é quem tem o controle sobre o funcionamento do ambiente e pode, por consequência, interferir no consumo. Por exemplo, ao obstruir a abertura com persianas para evitar o excesso de radiação direta ele pode, simultaneamente, anular o aproveitamento de luz natural e alterar o balanço térmico interno. Por isto, acredita-se que futuras simulações devem incluir uma possível interferência do ocupante, tal como fizeram Ochoa e Capeluto (2006), sob o risco de não se representar devidamente a dinâmica de consumo de energia. Afinal, como o edifício não é um sistema isolado, estima-se que o usuário não deve ser desprezado no processo de avaliação do seu desempenho.

Considera-se que os objetivos específicos deste estudo foram alcançados. O Regulamento foi aplicado em projeto real de edificação, que teve seu desempenho avaliado pelos critérios envoltória e sistema de iluminação. Foram levantadas as necessidades de modificação para que ele alcance o nível máximo de classificação. O método de avaliação da envoltória foi discutido a partir da forma de abordagem do comportamento térmico do sistema de fachada, que, como visto, tende a funcionar como um acumulador de calor. Foi avaliada a influência de proteções solares na classificação da envoltória e no consumo de um de seus ambientes-padrão. A proposta de uso de proteções solares calculadas pelo método da Temperatura Neutra foi aplicada e seus efeitos no consumo foram avaliados. Além disto, foi diferenciado o

desempenho de brises e de prateleiras de luz propostos. Neste processo, avaliou-se o comportamento de versões beta do *DesignBuilder*, um dos *softwares* auxiliares ao uso do *EnergyPlus*.

Ressalva-se que o trabalho foi feito utilizando-se um projeto de edificação que, apesar de detalhado, não foi especificado em todos os aspectos necessários a este estudo. Tentou-se aplicar um Regulamento recém-lançado, que sofreu revisões diversas ao longo da elaboração do presente trabalho até sua versão definitiva publicada apenas em março de 2009 e cujo Manual de aplicação encontra-se ainda em desenvolvimento. Demandou dados de materiais e sistemas construtivos que em alguns casos não são disponibilizados pelos fabricantes nem encontrados na literatura. Adotou o *DesignBuilder*, um *software* validado para este tipo de aplicação, porém em suas versões experimentais atualizadas.

Por este contexto, ao longo do processo foram tomadas decisões para superar lacunas de dados ou de informações, permitindo o prosseguimento do trabalho mas criando limitações quanto à precisão de alguns resultados obtidos. Entende-se que algumas destas decisões devem ser revistas no futuro, eventualmente trazendo implicações para os resultados.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS. **Standard 90.1-2004**: energy standard for buildings except low-rise residential buildings. Atlanta, 2004.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS. **New ASHRAE standard aids in evaluating energy analysis programs**: Standard 140-2007. Atlanta, GA, 2007. Disponível em: <<http://www.ashrae.org/pressroom/detail/13429>> Acesso em: 10 fev. 2009.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE building energy labeling program**: promoting the value of energy efficiency in the real estate market. Report of an ASHRAE Presidential Ad-Hoc Committee. 2008. Disponível em: <http://www.ashrae.org/doclib/20080714_abelreport_july2008.pdf> Acesso em: 10 fev. 2009.

ASIA BUSINESS COUNCIL. **Energy efficiency building standards in Japan**. Hong Kong, 2007. Disponível em: <http://www.asiabusinesscouncil.org/docs/BEE/papers/BEE_Policy_Japan.pdf/>. Acesso em: 05 mar. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5413**: iluminação de interiores. Rio de Janeiro, 1992.

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, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: desempenho térmico de edificações – parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005b.

AULICIEMS, A. Psycho-physiological criteria for global thermal zones of building design. **International Journal of Biometeorology**. 1983 *apud* PEREIRA, I. M.; SOUZA, R. V. G. Proteção solar em edificações residenciais e comerciais - desenvolvimento de metodologia. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO- ENTAC, 12., 2008, Fortaleza. **Anais...**

BITTENCOURT, L. **O uso das cartas solares**: diretrizes para arquitetos. 4 ed. Maceió: EDUFAL, 2004.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Departamento Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas 1961-1990**. Brasília, 1992. 84p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Eletrobrás. **Procel Edifica**. [2003]. Disponível em: <<http://www.eletrobras.gov.br/ELB/procel/main.asp?ViewID=%7BF9A71E97-D6DA-4EB4-84DF-1097E8EC081D%7D/>>. Acesso em: 25 mar. 2007.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial**. [S.l.]: 2007a. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br>>. Acesso em: 14 mar. 2007.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Avaliação da conformidade**: Diretoria da Qualidade. 5. ed. [S.l.]: 2007b. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/infotec/publicacoes/acpq.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2007.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: 2007c. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=8213>. Acesso em: 21 mai. 2009.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2008 (ano-base 2007)**: relatório final. [S.l.], 2008a. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2008.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2009.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Eletrobrás. Procel Edifica. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso (ano-base 2005)**: classe comercial alta tensão: relatório Brasil. [S.l.], 2008b. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/>>. Acesso em: 12 mar. 2009.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. [Atlas de Energia Elétrica do Brasil: Energia Hidráulica]. [S.l.]: [200-]. Disponível em: <www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par2_cap3.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2009.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria INMETRO nº 53**: aprova o Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos, 27 de fevereiro de 2009. 2009. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=1424>. Acesso em 05 mar. 2009.

BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY. **Energy Building Conservation Code**: national launch of scheme for star labeling for office buildings. New Delhi, 2006. Disponível em: <<http://www.bee-india.nic.in/sidelinks/ECBC.html>> Acesso em: 05 mar. 2009.

CARLO, J.C. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação da eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais**. 2008. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CIDADES SOLARES. **Aquecedor solar reduz consumo de energia e água e preserva o meio ambiente**. [S.l.]: 2008. Disponível em: <<http://www.cidadessolares.org.br/downloads/2008/energua2008.pdf>>. Acesso em: 08 mar. 2009.

CLAROS, S.; SOLER, A. Indoor daylight climate: comparison between light shelves and overhang performances in Madrid for hours with unit sunshine fraction and realistic values of model reflectance. **Solar Energy**, [New York], v. 71, n. 4, p. 233–239. 2001. Elsevier Science.

COMMUNITIES AND LOCAL GOVERNMENT. **Approved documents and building regulations publications.** [London], 2007. Disponível em: <<http://www.communities.gov.uk/planningandbuilding/buildingregulations/buildingregulationspublications/>>. Acesso em 09 mar.2007.

COMUNIDADES EUROPEÍAS. **Europa Glossário:** instrumentos jurídicos comunitários. [S.l.]: 2007. Disponível em: <http://europa.eu/scadplus/glossary/community_legal_instruments_pt.htm>. Acesso em: 25 mar. 2007.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO CEARÁ. Coordenadoria de Atividades Técnicas. **Norma técnica n. 013/2008:** compartimentação horizontal e compartimentação vertical. Ceará: Secretaria da Segurança Pública e Defesa Social, 2008. Disponível em: <www.cb.ce.gov.br>. Acesso em: 19 jul. 2009.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE MINAS GERAIS. Diretoria de Atividades Técnicas. **Instrução Técnica 07:** compartimentação horizontal e compartimentação vertical. [Belo Horizonte]: 2006. Disponível em: <http://www.portal.cbmmg.mg.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=43:instrucoes-tecnicas&catid=47:dat>. Acesso em: 25 mai. 2009.

CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública. **Instrução Técnica 09:** compartimentação horizontal e compartimentação vertical. São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://www.lennz.com.br/Instru%C3%A7%C3%B5es%20T%C3%A9cnicas/Instrucao%20Tecnica%20-%202009.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2009.

CRAWLEY, D. *et al.* Testing and validation of a new building energy simulation program. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 7., 2001, Rio de Janeiro. [S.l.]: International Building Performance Simulation, 2001, p. 353-359. Disponível em: <<http://gundog.lbl.gov/dirpubs/rio4.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2008.

CRAWLEY, D. *et al.* **Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs.** [S.l.]: U. S. Department of Energy, 2005. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/pdfs/contrasting_the_capabilities_of_building_energy_performance_simulation_programs_v1.0.pdf>. Acesso em 09 out. 2008.

DERINGER, J. Green building codes, standards, ratings. In: GREEN BUILDING CONGRESS, 2001, Hyderabad. [**Anais eletrônicos...**]. Disponível em: <<http://www.greenbusinesscentre.com/joseph.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2009. Apresentação em slides.

DESIGNBUILDER. **ANSI/ASHRAE Standard 140-2004 building thermal envelope and fabric load tests:** DesignBuilder version 1.2.0 (incorporating EnergyPlus version 1.3.0). [London]: DesignBuilder Software, 2006. Disponível em: <http://www.designbuilder.co.uk/documents/ANSI_ASHRAE.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2009.

EURLEX. **Direito da União Européia.** [S.l.]: 2007. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/>>. Acesso em: 25 mar. 2007.

EUROPEAN COMMISSION. Directorate-General for Energy and Transport. **EPBD Buildings Platform**: your information resource on the Energy Performance of Buildings Directive. [S.l.], 2007. Disponível em: <<http://www.buildingsplatform.org/cms/>>. Acesso em 09 mar. 2007.

