



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**“AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE TERMOGRAFIA  
INFRAVERMELHA PARA IDENTIFICAÇÃO DE  
ESTRUTURAS OCULTAS E DIAGNÓSTICO DE  
ANOMALIAS EM EDIFICAÇÕES:**

**Ênfase em Edificações do Patrimônio Histórico”**

**EDUARDO CABALEIRO CORTIZO**

**Belo Horizonte, 02 de Julho de 2007**

Eduardo Cabaleiro Cortizo

**“AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE TERMOGRAFIA  
INFRAVERMELHA PARA IDENTIFICAÇÃO DE  
ESTRUTURAS OCULTAS E DIAGNÓSTICO DE  
ANOMALIAS EM EDIFICAÇÕES:**

**Ênfase em Edificações do Patrimônio Histórico.”**

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

Área de concentração: Calor e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Marcos Pinotti Barbosa

Universidade Federal de Minas Gerais

Co-orientador: Prof. PhD. Luis Antônio Cruz Souza

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2007

## FICHA CATALOGRÁFICA

Cortizo, Eduardo Cabaleiro

C829a      Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações : ênfase em edificações do patrimônio histórico. / Eduardo Cabaleiro Cortizo - 2007.

178f. : il.

Orientador: Marcos Pinotti Barbosa

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Tecnologia – Aspectos ambientais 2. São Sebastião das Águas Claras ( Capela: Nova Lima, MG) – Patrimônio cultural – Proteção 3. Tecnologia da construção 4. Termografia digital para edificações I. Barbosa, Marcos Pinotti II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia III. Título

CDD : 690.24



**Universidade Federal de Minas Gerais**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**“AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE TERMOGRAFIA  
INFRAVERMELHA PARA IDENTIFICAÇÃO DE  
ESTRUTURAS OCULTAS E DIAGNÓSTICO DE  
ANOMALIAS EM EDIFICAÇÕES:**

**Ênfase em Edificações do Patrimônio Histórico”**

**EDUARDO CABALEIRO CORTIZO**

Tese defendida e aprovada em 02, de julho de 2007, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “**Doutor em Engenharia Mecânica**”, na área de concentração Calor e Fluidos.

---

**Prof. Dr. Marcos Pinotti Barbosa – UFMG – Orientador**

---

**Prof. PhD. Luis Antônio Cruz Souza – UFMG – Co - orientador**

---

**Prof. Dr Jurandir Itizo Yanagihara – USP**

---

**Prof. Dr Silvio Luiz de Mello Junqueira – UTFPR**

---

**Prof. Dr Marco Antonio Penido de Rezende – UFMG**

---

**Prof. Dr Abdias Magalhães Gomes – UFMG**

---

**Prof. Dr Geraldo Augusto Campolina França – UFMG**

## AGRADECIMENTOS

### Agradeço

Ao meu departamento, pela ajuda e esforço na substituição de funções, em especial aos professores e funcionários.

Ao Sr. Mauro Augusto, Secretário Municipal de Patrimônio Histórico e Cultural do Município de Nova Lima.

Ao Conselho Municipal do Patrimônio Histórico e Cultural do Município de Nova Lima.

À comunidade da região do distrito de São Sebastião de Águas Claras.

Ao Pároco da Capela São Sebastião de Águas Claras: Frei Thiago.

À FINEP, (Financiadora de Estudos e Projetos – Projeto RestauraBR no 1330-04) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – processo no 559 136 01/00) por financiar a aquisição do equipamento de termografia para execução dos trabalhos laboratoriais: Teletherm 1026 SC.

À empresa Flir System pela cessão do equipamento de termografia para execução dos trabalhos de campo e também do software “Remoto 8 Pro” e aos seus colaboradores Ricardo Damasceno, Jorge Policena e Atilio Veratti.

Ao Professor e historiador Ivo Porto de Menezes pela colaboração e cessão das fotos históricas da Capela São Sebastião de Águas Claras.

Ao Amigo Jorge Moreira pelas várias vezes que informou a previsão do tempo para a região.

Aos colegas Rodrigo Moreira, Jussara Grosch e Gianni Corranacchia pela ajuda e dedicação.

Aos alunos Aimara Britto, Luciano Grossi, Camila Pereira, Marina Brandão, Aline Ferreira pela colaboração e ajuda na digitação e visualização.

Aos meus pais pelo exemplo, dedicação e amor.

Aos meus queridos filhos Maria Luísa e Daniel pela compreensão e dedicação, ao Daniel pela correção e tradução.

À minha querida esposa, Josilene, pelo amor, renúncia, dedicação e colaboração em todo o trabalho.

Ao meu Co-Orientador Prof. Luis de Souza pela confiança e estímulo

Ao meu Orientador Prof. Marcos Pinotti pela paciência, orientação, dedicação e temperança.

Ao meu amigo, MESTRE e Professor José Rubens Gonçalves pela orientação, ajuda, correção, dedicação, estímulo e exemplo.