FROTA, A. B. **Geometria da Insolação**. São Paulo: Geros, 2004. 289 p. v. 1.

GOULART, S. **Levantamento da experiência internacional**: experiência nos Estados Unidos. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005a.

GOULART, S. **Levantamento da experiência internacional**: experiência Européia. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005b.

GOVERNMENT OF PAKISTAN. Ministry of Housing & Works. The National Energy Conservation Centre. **Building energy code of Pakistan**. Islamabad, 1990. Disponível em <<http://www.enercon.gov.pk/Sectors.htm>>. Acesso em: 25 mar. 2007.

GOVHK. Portal of the Hong Kong Special Administrative Region Government. Electrical and Mechanical Services Department. **Energy consumption indicators & benchmarks**: indicators: offices. Hong Kong, 2008. Disponível em: <<http://www.emsd.gov.hk/emsd/eng/pee/classa.shtml>>. Acesso em: 03 mar. 2008.

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL. **[Abordagem da energia em edifícios no LEED-NC® segundo projeto de regionalização 2009 para o Brasil]** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por iaragds@yahoo.com.br em 17 mar.2009.

GUARDIAN INDUSTRIES. **Guardian SunGuard**: Vidros de controle solar e eficiência energética. Manual técnico: Build with light. [S.l.]: 2008. Disponível em <<http://www.sunguardglass.com>>. Acesso em: 08 fev. 2009.

GUIDI, C. **[Planilha com classificações de temperatura do ar externa em função da Temperatura Neutra para Belo Horizonte no período de um ano]** [mensagem pessoal]. Belo Horizonte, 2009. Mensagem recebida por iaragds@yahoo.com.br em mar. 2009.

GUTIERREZ, G.C. R.; LABAKI, L.C. Avaliação de desempenho térmico de dispositivos de proteção solar. p. 1535-1536. ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7, CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 3., 2003, Curitiba. **Anais...**

HONG, W. *et al.* **Building energy efficiency**: Why green buildings are key to Asia's future. Hong Kong: Asia Business Council, 2007. Disponível em: <<http://www.asiabusinesscouncil.org/BEE.html>>. Acesso em: 13 mar. 2007.

HUANG, J. *et al.* **The development of residential and commercial building energy standards for Egypt**. Kuwait: Proc. Energy Conservation in Buildings Workshop, 2003. Disponível em: <<http://gundog.lbl.gov/dirpubs/55521.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2008.

HUI, S.C.M. **Building energy standards and codes**. [Hong Kong]: The University of Hong Kong/ Faculty of Architecture, 2003. Disponível em: <<http://www.arch.hku.hk/research/BEER/besc.htm>>. Acesso em: mar. 2007.

INTERNATIONAL CODE COUNCIL. **IECC-2003**: International Energy Conservation Code. U.S.A., 2003, 214 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Daylighting in buildings**: a source book on daylighting systems and components. U.S.A., 2000. Solar Heating and Cooling Programme. A report of IEA SHC Task 21. ECBCS Annex 29.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings**. Paris, 2008. Disponível em: <http://www.iea.org/g8/2008/Building_Codes.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2009.

INCROPERA, F.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Tradução de Horacio Macedo. Rio de Janeiro: LTC, 1992. Obra original: Fundamentals of heat and mass transfer. 3.ed. Purdue University. School of Mechanical Engineering. [S.l.], [198-].

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. General Reports. Working Group III. **Mitigation of climate change**. [S.l.], 2007. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 15 mar. 2008.

JANDA, K. B.; BUSCH, J. F. World-wide status of energy standards for buildings. **Energy**, n.1, v.19. London, Pergamon, p. 27-44, 1994 *apud* SIGNOR, R. **Análise de regressão do consumo de energia elétrica frente a variáveis arquitetônicas para edifícios comerciais climatizados em 14 capitais brasileiras**. 1999. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Manual de uso da “Regulamentação para Etiquetagem Voluntária de Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos”**. Versão eletrônica 4. 2008 [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por iaragds@yahoo.com.br em 26 de jan.2009. Versão em desenvolvimento. LABEEE da Universidade Federal de Santa Catarina.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Regulamentação para Etiquetagem Voluntária de Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos**. [Santa Catarina], [200-]. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/eletrabras/reg.etiquetagem.voluntaria.html>>. Acesso em: 20 mar. 2009.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW, 1997. 188p.

LAMBERTS, R.; GOULART, S.; CARLO, J.; WESTPHAL, F.; PONTES, R. Regulamentação de Etiquetagem Voluntária de Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais e Públicos. In: ENCONTRO NACIONAL, 9.; LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5., Ouro Preto, 2007. **Anais...**

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. **Energy codes and standards worldwide**. [S.l.]: 1999. Disponível em: <<http://eetd.lbl.gov/EA/ecsw/ECSW.html>>. Acesso em: 10 mar. 2007.

LI, D.H.W.; LAM, J.C. An analysis of daylighting and solar heat for cooling dominated office buildings. **Solar Energy**, v. 65, n. 4, p. 251–262, 1999.

MACEDO, C. C.; PEREIRA, F. O. R. Thermal and luminous performance of direct sunlighting systems. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE- PLEA, 2003, Santiago. **Anais...**

OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. **Benchmark your building**: rating energy performance: Office Buildings. Tennessee, [200-]. Disponível em: <<http://eber.ed.ornl.gov/benchmark/bench.htm>>. Acesso em: 28 mar. 2008.

OCHOA, C. E.; CAPELUTO, I.G. Evaluating visual comfort and performance of three natural lighting systems for deep office buildings in highly luminous climates. **Building and Environment**, n. 41, p. 1128–1135, 2006.

OFFICE OF THE AUSTRALIAN BUILDING CODES. Australian Greenhouse Office. **International survey of building energy codes**. Canberra, 2000. Disponível em: <http://www.environment.gov.au/settlements/energyefficiency/buildings/publications/pubs/international_survey.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2008.

OTEC. **DesignBuilder**: Recursos. São Paulo: OTECWEB, 2008. Disponível em: <<http://otecweb.com.br/page10.aspx>>. Acesso em: 20 mar. 2009.

PARLAMENTO EUROPEU. **Directiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002**: relativa ao desempenho energético dos edifícios. [S.l.], 2002. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/pt/oj/2003/l_001/l_00120030104pt00650071.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2007.

PEDRINI, A. [**Biblioteca com dados de materiais e componentes construtivos brasileiros compostos com dados da ABNT para uso no software DesignBuilder**]. 2009. Versão eletrônica [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por iaragds@yahoo.com.br em 10 fev. 2009.

PEREIRA, I. M.; SOUZA, R. V. G. Proteção solar em edificações residenciais e comerciais: desenvolvimento de metodologia. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO- ENTAC, 12, 2008, Fortaleza. **Anais...**

PEREIRA, I. **Planilha eletrônica**: Temperatura Neutra para o Brasil. 2008. Versão eletrônica [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por iaragds@yahoo.com.br em 23 fev. 2009.

RODRIGUES, P. T. Iluminação eficiente. In: IBAM/Eletróbrás (Org.). **Manual - eficiência energética em prédios públicos**. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <http://www.cqgp.sp.gov.br/gt_licitacoes/publicacoes/procel%20predio_pub_manual_iluminacao.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2007.

ROMERO, M. A.; PHILIPPI, A. A conservação de energia como instrumento de política e gestão. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2000, Porto Alegre. **Anais...**

SANTANA, M. V. **Influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis – SC**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SANTOS, C. M.; BASTOS, L. E. G. Influência dos elementos de fachada no desempenho da iluminação natural em edifícios de escritórios de planta livre. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO- ENTAC, 12., 2008, Fortaleza. **Anais...**

SIGNOR, R. **Análise de regressão do consumo de energia elétrica frente a variáveis arquitetônicas para edifícios comerciais climatizados em 14 capitais brasileiras**. 1999. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

SILVA, V.G.; SILVA, M.G.; AGOPYAN, V. Avaliação de edifícios: definição de indicadores de sustentabilidade. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS- ENECS, 2., 2003a, São Carlos, SP. **Anais...**

SILVA, V. G.; Silva, M. G.; AGOPYAN, V. Avaliação ambiental de edifícios no Brasil: da avaliação ambiental para avaliação de sustentabilidade. **Ambiente Construído**, v. 3, n. 3, p. 7-18, 2003b. Disponível em <<http://www.seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/3491/1892>>. Acesso em: 20 ago. 2009.

SOUZA, R. V. G. de. **[Limites de temperatura neutra para proposição de proteções solares em edifícios residenciais]** [contato pessoal]. 2009.

SOUZA, J. R. G. de. Planilha eletrônica: **[Dados para configuração de vidro no DesignBuilder]**. 2009b. Versão eletrônica [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por iaragds@yahoo.com.br em 31 mar. 2009.

TAVARES, S. F.; LAMBERTS, R. Consumo de energia para construção, operação e manutenção das edificações residenciais no Brasil. In: ENCAC-ENLACAC 2005 - VIII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído, IV Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 2005, Maceió. **Anais...** Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/arquivos/publicacoes/ENCAC05_2037_2045.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2007.

THE ASIA-PACIFIC PARTNERSHIP ON CLEAN DEVELOPMENT AND CLIMATE. **Role enhancement of building energy codes**. [S.l.], 2006. Disponível em: <<http://www.asiapacificpartnership.org/APPProjects/BATF/BATF-06-06-PR.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2007.

THE DERINGER GROUP. **Status of energy codes worldwide**. U.S.A., 2005. Disponível em: <<http://www.deringergroup.com/consulting/EEBC/Status.htm>>. Acesso em: 03 mar. 2008.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. Energy and Environment Group. **Sustainable Energy Strategies: Materials for Decision-Makers: Guidelines**. 2000. Disponível em: <<http://www.energyandenvironment.undp.org/undp/indexAction.cfm?module=Library&action=GetFile&DocumentAttachmentID=1021>>. Acesso em: 21 mai. 2009.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Departamento de Tecnologia. **Desempenho térmico e luminoso de vidros e policarbonatos**. São Paulo, [200-]. Disponível em <<http://www.usp.br/fau/deptecnologia/docs/bancovidros/termica.htm>> Acesso em: 23 set. 2008.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Energy Information Administration. International Energy Annual 2004 (May/July 2006). **System for the analysis of global energy markets**. [S.l.]: 2007a. Disponível em: < www.eia.doe.gov/iea>. Acesso em: 25 mar. 2007.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Federal building codes**: commercial. [Washington, DC]: 2007b. Disponível em: <http://www.energycodes.gov/federal/exist_fedcom.stm>. Acesso em: 25 mar. 2007.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus testing with building thermal envelope and fabric load tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007**. [Washington, DC]: 2008. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/testing.cfm>>. Acesso em: 05 fev. 2009.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus energy simulation software**: EnergyPlus v.3.0. [Washington, DC]: 2009. Disponível em: <www.energyplus.gov> Acesso em: 05 fev. 2009.

WORLDWIDE FUND FOR NATURE-BRASIL. **Agenda elétrica sustentável 2020**: estudo de cenários para um setor elétrico brasileiro eficiente, seguro e competitivo. WWF-Brasil. 2. ed., Brasília, 2007.

APÊNDICE A: Avaliação de estudo de caso pelo método prescritivo do RTQ: Critério Envolvente- Tabelas e desenhos de referência

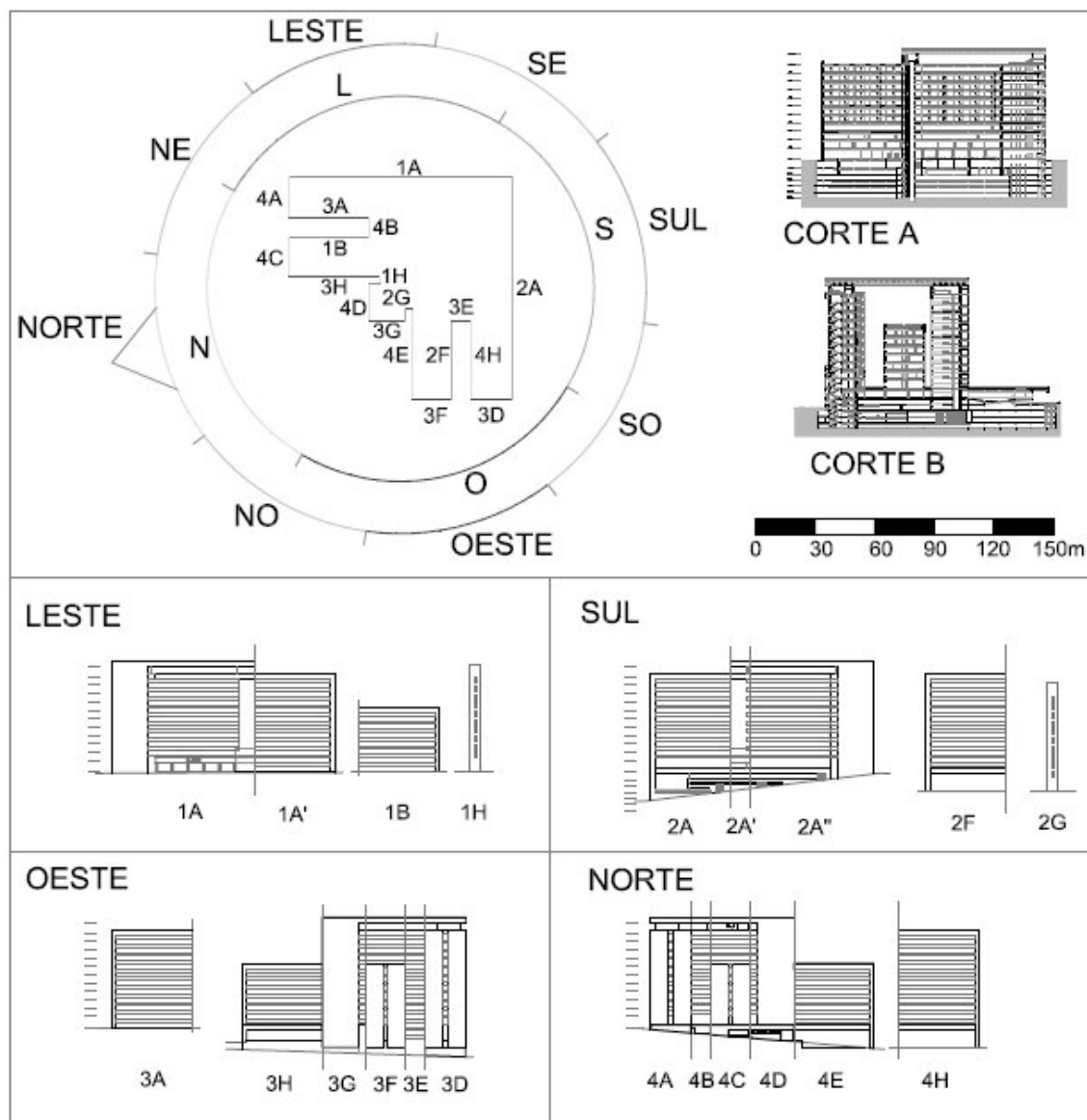


FIG 20: Rosa-dos-ventos com perímetro do edifício e identificação de fachadas para cálculo de PAFt; cortes e fachadas esquemáticas do edifício. Fonte: adaptado pelo autor a partir de arquivos digitais do TJMG.

TAB.18: Áreas de piso por pavimento e área total do edifício

Item	Pavimento	Nível (m)	Pé-direito (m)	Área Bruta (m ²)	Área Útil
1	6º subsolo	-4,7	3,0	12.552,00	0,00
2	5º Subsolo	-1,7	3,0	12.486,47	0,00
3	4º Subsolo	1,3	3,0	9.796,32	2.090,00
4	3º Subsolo	4,3	3,0	10.755,10	403,44
5	2º Subsolo	7,3	3,0	9.398,70	714,76
6	1º Subsolo	10,3	4,7	6.719,00	2.916,52
7	1º Pavimento	15	5,6	7.877,53	6.719,75
8	2º Pavimento	20,6	4,2	6.794,77	6.000,52
9	3º Pavimento	24,8	4,2	6.753,37	5.962,90
10	4º Pavimento	29	4,2	6.753,37	5.962,90
11	5º Pavimento	33,2	4,2	6.753,37	5.962,90
12	6º Pavimento	37,4	4,2	6.753,37	5.962,90
13	7º Pavimento	41,6	4,2	6.753,37	5.962,90
14	8º Pavimento	45,8	4,2	4.923,37	4.132,90
15	9º Pavimento	50,0	4,2	4.923,37	4.132,90
16	10º Pavimento	54,2	4,2	4.923,37	4.132,90
17	11º Pavimento	58,4	4,2	4.923,37	4.132,90
18	12º Pavimento	62,6	4,2	4.317,10	3.445,35
19	13º Pavimento	66,8	Variável	3.361,79	474,55
Área Total				136.647,36	69.110,99

VERIFICAÇÃO DOS PRÉ-REQUISITOS ESPECÍFICOS PARA ENVOLTÓRIA ORIGINAL: ITEM 1

1) TRANSMITÂNCIA TÉRMICA

1.1) Transmitância das Coberturas

1.1.1) Ucob Áreas Condicionadas

Pré-requisito:	Para Nível A=	Ucob ≤	1,0	W/m ² .K	para qualquer ZB
	Para Nível B=	Ucob ≤	1,5	W/m ² .K	para qualquer ZB
	Para Níveis C e D=	Ucob ≤	2,0	W/m ² .K	para qualquer ZB

Item	Composição	Área m ²	U W/m ² .K	Uponder. W/m ² .K
1	LPI+placa concreto	2783,6	0,6	0,23
2	LPI	1477,5	0,6	0,12
3	Terra+laje	413,2	0,6	0,03
4	Telha+laje	2521,4	0,6	0,21
Área Total		7195,7		
Ucob média				0,60
Classificação máxima:				A

Descrição dos sistemas de cobertura:

1	LPI+placa concreto	Laje plana inclinada sob placa de concreto suspenso
2	LPI	Laje plana inclinada
3	Terra+laje	Terra vegetal espessura 30cm sobre laje
4	Telha+laje	Telha aço galv. pintura branca sobre laje (afast.de 2m a 3m).