*No meio do caminho*

*Carlos Drummond de Andrade*

*“No meio do caminho tinha uma pedra  
tinha uma pedra no meio do caminho  
tinha uma pedra  
no meio do caminho tinha uma pedra.*

*Nunca me esquecerei desse acontecimento  
na vida de minhas retinas tão fatigadas.  
Nunca me esquecerei que no meio do caminho  
tinha uma pedra  
Tinha uma pedra no meio do caminho  
no meio do caminho tinha uma pedra.”*

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11	
LISTA DE TABELAS E QUADROS	15	
LISTA DE GRÁFICOS	17	
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	18	
RESUMO	20	
1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Justificativa	22
1.2	Objetivos	23
1.2.1	Objetivo Geral	23
1.2.2	Objetivos Específicos	24
1.3	Premissas	24
1.4	Hipóteses	25
1.5	Abrangência	25
1.6	A inovação e o inédito	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	Patologia no Patrimônio Histórico	27
2.2	Técnica de identificação de estruturas ocultas e das manifestações das patologias	29
2.3	Técnica destrutiva de identificação de estruturas ocultas e das manifestações das patologias	30
2.4	Técnica não destrutiva de identificação de estruturas ocultas e das manifestações das patologias	31
2.5	Transferência de Calor	33
2.5.1	Medição de temperatura sem contato	34
2.5.2	Medição de temperatura com contato	35
2.6	Termografia	36

2.6.1	Características e princípios do Imageamento Termográfico	38
2.6.1.1	Propagação do calor no interior de um corpo	39
2.6.1.2	Técnica de termografia digital	39
2.6.1.2.1	Técnicas de termografia digital - Termografia passiva	39
2.6.1.2.2	Técnicas de termografia digital - Termografia ativa	40
2.6.2.	Sistema de imageamento termal infravermelho	43
2.6.2.1	A constituição dos equipamentos	43
2.6.2.1.1	Sistema Óptico	44
2.6.2.1.2	Sistema de varredura	45
2.6.2.1.3	Percepção de temperatura	48
2.6.2.1.4	Técnica de resfriamento de detectores	50
2.6.2.1.5	Formação da imagem	51
2.6.3	Termografia aplicada em edificações	52
3	METODOLOGIA	59
3.1	Apresentação do objeto em estudo	59
3.2	Importância histórica	60
3.3	Descrição da capela	61
3.4	Variáveis Ambientais	63
3.5	Insolação	64
3.6	Desenvolvimento do trabalho de campo – O experimento	64
3.6.1	Data e condições climáticas	64
3.7	Alvo termográfico – extrato da alvenaria	65
3.8	Descrição dos equipamentos	66
3.9	Coleta de dados – medição	69
3.9.1	Medição com equipamentos fixos	69
3.9.2	Medição com equipamentos móveis	69
3.10	Localização dos equipamentos de medição	71
3.10.1	Localização dos equipamentos de medição por contato – termopares	71

3.10.2	Localização dos equipamentos para medição de carga solar incidente na superfície	73
3.10.3	Localização dos equipamentos para medição de temperatura ambiente e umidade relativa do ar	75
3.10.4	Localização dos equipamentos para medição da velocidade do vento	75
3.10.5	Localização dos equipamentos para medição de termografia	76
3.11	Validação dos resultados	76
3.11.1	Validação qualitativa dos resultados	77
3.11.2	Validação quantitativa dos resultados	77
3.12	Formulação numérica	82
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	88
4.1	Medição em campo	88
4.1.1	Termopares	88
4.1.2	Medição da velocidade do vento	89
4.1.3	Medição dos piranômetros	89
4.1.4	Medição da temperatura ambiente e umidade relativa do ar	90
4.1.5	Resultados da termografia	91
4.1.5.1	Resultados qualitativos	92
4.1.5.2	Resultados quantitativos	93
5	DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	94
5.1	Análise dos resultados das técnicas de contato e sem contato	94
5.2	Análise dos resultados de termografia – condição ambientais	97
5.2.1	Superfície interna	98
5.2.2	Superfície externa	100
5.3	Análise dos resultados – respostas térmicas da alvenaria	102
5.4	Validação dos resultados da pesquisa	105
5.4.1	Validação qualitativa dos resultados da termografia	105
5.4.2	Validação quantitativa dos resultados da termografia	107
6	CONCLUSÃO	114