VERIFICAÇÃO DOS PRÉ-REQUISITOS ESPECÍFICOS PARA ENVOLTÓRIA ORIGINAL: ITEM 1 (CONT.)

1.1.2) Ucob Áreas Não-condicionadasPré-requisito: Para Níveis A,B,C,D = $U_{cob} \leq 2,00 \text{ W/m}^2.\text{K}$ para qualquer ZB

Neste caso as coberturas não-condicionadas estão sobre áreas de permanência

curta (áreas técnicas) ou corredores possuem $U_{cob}=0,6\text{W/m}^2\text{K}$.

Classificação máxima:

A

1.2) Transmissão das Paredes Externas

1.2.1) Upar - Áreas condicionadas e não-condicionadasPré-requisito: Para Níveis A,B,C e D= $U_{env} \leq 3,7 \text{ W/m}^2.\text{K}$ para ZB 1 a 6

Item	Composição	ÁreaFachada(m2)	U(W/m2.K)
1	Granito Cinza Corumbá, Jateado, Sistema Fach. Aerada	11748,4	2,30
2	Granito Vermelho Capão Bonito, Flameado, Fach. Aerada	870,4	2,30
3	ACM (Alumínio Composto)	150,4	5,88
4	Aço Inox Escovado	27,1	5,88
5	Vidro sobre placa cim. ("Structural Glazing", laminado)	8796,9	2,30
Área Total		21593,2	
Upar média			2,33
Classificação máxima:			A

VERIFICAÇÃO DOS PRÉ-REQUISITOS ESPECÍFICOS PARA ENVOLTÓRIA ORIGINAL: ITEM 2

2) CORES E ABSORTÂNCIA DE SUPERFÍCIES

2.1) Coberturas não Aparentes

Pré-requisito: Para Níveis A e B=

 $\alpha \leq 0,4$ para ZB 2 a 8

ou uso de telha cerâmica não esmaltada

ou uso de teto jardim

Para níveis C e D=

não há pré-requisito

Item	Composição	Área (m2)	Valores de α baseados na NBR 15220-2		
			Mínimo	Médio	Máximo
1	LPI+placa concreto	2783,6	0,65	0,72	0,80
2	LPI	1477,5	0,30	0,40	0,50
3	Vidro laminado	1185,1	-	-	-
4	Telha+laje	2521,4	0,25	0,25	0,25
5	Teto jardim	413,2	-	-	-
Total (Sem Teto-Jardim ou		6782,5			
α cobertura (média, adimensional)			0,43	0,48	0,53
Classificação máxima:			C	C	C

2.2) Paredes externas

Pré-requisito: Para Níveis A e B=

 $\alpha \leq 0,4$

para ZB 2 a 8

Para níveis C e D=

não há pré-requisito

Item	Composição	Área (m2)	Valores de α baseados na NBR 15220-2*		
			Mínimo	Médio	Máximo
1	Granito Cinza Corumbá	11748,4	0,30	0,40	0,50
2	Granito Vermelho Capão	870,4	0,74	0,74	0,74
3	ACM (Alumínio Comp.)	150,4	0,05	0,05	0,05
4	Aço Inox Escovado	27,1	0,05	0,05	0,05
5	Vidro sobre placa cim.	8796,9	0,40	0,60	0,80
Área Total		21593,2			
α parede (média, adimensional)			0,33	0,42	0,51
Classificação máxima:			A	C	C

*Nem todos os elementos têm valores máximos, mínimos e médios na NBR (ABNT, 2005a).

Alguns possuem apenas um valor, que neste caso foi utilizado em todas as análises.

VERIFICAÇÃO DOS PRÉ-REQUISITOS ESPECÍFICOS PARA ENVOLTÓRIA ORIGINAL: ITEM 3

3) ILUMINAÇÃO ZENITAL

Pré-requisito: Para Nível A se PAZ > 5% Provar por simulação*

de 0 a 2,0%, FS máx= 0,87

de 2,1 a 3,0%, FS máx= 0,67

de 3,1 a 4,0%, FS máx= 0,52

de 4,1 a 5,0%, FS máx= 0,30

*Provar por simulação que o consumo de energia do projeto é igual ou menor do que o consumo do edifício de referência.

Item	Área de Zenital (m2)	Acob (m2)	PAZ (%)	FS
Quantitativo	1185,1	8380,8	14,14	0,65

Classificação máxima: Necessário simulação

VERIFICAÇÃO DOS PRÉ-REQUISITOS ESPECÍFICOS PARA ENVOLTÓRIA **MODIFICADA***: ITEM 1

* Sistema de fachada em structural glazing e placas cimentícias substituído por alvenaria.

1) TRANSMITÂNCIA TÉRMICA

1.1) Transmitância das Coberturas

1.1.1) Ucob Áreas CondicionadasNão alterado. Classificação: **A****1.1.2) Ucob Áreas Não-condicionadas**Não alterado. Classificação: **A**

1.2) Transmitância das Paredes Externas

1.2.1) Upar - Áreas condicionadas e não-condicionadasUpar média foi alterada com a modificação da fachada, mas a classificação foi mantida: **A**Pré-requisito: Para Níveis A,B,C e D= $U_{env} \leq 3,7 \text{ W/m}^2.\text{K}$ para ZB 1 a 6

Item	Composição	ÁreaFachada(m2)	U(W/m2.K)
1	Granito Cinza Corumbá, Jateado, Sistema Fach. Aerada	11748,4	2,30
2	Granito Vermelho Capão Bonito, Flameado, Fach. Aerada	870,4	2,30
3	ACM (Alumínio Composto)	150,4	5,88
4	Aço Inox Escovado	27,1	5,88
5	Alvenaria	8796,9	1,60
Área Total		21593,2	
Upar média			2,04
Classificação máxima:			A

VERIFICAÇÃO DOS PRÉ-REQUISITOS ESPECÍFICOS PARA ENVOLTÓRIA **MODIFICADA**: ITEM 2

2) CORES E ABSORTÂNCIA DE SUPERFÍCIES

2.1) Coberturas não Aparentes

Item	Composição	Área (m2)	Valores de α adotados	
1	LPI+placa concreto	2783,6	0,60	Alterado*
2	LPI	1477,5	0,30	Mantido**
3	Vidro laminado	1185,1	-	Mantido
4	Telha+laje	2521,4	0,25	Mantido
5	Teto jardim	413,2	-	Mantido
Total (Sem Teto-Jardim)		6782,5		
α cobertura (média, adimensional)			0,40	
Classificação máxima:			A	

*Valor alterado em relação ao projeto original do edifício; **Adotado valor mínimo baseado na NBR 15220-2

2.2) Paredes externas α parede foi alterada com a modificação do sistema de fachada, mas a classificação foi mantida: **A**

Item	Composição	Área (m2)	Valores de α baseados na NBR 15220-2		
			Mínimo	Médio	Máximo
1	Granito Cinza Corumbá	11748,4	0,30	0,40	0,50
2	Granito Vermelho Capão	870,4	0,74	0,74	0,74
3	ACM (Alumínio Comp.)	150,4	0,05	0,05	0,05
4	Aço Inox Escovado	27,1	0,05	0,05	0,05
5	Alvenaria	8796,9	0,30	0,30	0,30
Área Total		21593,2			
α parede (média, adimensional)			0,32	0,37	0,42
Classificação máxima:			A	A	C

VERIFICAÇÃO DOS PRÉ-REQUISITOS ESPECÍFICOS PARA ENVOLTÓRIA **MODIFICADA**: ITEM 3

3) ILUMINAÇÃO ZENITAL

Item	Área de Zenital (m2)	Acob (m2)	PAZ* (%)	FS*
Quantitativo	1185,1	8380,8	5,0	0,30

Classificação máxima: **A**

*Proposta definida para permitir continuação deste estudo de caso sem demandar simulação completa do edifício. Não afetou cálculo de Ucob.

EDIFÍCIO TJMG ORIGINAL-TABELAS PARA CLASSIFICAÇÃO FINAL DA ENVOLTÓRIA

PRE-REQUISITOS					Classificação máxima pelos pré-requisitos
Transmitância termica (W/m².K)			Absortância térmica		
Ambiente condicionado?	Uparede	Ucobertura	Parede	Teto	
SIM	2.33	0.6	0.42	0.48	C

Obs.:Tomados valores resultantes do uso da média dos dados da ABNT.

Parâmetro	Valor
Ape (m2)	8380,8
Atotal (m2)	136647,4
FA	0,06
Aenv (m2)	38771,80
Vtotal (m3)	436060,00
FF do edifício	0,09
FF utilizado	0,15
A envidraçada (m2)	5032,16
Atotal fachada (m2)	30391,00
PAFt utilizado (%)	0,17
FS	0,65
AVS	0,00
AHS	7,32
ICenv	34,72
Icmax	55,15
Icmin	28,46
i	6,67

IC máximo:

PAFt	FS	AVS	AHS
0,6	0,61	0	0

IC mínimo:

PAFt	FS	AVS	AHS
0,05	0,87	0	0

PAFt a utilizar:

PAFt do edifício:	0,17	(adim)
Área da fachada Oeste:	8131,80	(m²)
PAF Oeste:	0,16	(adim)
PAFt+20%:	0,20	(adim)

EFICIENCIA	A	B	C	D	E	NIVEL
Lim min	-	35,14	41,81	48,48	55,16	A
Lim max	35,13	41,80	48,47	55,15	-	

CLASSIFICAÇÃO FINAL

C

EDIFÍCIO TJMG: AHS/AVS ALTERADOS PARA OBTENÇÃO DE **IC_{mínimo}**

PRE-REQUISITOS					Classificação máxima pelos pré-requisitos
Transmitância termica (W/m².K)			Absortância térmica		
Ambiente condicionado?	Uparede	Ucobertura	Parede	Teto	
SIM	2.33	0.6	0.42	0.48	

Obs.: Tomados valores resultantes do uso da média dos dados da ABNT.

Parâmetro	Valor
Ape (m2)	8380,8
Atotal (m2)	136647,36
FA	0,06
Aenv (m2)	38771,80
Vtotal (m3)	436060,00
FF	0,09
FF usado	0,15
A envidraçada (m2)	5032,16
Atotal fachada (m2)	30391,00
PAFt utilizado (%)	0,17
FS	0,65
AVS	45,00
AHS	7,32
ICenv	20,11
Icmax	55,15
Icmin	28,46
i	6,67

EFICIENCIA	A	B	C	D	E	NIVEL
Lim min	-	35,14	41,81	48,48	55,16	A
Lim max	35,13	41,80	48,47	55,15	-	

CLASSIFICAÇÃO FINAL	C
---------------------	----------

ANÁLISE PARAMÉTRICA DE AVH/AHS PARA IC_{mín}:

AVS	AHS	(AVS,AHS)	Icenv
45	0	(45;0)	18,86
45	22,5	(45;22,5)	22,70
22,5	0	(22,5;0)	26,06
45	45	(45;45)	26,54
22,5	22,5	(22,5;22,5)	29,90
0	0,00	(0;0)	33,26
22,5	45,00	(22,5;45)	33,74
0	22,5	(0;22,5)	37,10
0	45,00	(0;45)	40,94
0	0,00	(0;0)	33,26

EDIFÍCIO TJMG: FACHADA ALTERADA PARA ALVENARIA COM BRISES TN

PRE-REQUISITOS					Classificação máxima pelos pré-requisitos
Transmitância termica (W/m².K)			Absortância térmica		
Ambiente condicionado?	Uparede	Ucobertura	Parede	Teto	
SIM	2,04	0,60	0,37	0,4	A

Parâmetro	Valor
Ape (m2)	8380,8
Atotal (m2)	136647,36
FA	0,06
Aenv (m2)	38771,80
Vtotal (m3)	436060,00
FF	0,09
FF usado	0,15
A envidraçada (m2)	3745,50
Atotal fachada (m2)	30391,00
PAFt utilizado (%)	0,16
FS	0,65
AVS	55,54
AHS	19,47
ICenv	18,51
Icmax	55,15
Icmin	28,46
i	6,67

IC máximo:

PAFt	FS	AVS	AHS
0,6	0,61	0	0

IC mínimo:

PAFt	FS	AVS	AHS
0,05	0,87	0	0

PAFt a utilizar:

PAFt do edifício:	0,12	(adim)
Área da fach.Oeste:	8131,80	(m²)
PAF Oeste:	0,16	(adim)
PAFt+20%:	0,15	(adim)

EFICIENCIA	A	B	C	D	E	NIVEL
Lim min	-	35,14	41,81	48,48	55,16	A
Lim max	35,13	41,80	48,47	55,15	-	

CLASSIFICAÇÃO FINAL	A
---------------------	----------

EDIFÍCIO TJMG **ORIGINAL**-TABELA PARA DEFINIÇÃO DE ÂNGULOS AVS E AHS PARA EQUAÇÃO DE IC

OR.	FACH.	TIPO	COMPR. m	H m	S-A m2	S-E %	S-V m2	Quant. (unid.)	S-Total m2	AVS o	AHS o	RESULTADOS:	
NORTE	4A	CIRC	2,00	3,20	6,40	18,00	5,25	10	52,48	0	0	Σarea janela média AVS média AHS	1217,37 0,00 7,75
	4B	ESCR	10,00	1,55	15,50	18,00	12,71	4	50,84	0	0		
		ESCR	10,00	1,55	15,50	18,00	12,71	6	76,26	0	75		
	4C	ESCR	20,00	1,55	31,00	18,00	25,42	4	101,68	0	0		
		CIRC	2,00	3,20	6,40	18,00	5,25	4	20,99	0	0		
	4D	ESCR	3,60	1,55	5,58	18,00	4,58	4	18,30	0	0		
		ESCR	3,60	1,55	5,58	18,00	4,58	6	27,45	0	71		
	4E	ESCR	38,00	1,55	58,90	18,00	48,30	7	338,09	0	0		
	4H	ESCR	38,00	1,55	58,90	18,00	48,30	11	531,28	0	7		
OESTE	3A	ESCR	38,40	1,55	59,52	18,00	48,81	11	536,87	0	7	Σarea janela média AVS média AHS	1286,66 0,00 15,50
	3H	ESCR	38,00	1,55	58,90	18,00	48,30	7	338,09	0	22,5		
	3G	ESCR	3,60	1,55	5,58	18,00	4,58	4	18,30	0	0		
		ESCR	3,60	1,55	5,58	18,00	4,58	7	32,03	0	31		
	3F	ESCR	20,00	1,55	31,00	18,00	25,42	4	101,68	0	0		
		CIRC	2,00	3,20	6,40	18,00	5,25	7	36,74	0	0		
	3E	ESCR	10,00	1,55	15,50	18,00	12,71	4	50,84	0	0		
		ESCR	10,00	1,55	15,50	18,00	12,71	9	114,39	0	75		
	3D	CIRC	2,00	3,20	6,40	18,00	5,25	11	57,73	0	0		
LESTE	1A	ESCR	45,80	1,55	70,99	18,00	58,21	9	523,91	0	0	Σarea janela média AVS média AHS	1432,27 0,00 2,14
	1A'	ESCR	38,40	1,55	59,52	18,00	48,81	11	536,87	0	0		
	1B	ESCR	38,40	1,55	59,52	18,00	48,81	7	341,64	0	7		
	1H	IS	2,80	1,30	3,64	18,00	2,98	10	29,85	0	22,5		
SUL	2A	ESCR	38,40	1,55	59,52	18,00	48,81	10	488,06	0	0	Σarea janela média AVS média AHS	1095,8562 0,00 3,99
	2A'	ESCR	1,80	1,55	2,79	18,00	2,29	9	20,59	0	32		
	2A''	ESCR	44,00	1,55	68,20	18,00	55,92	1	55,92	0	0		
	2F	ESCR	38,00	1,55	58,90	18,00	48,30	11	531,28	0	7		

Legenda:

S=Área (m2)

S-A= Área de Abertura

S-E= Área de Esquadria

S-V= Área Efetiva de Vidro

ΣTotal Área

Janela(m2) **5032,16**AVS média Total(°) **0,00**AHS média Total(°) **7,32**

EDIFÍCIO TJMG -TABELA PARA DEFINIÇÃO DE ÂNGULOS AVS E AHS PARA ICmín

OR.	FACH.	TIPO	COMPR. m	ALTURA m	S-A m2	S-E %	S-V m2	Quant. (unid.)	S-Total m2	AVS o	AHS o	RESULTADOS:	
NORTE	4A	CIRC	2,00	3,20	6,40	18,00	5,25	10	52,48	45	0	Σarea janela	1217,37
	4B	ESCR	10,00	1,55	15,50	18,00	12,71	4	50,84	45	0	média AVS	45,00
	4C	ESCR	10,00	1,55	15,50	18,00	12,71	6	76,26	45	75	média AHS	7,75
		CIRC	2,00	3,20	6,40	18,00	5,25	4	20,99	45	0		
	4D	ESCR	3,60	1,55	5,58	18,00	4,58	4	18,30	45	0		
		ESCR	3,60	1,55	5,58	18,00	4,58	6	27,45	45	71		
	4E	ESCR	38,00	1,55	58,90	18,00	48,30	7	338,09	45	0		
	4H	ESCR	38,00	1,55	58,90	18,00	48,30	11	531,28	45	7		
OESTE	3A	ESCR	38,40	1,55	59,52	18,00	48,81	11	536,87	45	7	Σarea janela	1286,66
	3H	ESCR	38,00	1,55	58,90	18,00	48,30	7	338,09	45	22,5	média AVS	45,00
	3G	ESCR	3,60	1,55	5,58	18,00	4,58	4	18,30	45	0	média AHS	15,50
		ESCR	3,60	1,55	5,58	18,00	4,58	7	32,03	45	31		
	3F	ESCR	20,00	1,55	31,00	18,00	25,42	4	101,68	45	0		
		CIRC	2,00	3,20	6,40	18,00	5,25	7	36,74	45	0		
	3E	ESCR	10,00	1,55	15,50	18,00	12,71	4	50,84	45	0		
		ESCR	10,00	1,55	15,50	18,00	12,71	9	114,39	45	75		
LESTE	3D	CIRC	2,00	3,20	6,40	18,00	5,25	11	57,73	45	0	Σarea janela	1432,27
	1A	ESCR	45,80	1,55	70,99	18,00	58,21	9	523,91	45	0	média AVS	45,00
	1A'	ESCR	38,40	1,55	59,52	18,00	48,81	11	536,87	45	0	média AHS	2,14
	1B	ESCR	38,40	1,55	59,52	18,00	48,81	7	341,64	45	7		
SUL	1H	IS	2,80	1,30	3,64	18,00	2,98	10	29,85	45	22,5	Σarea janela	1095,86
	2A	ESCR	38,40	1,55	59,52	18,00	48,81	10	488,06	45	0	média AVS	45,00
	2A'	ESCR	1,80	1,55	2,79	18,00	2,29	9	20,59	45	32	média AHS	3,99
	2A"	ESCR	44,00	1,55	68,20	18,00	55,92	1	55,92	45	0		
	2F	ESCR	38,00	1,55	58,90	18,00	48,30	11	531,28	45	7		