ABSTRACT	117
RESUMEN	118
REFERÊNCIAS	119
APÊNDICE A - TERMOGRAMAS E RESULTADOS	129
APÊNDICE B - VALORES DA VELOCIDADE DO VENTO	155
ANEXO A DADOS SOBRE O EQUIPAMENTO DE TERMOGRAFIA	156
ANEXO B CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE TERMOGRAFIA	157
ANEXO C FOTOS DATALOG E RELATÓRIO DE VERIFICAÇÃO DOS TERMOPARES	158
ANEXO D PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DA TERMOGRAFIA	163
D.1 Sistema de imageamento termal infravermelho	163
D.1.1 Produção da imagem	164
D.1.2 Formação da imagem	166
D.1.2.1 Contraste térmico	167
D.1.2.2 Mínima Resolução de Diferença de Temperatura – MRTD	168
D.1.2.3 Sensibilidade Térmica – Thermal Sensitivity	168
D.1.2.4 Taxa de Ruído do Sinal – <i>Signal-to Noise Ratio</i> (SNR)	169
D.1.2.5 Força do Ruído – Noise Equivalent Power (NEP)	170
D.1.2.6 Detectividade específica	171
D.1.2.7 Tamanho mínimo detectável	171
D.1.2.8 Faixas de temperatura	173
D.1.2.9 Precisão absoluta – Absolute accuracy	173
D.1.2.10 Resolução espacial	174
ANEXO E PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS	177

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Fotos de patologias em obras de terra (adobe). Desprendimento da estrutura de vedação e revestimento - Capela do Bom Jesus da Pobreza – Tiradentes, Minas Gerais	28
FIGURA 2.2	Presença de trinca sob a esquadria, 2005. Fotos do Museu Mariano Procópio – Juiz de Fora, M.G.	30
FIGURA 2.3	Foto da intervenção na fachada de adobe e estrutura autônoma.	31
FIGURA 2.4	Termograma - foto da termografia digital da fachada - Igreja de San Omobono, Cremona, Itália	32
FIGURA 2.5	Foto da fachada - Igreja de San Omobono, Cremona, Itália	32
FIGURA 2.6	Fotos e termogramas de Igreja São Francisco de Assis, Belo Horizonte, M.G.	35
FIGURA 2.7	Propagação idealizada de um único pulso de calor em um material	39
FIGURA 2.8	Técnica de termografia passiva	40
FIGURA 2.9	Diversas fontes de energia	41
FIGURA 2.10	Diagrama, adaptado, de um sistema típico de sistema de inspeção infravermelha	43
FIGURA 2.11	Configuração básica do termômetro de radiação infravermelha	44
FIGURA 2.12	Refletância espectral do vidro. Note a escala não-linear do comprimento de onda	45
FIGURA 2.13	Esquema de sensoriamento de um scanner linear (Thermoprofile), utilizado para monitoração de fornos rotativos e linhas de produção contínua	46
FIGURA 2.14	Diagrama do alvo em seu meio	46
FIGURA 2.15	Diagrama da área de pesquisa e o meio	47
FIGURA 2.16	Diagrama da visada de um alvo	47
FIGURA 2.17	Típico sistema de imageamento infravermelho sem resfriamento	49
FIGURA 2.18	Igreja de San Omobono, Cremona, Itália, 22 de maio de 1994	54
FIGURA 2.19	Igreja de San Omobono, Cremona, Itália	54
FIGURA 2.20	Fachada do oratório de Guardia di Sotto, Corsico, Itália	55
FIGURA 2.21	Imagem composta de termogramas infravermelhos mostra a distribuição da elevação da umidade na base da fachada da Igreja de San Massimo, Sedriano, Itália, 15 de maio de 2000	55

FIGURA 2.22	Igreja de Santa Maria de Cantuello, Ricengo, Itália	56
FIGURA 2.23	Santa Maria do Lavello, Bergamo, Itália	56
FIGURA 2.24	Altar Mor da Igreja de São Francisco de Assis, Belo Horizonte, Brasil, Outubro – 2006	57
FIGURA 2.25	Detalhe lateral do Coro da Igreja de São Francisco de Assis, Belo Horizonte, Brasil, Outubro - 2006	58
FIGURA 2.26	Detalhe da fachada lateral da Igreja de São Francisco de Assis, Belo Horizonte, Brasil, Outubro - 2006	58
FIGURA 3.1	Foto da Capela de São Sebastião das Águas Claras.	60
FIGURA 3.2	Planta da Capela de São Sebastião.	61
FIGURA 3.3	Foto da Capela - Vedação em adobe.	62
FIGURA 3.4	Insolação nas fachadas e vãos de ventilação livre.	64
FIGURA 3.5	Foto do extrato de alvenaria da fachada frontal da Capela, 1986.	66
FIGURA 3.6	Foto do extrato de alvenaria da fachada frontal da Capela, 2007	66
FIGURA 3.7	Foto da ThermaCam E320, FLIR (USA).	67
FIGURA 3.8	Foto da TELETHERM INFRARED – MARK-1026. ASHWIN SYSTEMS (USA)	67
FIGURA 3.9	Foto do termopar, no interior da Capela – sob o coro	67
FIGURA 3.10	Foto do termo anemômetro.	68
FIGURA 3.11	Foto do Hobo.	68
FIGURA 3.12	Fotos do experimento da emissividade.	70
FIGURA 3.13	Projeto da localização dos termopares.	72
FIGURA 3.14	Fotos da localização dos termopares.	73
FIGURA 3.15	Localização dos piranômetros.	74
FIGURA 3.16	Fotos da localização dos piranômetros.	74
FIGURA 3.17	Localização e fotos dos Hobos.	75
FIGURA 3.18	Localização anemômetro.	75
FIGURA 3.19	Posição da execução dos pontos de execução da termografia.	76
FIGURA 3.20	Representação da estrutura típica da alvenaria.	78
FIGURA 3.21	Modelo matemático – Matrix numérica para o modelo matemático.	80
FIGURA 3.22	Foto da alvenaria	80
FIGURA 3.23	Representação do modelo da célula da alvenaria.	81
FIGURA 3.24	Representação da estrutura interna da alvenaria.	81