Legenda:

S=Área (m2)

S-A= Área de Abertura

S-E= Área de Esquadria

S-V= Área Efetiva de Vidro

ΣTotal Área

Janela(m2) **5032,16**AVS média Total(°) **45,00**AHS média Total(°) **7,32**

TJMG: ALVENARIA E PROTEÇÕES POR TN-TABELA PARA DEFINIÇÃO DE AVS E AHS PARA EQ. DE IC

OR.	FACH.	TIPO	COMPR. m	ALTURA m	S-A m2	S-E %	S-V m2	Quant. (unid.)	S-Total m2	AVS o	AHS o	RESULTADOS:	
NORTE	4A	CIRC	2,00	3,20	6,40	18,00	5,25	10	52,48	40	7,5	Σarea janela	1217,37
	4B	ESCR	10,00	1,55	15,50	18,00	12,71	4	50,84	40	7,5	média AVS	40,00
		ESCR	10,00	1,55	15,50	18,00	12,71	6	76,26	40	36,0	média AHS	23,74
	4C	ESCR	20,00	1,55	31,00	18,00	25,42	4	101,68	40	7,5		
		CIRC	2,00	3,20	6,40	18,00	5,25	4	20,99	40	7,5		
	4D	ESCR	3,60	1,55	5,58	18,00	4,58	4	18,30	40	7,5		
		ESCR	3,60	1,55	5,58	18,00	4,58	6	27,45	40	71,0		
	4E	ESCR	38,00	1,55	58,90	18,00	48,30	7	338,09	40	7,5		
	4H	ESCR	38,00	1,55	58,90	18,00	48,30	11	531,28	40	41,0		
OESTE	3A	ESCR	38,40	1,55	59,52	18,00	48,81	11	536,87	90	41,0	Σarea janela	0,00
	3H	ESCR	38,00	1,55	58,90	18,00	48,30	7	338,09	90	22,5	média AVS	90,00
	3G	ESCR	3,60	1,55	5,58	18,00	4,58	4	18,30	90	71,0	média AHS	30,70
		ESCR	3,60	1,55	5,58	18,00	4,58	7	32,03	90	31,0		
	3F	ESCR	20,00	1,55	31,00	18,00	25,42	4	101,68	90	0,0		
		CIRC	2,00	3,20	6,40	18,00	5,25	7	36,74	90	0,0		
	3E	ESCR	10,00	1,55	15,50	18,00	12,71	4	50,84	90	0,0		
		ESCR	10,00	1,55	15,50	18,00	12,71	9	114,39	90	75,0		
	3D	CIRC	2,00	3,20	6,40	18,00	5,25	11	57,73	90	0,0		
LESTE	1A	ESCR	45,80	1,55	70,99	18,00	58,21	9	523,91	65	0,0	Σarea janela	1432,27
	1A`	ESCR	38,40	1,55	59,52	18,00	48,81	11	536,87	65	0,0	média AVS	65,00
	1B	ESCR	38,40	1,55	59,52	18,00	48,81	7	341,64	65	7,0	média AHS	2,14
	1H	IS	2,80	1,30	3,64	18,00	2,98	10	29,85	65	22,5		
SUL	2A	ESCR	38,40	1,55	59,52	18,00	48,81	10	488,06	20	7,5	Σarea janela	1095,86
	2A'	ESCR	1,80	1,55	2,79	18,00	2,29	9	20,59	20	32,0	média AVS	20,00
	2A"	ESCR	44,00	1,55	68,20	18,00	55,92	1	55,92	20	7,5	média AHS	24,20
	2F	ESCR	38,00	1,55	58,90	18,00	48,30	11	531,28	20	41,0		

ΣTotal Área

Janela(m2) **3745,50**AVS média Total(°) **54,75**AHS média Total(°) **19,47**

Legenda:

S=Área (m2)

S-A= Área de Abertura

S-E= Área de Esquadria

S-V= Área Efetiva de Vidro

Notas: 1) Σarea abertura (Oeste)=zero, visto que a projeção da brise proposto encobre toda a abertura.

2) AVS utilizado=45°

APÊNDICE B: Avaliação de estudo de caso pelo método prescritivo do RTQ: critério iluminação – tabelas.

VERIFICAÇÃO DOS PRÉ-REQUISITOS ESPECÍFICOS PARA O SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

Especificação geral dos componentes:

Lâmpadas:	Fluorescentes tubulares T5 28W/220 V
Luminárias:	De embutir para 2 lâmpadas com corpo em chapa de aço tratada e pintura na cor branca Tipo 1: com aletas parabólicas e refletor (projeto original do TJMG) Tipo 2: sem aletas (proposta da autora)
Reatores:	Eletrônicos

Análise de demandas do ambiente a partir da NBR 5413:

Idade: entre 40 e 55 =	-1
Velocidade e precisão:	0
Refletância fundo da tarefa: superior a 70% (mesas com tampo de cor clara):	-1
Total dos pesos para o ambiente em análise:	-2
Atividade: Sala de Leitura = 300 / 500 / 750 lux	
Nível mínimo de iluminação definido para o ambiente:	300 lux

Parâmetros relativos ao Ambiente:

Comprimento máximo (m)	8,13
Largura máx. (m)	3,83
Pé direito (m)	2,75
Perímetro parede (m)	23,9
Altura Plano de trabalho (m)	0,7
Área Plano de trabalho (m ²)	29,5
h plano de trabalho -média (m)	2,05
Área do teto (m ²)	29,5
Área de parede (m ²)	65,725
Área piso (m ²)	29,5
Refletância do teto (%)	70
Refletância da parede (%)	50
Refletância do piso (%)	20
Índice do Ambiente (k)	1,27

Pré-requisitos para obtenção do nível A no ambiente:

4.1.1-Tem divisão de circuitos?	Não se aplica
4.1.2-Contribuição de luz natural?	Sim
4.1.3-Desligamento automático do sistema de iluminação?	Não se aplica

Classificação do sistema de iluminação pelo RTAC:

Parâmetro	Tipo 1: Luminária sem aleta				Tipo 2: Luminária com aleta			
	Coeficiente de utilização: 0,64				Coeficiente de utilização: 0,49			
Pot. Total (lâmpadas+reator)(W)	65	65	62	62	65	65	62	65
Nº-Luminárias/ambiente	6	6	6	6	6	6	6	6
Nº-Lâmpadas/Luminária	2	2	2	2	2	2	2	2
Nºreatores/luminária	1	1	1	1	1	1	1	1
Fluxo luminoso Lâmpada	2400	2900	2400	2900	2400	2900	2400	2900
Pot. Total (w)	390	390	372	372	390	390	372	372
Fluxo luminoso Total (lm)	28800	34800	28800	34800	28800	34800	28800	34800
Ef(lux)	500	604	500	604	363	438	363	438
DPI rf - Calc.	2,64	2,19	2,52	2,09	3,45	2,86	3,30	2,73
Atende a NBR 5413 (300lux)?	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Classif.do sistema de iluminação:	B	B	A	B	D	B	C	B

APÊNDICE C: Arquivo de Simulação do Protótipo-Base (“U-equivalente”)

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: VERSION =====
! File generated by DesignBuilder - 1.9.9.006 7/5/2009 - 13:58:01
! Source file: TJ_Vidro20K_Leste_fachUnic.dsb
Version, 3.0.0.028;
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: BUILDING =====
Building,           !- Name
180,                !- North Axis {deg}
Suburbs,            !- Terrain
0.04,               !- Loads Convergence Tolerance Value
0.4,                !- Temperature Convergence Tolerance Value {deltaC}
FullInteriorAndExteriorWithReflections, !- Solar Distribution
25;                 !- Maximum Number of Warmup Days
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SHADOWCALCULATION =====
ShadowCalculation,
20,                 !- Calculation Frequency
15000;              !- Maximum Figures in Shadow Overlap Calculations
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SURFACECONVECTIONALGORITHM:INSIDE
SurfaceConvectionAlgorithm:Inside,
Detailed;           !- Algorithm
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SURFACECONVECTIONALGORITHM:OUTSIDE
SurfaceConvectionAlgorithm:Outside,
Detailed;           !- Algorithm
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: HEATBALANCEALGORITHM =====
HeatBalanceAlgorithm,
ConductionTransferFunction, !- Algorithm
2000;               !- Surface Temperature Upper Limit
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: TIMESTEP =====
Timestep,
6;                  !- Number of Timesteps per Hour
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SITE:LOCATION =====
! Hourly weather file: C:\Documents and Settings\All Users\Dados de aplicativos\DesignBuilder\Weather
Data\BRA_BELO HORIZONTE_PAMPULH_TMY3-835830.epw
Site:Location,
TJ,                 !- Name
-19.85,              !- Latitude {deg}
-43.95,              !- Longitude {deg}
-3,                  !- Time Zone {hr}
785;                 !- Elevation {m}
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: MATERIAL =====
! _Laje mista- thickness 0,1
1_1_10034,           !- Name
Rough,               !- Roughness
0.1,                 !- Thickness {m}
1.05,                !- Conductivity {W/m-K}
1087,                !- Density {kg/m3}
920,                 !- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,                 !- Thermal Absorptance
0.7,                 !- Solar Absorptance
0;                   !- Visible Absorptance
! Placa Piso Elevado- thickness 0,01
1_3_10049,           !- Name
MediumSmooth,        !- Roughness
0.01,                !- Thickness {m}
0.96,                !- Conductivity {W/m-K}
2000,                !- Density {kg/m3}

```

```

840,          !- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,          !- Thermal Absorptance
0.6,          !- Solar Absorptance
0.6;          !- Visible Absorptance
! Carpete_TJ- thickness 0,002
1_4_10048,    !- Name
MediumSmooth, !- Roughness
0.002,        !- Thickness {m}
0.17,         !- Conductivity {W/m-K}
1200,         !- Density {kg/m3}
1400,         !- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,          !- Thermal Absorptance
0.6,          !- Solar Absorptance
0.6;          !- Visible Absorptance
! Gypsum Plasterboard- thickness 0,025
5_1_27,       !- Name
Rough,        !- Roughness
0.025,        !- Thickness {m}
0.25,         !- Conductivity {W/m-K}
900,          !- Density {kg/m3}
1000,         !- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,          !- Thermal Absorptance
0.5,          !- Solar Absorptance
0.5;          !- Visible Absorptance
! _La de vidro- thickness 0,1
5_2_10037,    !- Name
Rough,        !- Roughness
0.1,          !- Thickness {m}
0.05,         !- Conductivity {W/m-K}
50,           !- Density {kg/m3}
700,          !- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,          !- Thermal Absorptance
0.7,          !- Solar Absorptance
0;            !- Visible Absorptance
! Painei vidro para K- thickness 0,008
9_1_10052,    !- Name
VerySmooth,   !- Roughness
0.008,        !- Thickness {m}
3.804,        !- Conductivity {W/m-K}
2500,         !- Density {kg/m3}
750,          !- Specific Heat {J/kg-K}
0.837,        !- Thermal Absorptance
0.322,        !- Solar Absorptance
0.265;        !- Visible Absorptance
! Placa Cimenticia cinza- thickness 0,01
9_3_10001,    !- Name
MediumSmooth, !- Roughness
0.01,         !- Thickness {m}
0.28,         !- Conductivity {W/m-K}
1440,         !- Density {kg/m3}
1000,         !- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,          !- Thermal Absorptance
0.8,          !- Solar Absorptance
0.8;          !- Visible Absorptance
! Argamassa clara- thickness 0,002
9_6_10051,    !- Name
MediumSmooth, !- Roughness
0.002,        !- Thickness {m}
1.15,         !- Conductivity {W/m-K}
2000,         !- Density {kg/m3}

```

```

1000,          !- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,           !- Thermal Absorptance
0.2,           !- Solar Absorptance
0.2;          !- Visible Absorptance
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: MATERIAL:NOMASS =====
! Air gap 300mm (downwards)
1_2_148,       !- Name
Rough,         !- Roughness
0.23,          !- Thermal Resistance {m2-K/W}
0.9,           !- Thermal Absorptance
0.7,           !- Solar Absorptance
0.7;          !- Visible Absorptance
! Air gap 10mm
7_2_105,       !- Name
Rough,         !- Roughness
0.15,          !- Thermal Resistance {m2-K/W}
0.9,           !- Thermal Absorptance
0.7,           !- Solar Absorptance
0.7;          !- Visible Absorptance
! Air gap (R=0.18m2/K/W)
9_2_205,       !- Name
Rough,         !- Roughness
0.18,          !- Thermal Resistance {m2-K/W}
0.9,           !- Thermal Absorptance
0.7,           !- Solar Absorptance
0.7;          !- Visible Absorptance
! _Camara de ar com alta emissividade > 5cm
9_4_10028,     !- Name
Rough,         !- Roughness
0.21,          !- Thermal Resistance {m2-K/W}
0.9,           !- Thermal Absorptance
1,             !- Solar Absorptance
1;            !- Visible Absorptance
! Link body
11_1_401,      !- Name
Rough,         !- Roughness
999,           !- Thermal Resistance {m2-K/W}
0.9,           !- Thermal Absorptance
0.7,           !- Solar Absorptance
0.7;          !- Visible Absorptance
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: WINDOWMATERIAL:GLAZING
WindowMaterial:Glazing,
Guardian 6mm monolítico Silver 20 Green, !- Window Glass Spectral Data Set Name
0.006,         !- Thickness {m}
,             !- Solar Transmittance at Normal Incidence
,             !- Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence
,             !- Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence
,             !- Visible Transmittance at Normal Incidence
,             !- Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence
,             !- Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence
0,            !- Infrared Transmittance at Normal Incidence
0.15,          !- Front Side Infrared Hemispherical Emissivity
0.63,          !- Back Side Infrared Hemispherical Emissivity
0.708,         !- Conductivity {W/m-K}
1;            !- Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance
WindowMaterial:Glazing,
Guardian 8mm laminado, !- Window Glass Spectral Data Set Name
0.008,         !- Thickness {m}
,             !- Solar Transmittance at Normal Incidence
,             !- Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence

```

```

,          !- Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence
,          !- Visible Transmittance at Normal Incidence
,          !- Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence
,          !- Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence
0,         !- Infrared Transmittance at Normal Incidence
0.15,      !- Front Side Infrared Hemispherical Emissivity
0.15,      !- Back Side Infrared Hemispherical Emissivity
0.708,     !- Conductivity {W/m-K}
1;         !- Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: WINDOWMATERIAL:GAS
WindowMaterial:Gas,
11000,     !- Name
Air,       !- Gas Type
0.01;      !- Thickness {m}
WindowMaterial:Gas,
Half thickness 11000, !- Name
Air,       !- Gas Type
0.005;     !- Thickness {m}
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: CONSTRUCTION =====
! 'Piso Elevado'
! 'Parede Gesso (2 x 25mm) com Lã vidro (100mm)'
! 'Lightweight 2 x 25mm gypsum plasterboard with 100mm cavity'
! 'Vidro-Ar-Placa-Ar-Placa'
! 'Link body'
! <Previous reversed>
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ZONE =====
! Gabinete - Zone 1
12503,     !- Name
0,         !- Direction of Relative North {deg}
0,         !- X Origin {m}
0,         !- Y Origin {m}
0,         !- Z Origin {m}
1,         !- Type
1,         !- Multiplier
,          !- Ceiling Height {m}
130.4304,  !- Volume {m3}
Detailed;  !- Zone Inside Convection Algorithm
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: FENESTRATIONSURFACE:DETAILED
! Window, 5,298m2
FenestrationSurface:Detailed,
W_12503_4_0_0_0_0_Win, !- Name
Window,      !- Surface Type
1001,        !- Construction Name
W_12503_4_0_0, !- Building Surface Name
,            !- Outside Boundary Condition Object
0.5,         !- View Factor to Ground
,            !- Shading Control Name
1,           !- Frame and Divider Name
1,           !- Multiplier
4,           !- Number of Vertices
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: PEOPLE =====
12503,       !- Zone Name
People,      !- Number of People Calculation Method
0.89952,     !- Number of People
,            !- People per Zone Floor Area {person/m2}
,            !- Zone Floor Area per Person {m2/person}
0.5,         !- Fraction Radiant
AUTOCALCULATE, !- Sensible Heat Fraction
Activity Schedule 12503, !- Activity Level Schedule Name
No,          !- Enable ASHRAE 55 Comfort Warnings

```