FIGURA 3.25	Representação das condições de contorno	83
FIGURA 5.1	Os termogramas internos e condições climáticas no período de observação.	99
FIGURA 5.2	Os termogramas externos e condições climáticas no período de observação.	101
FIGURA 5.3	O Termograma e os gráficos das temperaturas nas linhas	103
FIGURA 5.4	O Termograma e os gráficos das temperaturas nos materiais	104
FIGURA 5.5	Fotos da restauração.	106
FIGURA 5.6	Foto da restauração.	106
FIGURA 5.7	Fotografia da fachada.	106
FIGURA 5.8	Termograma da alvenaria frontal.	106
FIGURA 5.9	A comparação dos resultados entre a termografia e a foto visível.	107
FIGURA A.1	Termograma dia 13/04/07 – 17 hs	129
FIGURA A.2	Termograma dia 13/04/07 – 18 hs	130
FIGURA A.3	Termograma dia 13/04/07 – 19 hs	131
FIGURA A.4	Termograma dia 13/04/07 – 20 hs	132
FIGURA A.5	Termograma dia 13/04/07 – 21 hs	133
FIGURA A.6	Termograma dia 13/04/07 – 22 hs	134
FIGURA A.7	Termograma dia 13/04/07 – 23 hs	135
FIGURA A.8	Termograma dia 14/04/07 – 00 hs	136
FIGURA A.9	Termograma dia 14/04/07 – 01 hs	137
FIGURA A.10	Termograma dia 14/04/07 – 02 hs	138
FIGURA A.11	Termograma dia 14/04/07 – 03 hs	139
FIGURA A.12	Termograma dia 14/04/07 – 04 hs	140
FIGURA A.13	Termograma dia 14/04/07 – 05 hs	141
FIGURA A.14	Termograma dia 14/04/07 – 06 hs	142
FIGURA A.15	Termograma dia 14/04/07 – 07 hs	143
FIGURA A.16	Termograma dia 14/04/07 – 08 hs	144
FIGURA A.17	Termograma dia 14/04/07 – 09 hs	145
FIGURA A.18	Termograma dia 14/04/07 – 10 hs	146
FIGURA A.19	Termograma dia 14/04/07 – 11 hs	147
FIGURA A.20	Termograma dia 14/04/07 – 12 hs	148
FIGURA A.21	Termograma dia 14/04/07 – 13 hs	149
FIGURA A.22	Termograma dia 14/04/07 – 14 hs	150

FIGURA A.23	Termograma dia 14/04/07 – 15 hs	151
FIGURA A.24	Termograma dia 14/04/07 – 16 hs	152
FIGURA A.25	Termograma dia 14/04/07 – 17 hs	153
FIGURA A.26	Termograma dia 14/04/07 – 18 hs	154
FIGURA C.1	Sistema de medição. O conjunto de termopares e equipamento registrador – Datalog.	158
FIGURA C.2	Sistema de calibração do conjunto de termopares.	158
FIGURA C.3	Relatório de Verificação de Piranômetro – Folha 01/02.	159
FIGURA C.4	Relatório de Verificação de Piranômetro – Folha 02/02.	160
FIGURA C.5	Relatório de Verificação de Termopares – Folha 01/02.	161
FIGURA C.6	Relatório de Verificação de Termopares – Folha 02/02.	162
FIGURA D 1	Um sistema de imageamento termal pode medir apenas radiação. O sistema não pode separar a radiação emitida da radiação refletida.	163
FIGURA D 2	Determinação do campo total de visão para imageamento infravermelho.	165
FIGURA D 3	Modelo Óptico.	172

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 5.1	Valores das diferenças de temperatura – superfície interna.	95
TABELA 5.2	Valores das diferenças de temperatura – superfície externa	96
TABELA 5.3	Valores da temperatura (termografia, termopares e software) e das médias na superfície interna.	108
TABELA 5.4	Valores da temperatura (termografia, termopares e software) e das médias na superfície externa.	109
QUADRO 2.1	Características do termopar T.	36
QUADRO 2.2	Linha histórica da evolução da termografia.	38
QUADRO 2.3	Variação da energia em termografia ativa	40
QUADRO 2.4	Possibilidades de técnica ativa.	41
QUADRO 3.1	Fatores climáticos da região.	63
QUADRO 3.2	Data e condição ambientais de execução.	65
QUADRO 3.3	Quadro de dimensões do modelo físico.	65
QUADRO 3.4	Disposição dos termopares.	72
QUADRO 3.5	Dimensões dos nodos da malha do modelo matemático.	80
QUADRO 3.6	Condições de contorno.	83
QUADRO 3.7	Equações para determinação da temperatura em cada nodo.	85
QUADRO 3.8	Equações para determinação da estabilidade do modelo.	86
QUADRO 3.9	Legenda da representação e nomenclatura dos elementos.	87
QUADRO 4.1	Termopares e temperaturas.	88
QUADRO 4.2	Medição da velocidade do ar – externo.	89

QUADRO 4.3	Dados do piranômetros.	90
QUADRO 4.4	Tratamento das medidas de temperatura e umidade relativa.	91
QUADRO 4.5	Termogramas – Alvenaria frontal externa e interna.	92
QUADRO 4.6	Resultados qualitativos – Termogramas da alvenaria frontal externa e interna.	93
QUADRO 5.1	Intervenções na Capela de São Sebastião.	105
QUADRO 5.2	Validação Qualitativa – por processo comparativo.	106
QUADRO B.1	Valores da velocidade do ar – externo.	155
QUADRO D.1	Aplicações das técnicas da termografia infravermelha.	175
QUADRO D.2	Vantagens e limitações das técnicas de termografia infravermelha.	176
QUADRO E.1	Unidades e nomenclatura.	177
QUADRO E.2	Propriedades físicas dos materiais.	177

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 5.1	Valores médios da temperatura (termografia, termopares e software), na superfície interna.	110
GRÁFICO 5.2	Valores médios da temperatura (termografia, termopares e software), na superfície externa.	110

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

### Letras Latinas

$a$  – Área, [m<sup>2</sup>].

$Bi$  – Número de Biot.

$c$  – Concentração molar, [kmol/m<sup>3</sup>]; Taxa de capacidade de calor, [W/K].

$Fo$  – Número de Fourier.

$G$  – irradiação, [W/m<sup>2</sup>]; velocidade mássica, [kg/s.m<sup>2</sup>].

$h$  – Coeficiente de transferência de calor por convecção, [w/m<sup>2</sup>.k]; Constante de Plank.

$k$  – Condutividade térmica, [W/m]; Constante de Boltzmann.

### Letras gregas

$\alpha$  – Difusividade térmica do material da parede, [m<sup>2</sup>/s].

$\rho$  – Densidade do material da parede, [kg/m<sup>3</sup>].

$c$  – Calor específico do material da parede, [J/(kg.K)].

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann, condutividade elétrica.

$\tau$  – Tensão de cisalhamento, [N/m<sup>2</sup>]; transmitância.

$\theta$ resolução – Resolução angular da câmera.

### Abreviaturas

D\* – Detectividade específica.

NETD – Noise equivalent temperature difference.

NEP – Noise Equivalent Power (Força do Ruído).

MRTD – Mínima Resolução de Diferença de Temperatura.

SNR – *Signal-to Noise Ratio* (Taxa de Ruído do Sinal).

## RESUMO

O objetivo *mister* do trabalho é pesquisar e avaliar os resultados do emprego de técnicas de transferência de calor: radiação (termografia) e condução (termopares), como ferramentas de diagnóstico da presença de estruturas ocultas e de anomalias na edificação do Patrimônio Histórico Cultural Brasileiro. A utilização do método não destrutivo e principalmente da técnica termográfica é bastante difundida em países europeus. Porém, a diferença e a especificidade do Brasil, devido a sua posição tropical (regime climático diferenciado), aos materiais empregados nas edificações do século passado e à técnica de produção, justificam e impõem a necessidade da assimilação dessa tecnologia para a garantia e salvaguarda do valioso Patrimônio Histórico e Cultural do nosso País. O trabalho proposto avaliou uma edificação histórica: Capela de São Sebastião de Águas Claras, construída no século XVII, em adobe e implantada no distrito de São Sebastião de Águas Claras, do município de Nova Lima no Estado de Minas Gerais. Foram empregadas duas técnicas de avaliação e identificação, embora o parâmetro da pesquisa tenha sido comum: a temperatura. As técnicas distinguem-se no mecanismo de observação: transferência de calor. Os resultados possibilitaram identificar as estruturas de madeira e as estruturas de vedação ocultas na capela e, ainda, a presença de algumas anomalias nas alvenarias. Os mesmos são plenamente validados pela documentação histórica das intervenções promovidas na capela ao longo dos anos. O método de avaliação das edificações, utilizando os recursos da termografia digital sem contato, possibilitará a tomada de decisão para intervenções civis necessárias para conservação e preservação. A singularidade e a relevância dos estudos do presente trabalho são inquestionáveis e prementes devido a grande importância do valor histórico do Patrimônio Histórico Cultural Brasileiro. Nesse sentido, este trabalho oferece uma perspectiva e uma visão crítica, para a implementação e avanço na linha de pesquisa.