```

ZoneAveraged,      !- Mean Radiant Temperature Calculation Type
,                  !- Surface Name/Angle Factor List Name
Work efficiency,    !- Work Efficiency Schedule Name
Clothing Schedule 12503, !- Clothing Insulation Schedule Name
AirVelocitySchedule; !- Air Velocity Schedule Name
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: LIGHTS =====
12503,              !- Zone Name
LightingLevel,      !- Design Level Calculation Method
494.736,            !- Lighting Level {W}
,                   !- Watts per Zone Floor Area {W/m2}
,                   !- Watts per Person {W/person}
0,                  !- Return Air Fraction
0.37,               !- Fraction Radiant
0.18,               !- Fraction Visible
1,                  !- Fraction Replaceable
ELECTRIC EQUIPMENT#12503#GeneralLights; !- End-Use Subcategory
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ELECTRIC EQUIPMENT =====
! Computing gain 1
12503,              !- Zone Name
EquipmentLevel,     !- Design Level Calculation Method
274.3536,           !- Design Level {W}
,                   !- Watts per Zone Floor Area {W/m2}
,                   !- Watts per Person {W/person}
0,                  !- Fraction Latent
0.2,                !- Fraction Radiant
0,                  !- Fraction Lost
ELECTRIC EQUIPMENT#12503#05; !- End-Use Subcategory
! Equipment 2
12503 Equipment 2,  !- Name
12503,              !- Zone Name
10001,              !- Schedule Name
EquipmentLevel,     !- Design Level Calculation Method
299.84,             !- Design Level {W}
,                   !- Watts per Zone Floor Area {W/m2}
,                   !- Watts per Person {W/person}
0,                  !- Fraction Latent
0.2,                !- Fraction Radiant
0,                  !- Fraction Lost
ELECTRIC EQUIPMENT#12503#05; !- End-Use Subcategory
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: DAYLIGHTING:CONTROLS
Daylighting:Controls,
12503,              !- Zone Name
2,                  !- Total Daylighting Reference Points
2.887,              !- X-Coordinate of First Reference Point {m}
-2.198,             !- Y-Coordinate of First Reference Point {m}
0.7,                !- Z-Coordinate of First Reference Point {m}
5.767,              !- X-Coordinate of Second Reference Point {m}
-2.197,             !- Y-Coordinate of Second Reference Point {m}
0.7,                !- Z-Coordinate of Second Reference Point {m}
0.5,                !- Fraction of Zone Controlled by First Reference Point
0.5,                !- Fraction of Zone Controlled by Second Reference Point
750,                !- Illuminance Setpoint at First Reference Point {lux}
750,                !- Illuminance Setpoint at Second Reference Point {lux}
1,                  !- Lighting Control Type
0,                  !- Glare Calculation Azimuth Angle of View Direction Clockwise from Zone y-Axis {deg}
100,                !- Maximum Allowable Discomfort Glare Index
0.1,                !- Minimum Input Power Fraction for Continuous Dimming Control
0.1,                !- Minimum Light Output Fraction for Continuous Dimming Control
0,                  !- Number of Stepped Control Steps
1;                  !- Probability Lighting will be Reset When Needed in Manual Stepped Control

```

APÊNDICE D: Resultados gerais das simulações dos protótipos

PROTÓTIPO	ORIENT.	CONSUMO ANUAL ENERGIA		ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL	
		(KWh)	(KWh/m2)	(KWh)	(KWh/m2)
A1	LESTE	4786,05	162,2	531,23	18,0
	NORTE	4694,13	159,1	380,8	12,9
	OESTE	4608,75	156,2	371,99	12,6
	SUL	4171,46	141,4	594,71	20,2
A2	LESTE	6722,26	227,9	716,72	24,3
	NORTE	6753,54	228,9	548,95	18,6
	OESTE	6547,85	222,0	531,93	18,0
	SUL	5348,79	181,3	810,96	27,5
A3	LESTE	5160,34	174,9	305,77	10,4
	NORTE	5283,36	179,1	225,52	7,6
	OESTE	5115,46	173,4	204,96	6,9
	SUL	3915,39	132,7	304,08	10,3
A4	LESTE	5421,29	183,8	300,95	10,2
	NORTE	5628,9	190,8	223,01	7,6
	OESTE	5420,66	183,8	202,05	6,8
	SUL	3966,47	134,5	298,01	10,1
B1	LESTE	4592,37	155,7	525,59	17,8
	NORTE	4437,34	150,4	375,17	12,7
	OESTE	4356,28	147,7	366,7	12,4
C2	LESTE	4401,07	149,2	656,65	22,3
	NORTE	4304,4	145,9	622,8	21,1
	OESTE	4337,55	147,0	605,51	20,5
	SUL	4252,36	144,1	753,21	25,5
C3	LESTE	4319,39	146,4	585,56	19,8
	NORTE	4114,32	139,5	496,66	16,8
	OESTE	4147,84	140,6	465,38	15,8
	SUL	4144,93	140,5	657,76	22,3
D1	LESTE	4461,44	151,2	802,6	27,2
	NORTE	4126,08	139,9	484,57	16,4
	OESTE	4656,41	157,8	1003,69	34,0
	SUL	4131,31	140,0	640,27	21,7
D2	LESTE	4400,72	149,2	600,41	20,4
	NORTE	4150,81	140,7	395,36	13,4
	OESTE	4330,87	146,8	664,46	22,5
	SUL	4097,64	138,9	601,31	20,4
D3	LESTE	4428,62	150,1	454,2	15,4
	NORTE	4216,33	142,9	288,38	9,8
	OESTE	4149,55	140,7	427,71	14,5
	SUL	3954,25	134,0	456,42	15,5
D4	LESTE	4336,21	147,0	406,9	13,8
	NORTE	4230,67	143,4	261,77	8,9
	OESTE	4172,51	141,4	465,57	15,8
	SUL	3914,45	132,7	393,73	13,3
D1:TN sem	NORTE	3986,66	135,1	299,32	10,1
brise vertical	SUL	3857,56	130,8	426,83	14,5

PROT.	ORIENT.	GANHO CALOR FACH. OPACA			FACH. TRANSLÚCIDA			TOTAL (KWh)
		SUPER.	INFER.	SUBTOTAL	SUPER.	INFER.	SUBTOTAL	
A1	LESTE	-	-	-241,99	-	-	933,02	691,03
	NORTE	-	-	-172,46	-	-	889,16	716,7
	OESTE	-	-	-228,71	-	-	888,75	660,04
	SUL	-	-	-403,35	-	-	409,12	5,77
A2	LESTE	1211,7	990,33	2202,03	-	-	317,37	2519,4
	NORTE	1228,1	1004,88	2232,98	-	-	934,94	3167,92
	OESTE	1191,56	971,26	2162,82	-	-	934,5	3097,32
	SUL	510,25	404,67	914,92	-	-	430,21	1345,13
A3	LESTE	-	-	-382,62	-	-	2577,41	2194,79
	NORTE	-	-	-284,49	-	-	2465,6	2181,11
	OESTE	-	-	-360,5	-	-	2455,59	2095,09
	SUL	-	-	-459,37	-	-	1131,07	671,7
A4	LESTE	-	-	-398,52	-	-	2915,79	2517,27
	NORTE	-	-	-300,77	-	-	2794,13	2493,36
	OESTE	-	-	-377,54	-	-	2778,18	2400,64
	SUL	-	-	-460,49	-	-	1278,94	818,45
B1	LESTE	-	-	-460,44	-	-	906,67	446,23
	NORTE	-	-	-408,82	-	-	864,05	455,23
	OESTE	-	-	-451,09	-	-	863,65	412,56
C2	LESTE	-	-	-357,99	-	-	493,61	135,62
	NORTE	-	-	-323,14	-	-	380,82	57,68
	OESTE	-	-	-357,19	-	-	466,66	109,47
	SUL	-	-	-467,02	-	-	284,87	-182,15
C3	LESTE	-	-	-375,71	-	-	537,54	161,83
	NORTE	-	-	-333,78	-	-	405,38	71,6
	OESTE	-	-	-373	-	-	511,51	138,51
	SUL	-	-	-485,71	-	-	330,12	-155,59
D1	LESTE	-	-	-337,44	-	-	317,76	-19,68
	NORTE	-	-	-347,76	-	-	431,47	83,71
	OESTE	-	-	-352,69	-	-	169,27	-183,42
	SUL	-	-	-511,72	-	-	122,13	-389,59
D2	LESTE	-	-	-392,22	391,11	241,58	632,69	240,47
	NORTE	-	-	-363,76	324,55	280,01	604,56	240,8
	OESTE	-	-	-372,68	310,05	95,68	405,73	33,05
	SUL	-	-	-506,63	163,3	238,51	401,81	-104,82
D3	LESTE	-	-	-448,74	941,75	214,58	1156,33	707,59
	NORTE	-	-	-398,47	781,12	280,01	1061,13	662,66
	OESTE	-	-	-409,27	746,57	95,68	842,25	432,98
	SUL	-	-	-522,29	392,83	238,51	631,34	109,05
D4	LESTE	-	-	-430,52	777,9	425,18	1203,08	772,56
	NORTE	-	-	-398,6	663,96	565,61	1229,57	830,97
	OESTE	-	-	-393,74	617,28	192,69	809,97	416,23
	SUL	-	-	-527,81	330,22	479,53	809,75	281,94
D1:TN sem	NORTE	-	-	-350,88	-	-	852,23	501,35
brise vertical	SUL	-	-	-508,56	-	-	657,9	149,34