Palavras Chaves: termografia, conservação do patrimônio, tecnologia da construção.

## 1. INTRODUÇÃO

A qualidade e a durabilidade são e sempre serão referências nas sociedades de todos os tempos. A edificação, vista como uma rede de relações dos diversos agentes, que podem atuar isoladamente ou em conjunto, originando lesões, desgastes pontuais ou mesmo sistêmicos na estrutura física e, conseqüentemente, na qualidade do ambiente construído, é referência cultural de uma sociedade e pedra angular das modificações empreendidas pelo gênio humano no ambiente.

A identificação do seu estado físico, ou seja, da sua integridade, passa necessariamente por um diagnóstico da edificação. Atividade não somente técnica, mas também de observação minuciosa e profunda. Os resultados desse diagnóstico indicam o prognóstico e a terapêutica a ser introduzida.

Um dos principais obstáculos à técnica atual refere-se ao estágio avançado e muitas vezes irreversível das patologias quando da identificação do problema. A necessidade de uma manifestação exterior deixa ao desalento o intuito de preservação e conservação, mormente quando se trata de edificações cuja forma original encerra seu verdadeiro valor, quais sejam aquelas integrantes do patrimônio histórico. As implicações econômicas, sociais, técnicas e econômicas dessa identificação tardia acabam por obstar os anseios coletivos de perpetuação do patrimônio histórico para as vindouras gerações, bem como frustram as expectativas de produção de um ambiente construído saudável.

A identificação da patologia somente após a sua manifestação visual restringe as alternativas de correção e de minimização do problema, pois algumas patologias estão presentes, de forma latente, já na etapa de projeto e também durante o próprio processo construtivo. Logo, a necessidade de um método de pesquisa mais ágil e eficaz torna-se imprescindível, a fim de garantir o sucesso ou a minimização do insucesso.

Ao estudo das patologias segue-se a pesquisa dos métodos passivos de diagnóstico a fim de compatibilizar os meios disponíveis ao problema em questão. Buscou-se elaborar um modelo de ensaio para diagnóstico das edificações por processos não destrutivos, que permita identificar o estado da superfície, suas características físicas, seu estágio de

comprometimento face às solicitações presentes e atuantes sobre elas.

O monitoramento foi executado utilizando a técnica de termografia infravermelha passiva, sem adição de energia externa, pois essa técnica tem-se revelado eficiente e versátil, dentre as técnicas não destrutivas, para avaliação do estado físico das edificações.

A proposta do presente trabalho é assimilar e incorporar a termografia infravermelha digital como método não destrutivo e sem contato, para a identificação de patologias e estruturas ocultas, aportando uma real possibilidade de avanço tecnológico para o setor. Configura-se, pois, uma tarefa árdua de adequação de ferramentas e tratamento de informações. Não se pretende oferecer aqui a panacéia da construção civil, ou suscitar oráculos, mas, apenas incorporar ao atual estado da arte uma nova e promissora técnica.

As inúmeras linhas de conhecimento presentes (Engenharias Mecânica e Civil, Arquitetura, Belas Artes e História) no desenvolvimento da pesquisa caracterizam a multidisciplinariedade do trabalho, impondo uma abordagem ampla, capaz de apresentar os conteúdos e as suas interfaces: técnicas (materiais, técnicas construtivas, conservação e preservação de patrimônio histórico), históricas (estilo de época, memória individual e coletiva), econômicas (turismo, emprego e valor econômico), sociais e culturais da comunidade, da região e do País.

No decorrer do trabalho são detalhados, em uma linguagem objetiva e de caráter multidisciplinar, todos os conceitos e passos desenvolvidos na concepção e elaboração do modelo matemático, na execução dos ensaios térmicos e na validação dos resultados.

### **1.1 Justificativa**

Este trabalho baseia-se no uso da técnica de termografia infravermelha, uma técnica não destrutiva de análise de edificações que permite a avaliação das condições de conservação e a detecção de problemas causados pela deterioração de materiais e da estrutura, sem que haja necessidade de intervenções físicas, que podem vir a comprometer as edificações em estudo, em especial, edificações de caráter histórico.

Para Gomes et al.(2004), os projetos de intervenção arquitetônica e urbanística em espaços com valor histórico e cultural têm permitido a inserção da comunidade, o resgate de cidadania e a identidade local.

Para Figueiredo (2005), a preocupação com o patrimônio histórico<sup>1</sup> surge pela necessidade de afirmação do Estado-Nação, como categoria histórica coerente, como algo que sempre existiu. Ainda em Figueiredo tem-se:

Para Gonçalves (1996), as práticas de colecionamento, restauração e preservação de patrimônios culturais são norteadas por uma concepção de história como um processo inexorável de destruição, em que valores, instituições e objetos associados a uma "cultura", "tradição", "identidade" ou "memória" nacional tendem a se perder. (FIGUEIREDO, 2005, p. 45-46).

Também em Gomes *et al.* (2004) tem-se: a importância do patrimônio cultural de uma cidade é o maior depositário da memória e identidade de seus habitantes.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Pesquisar e avaliar os resultados do emprego de técnicas de transferência de calor: radiação (termografia digital) e condução (termopares) como ferramentas de diagnóstico da presença de estruturas ocultas e de anomalias na edificação do Patrimônio Histórico Cultural Brasileiro, em especial a edificação da Capela de São Sebastião de Águas

---

<sup>1</sup> Patrimônio Histórico – definição: A palavra patrimônio deriva do vocábulo latino *pater*, pai, não no sentido de genitor, mas de uma figura jurídica definida pelo antigo direito romano, como o senhor, o chefe que detinha propriedade privada sobre a terra e sobre tudo que nela habitava. Patrimônio, então, é o que pertence ao pai, à pátria, termo que já era utilizado antes da criação histórica do Estado-Nação (FIGUEIREDO, 2005).

Claras situada no município de Nova Lima, Estado de Minas Gerais.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- A caracterização da presença oculta de elementos estruturais no interior da estrutura de vedação da capela de São Sebastião de Águas Claras e da presença ou não das anomalias (nas estruturas de madeira, alvenarias de vedações e revestimentos de pintura);
- O desenvolvimento da técnica de termografia digital para estruturas e alvenaria de adobe;
- A avaliação da técnica de termografia digital para estruturas e alvenarias de adobe da Capela de São Sebastião de Águas Claras com:
  - \* A utilização de documentação histórica das intervenções físicas na edificação;
- A modelagem matemática do fenômeno físico de equilíbrio térmico.

### 1.3 Premissas

O presente trabalho fundamenta-se em um conjunto de premissas, a saber:

- Todo o corpo com temperatura acima do zero absoluto ( $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ou  $0\text{ K}$  ) emite radiação.
- Os mecanismos de transferência de calor de um corpo são funções das propriedades físicas e químicas de seus componentes, da sua estrutura de formação (disposição e organização dos seus elementos), de suas dimensões, do meio ambiente no qual o corpo está inserido e das interações entre o corpo e o meio;

- Os gradientes térmicos superficiais de um corpo retratam o estado de desequilíbrio térmico instantâneo deste corpo e, indicam as trocas térmicas no corpo e com o meio no qual está inserido. Estas trocas térmicas são função dos mecanismos de transferência de calor dominantes do fenômeno.

#### **1.4 Hipóteses**

- As diferenças físicas e anomalias no interior do corpo apresentam comportamentos diferenciados na transferência de calor;
- A técnica de termografia infravermelha digital é capaz de registrar os gradientes térmicos superficiais de um corpo;
- Os registros dos gradientes térmicos superficiais, obtidos pela técnica de termografia infravermelha digital, serão um indicativo da estrutura, da composição e da presença de alterações, ou mesmo, de anomalias presentes no corpo;
- O corpo em estudo está no regime transiente de transmissão de calor;
- Não há ocorrência de geração de energia interna no corpo em estudo;
- Não há variação de massa no corpo em estudo - Sistema Fechado.

#### **1.5 Abrangência**

A abrangência da pesquisa passa pela possibilidade de extensão dos trabalhos para o Patrimônio Histórico, uma vez que o método não-destrutivo constitui-se no fio condutor do setor de conservação e preservação histórica.

### **1.6 A inovação e o “inédito”**

- A inovação:

Não há registros técnicos históricos da utilização da técnica termográfica em edificações do Patrimônio Histórico Brasileiro;

Adoção da técnica de termografia como instrumento de prevenção e qualidade na construção e no Patrimônio Histórico Nacional;

A geração de um modelo teórico matemático para avaliação das edificações do Patrimônio Histórico Brasileiro.

- O inédito será a validação:

Por meio da comparação dos resultados da técnica de termografia infravermelha passiva com a documentação histórica das intervenções;

Da aplicação do modelo matemático aos resultados da termografia digital e aos resultados dos termopares afixados na alvenaria.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta a revisão do estado da arte e dos marcos teóricos necessários ao desenvolvimento do trabalho de tese. São discutidas: patologias em edificações do Patrimônio Histórico, técnicas de identificação, transferência de calor e sistemas de termografia infravermelha.

### 2.1 Patologia no Patrimônio Histórico

A compreensão contemporânea do patrimônio deixou de se ater apenas às qualidades estéticas do bem em si, ampliando-se ao cotidiano da vida, no exercício da cultura e no desenvolvimento sócio-econômico das comunidades, constituindo-se em um dos importantes responsáveis por sua identidade e qualidade de vida.

As edificações do patrimônio histórico apresentam singularidades em comparação com as edificações de hoje:

- Muitos dos materiais e das técnicas utilizados na época encontram-se, hoje, em desuso;
- A ação do tempo<sup>2</sup> sobre os materiais em muitas das edificações é significativa, devido ao elevado número de anos de existência;
- A ausência de documentação impõe, na maioria das vezes, pesquisa detalhada de dados básicos sobre a edificação.

As patologias presentes nas edificações históricas apresentam, em sua maioria, uma

---

<sup>2</sup>Segundo Weaver *et al* (1987), a análise do comportamento físico e químico de um elemento construtivo, recém elaborado, apresenta inúmeras diferenças do mesmo elemento com uma certa idade. Dentre as diferenças estão: quantidade de H<sub>2</sub>O no interior do elemento, ação de forças externas sobre o elemento, a reação química de composição e de ligação, ação do meio, e etc...

similaridade nas conseqüências. Porém, suas causas são algumas vezes oriundas de uma série de fatores específicos, devido às singularidades apresentadas anteriormente.

Os sítios históricos, de maneira geral, são repletos de fachadas, ruínas e construções em mau estado de conservação. Essa condição deve-se, basicamente, à ausência de formação profissionalizante de mão de obra e também de profissionais de nível superior no manejo das técnicas em terra crua, relevantes no acervo histórico arquitetônico de nosso país. (Rezende *et al.*,2006). As manifestações de anomalias e patologias em uma edificação podem ocorrer com o aparecimento de manchas na superfície, por presença de fungos ou mofo, por trincas e fissuras, ou ainda por destacamento do revestimento, conforme mostram as fotos da FIGURA 2.1. Contudo, a causa que originou o processo patológico é um conjunto de solicitações atuando simultaneamente ou isoladamente na edificação.

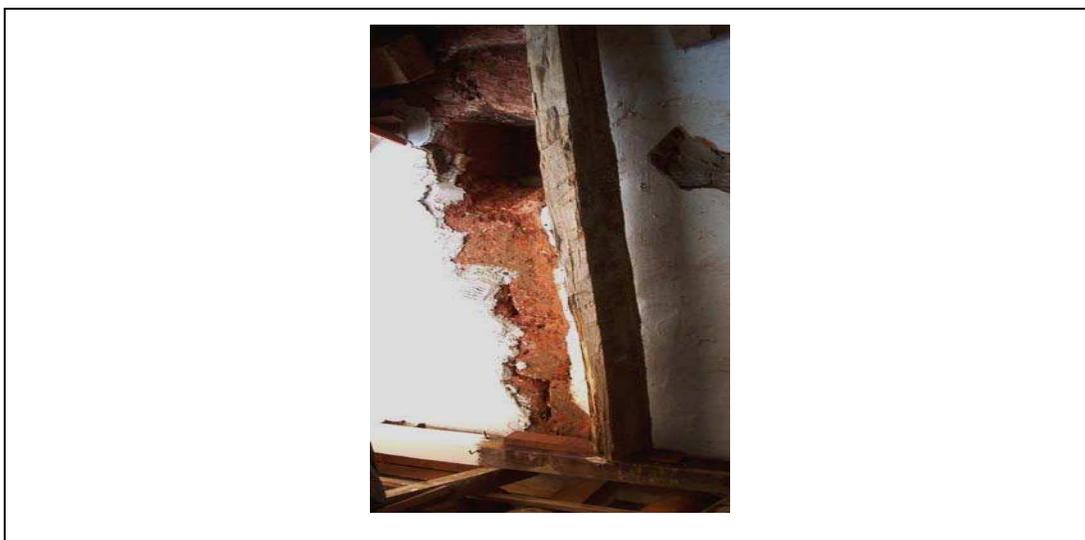


FIGURA 2.1 – Foto de patologia em obras de terra (adobe). Desprendimento da estrutura de vedação e revestimento - Capela do Bom Jesus da Pobreza – Tiradentes, Minas Gerais.

FONTE: REZENDE, 2006

Como mencionado, as edificações que compõem um patrimônio histórico apresentam uma importância singular pelos aspectos históricos, sociais, ambientais e econômicos.

A Carta de Burra define as intervenções nas edificações históricas:

.. . Conservação significa o conjunto de todos os processos de cuidado de um 'sítio procurando manter seu significado cultural.

Manutenção significa o contínuo cuidado de proteção da edificação e do entorno de um sítio e deve distinguir-se de reparação.

A reparação envolve restauração ou reconstrução.

Preservação significa a manutenção da edificação no 'sítio' em seu estado existente e retardando sua deterioração.

Restauração significa devolver à edificação existente do 'sítio' o estado anterior conhecido, removendo agregados ou reagrupando os componentes existentes sem introduzir novos materiais.

Reconstrução significa devolver a um 'sítio' um estado anterior conhecido e se diferencia da restauração pela introdução de novos materiais na edificação.

Adaptação significa modificar um sítio para adaptá-lo ao uso atual ou a um uso proposto.”  
(CARTA DE BURRA, 1980, p. 2-3)

A afirmação de Dorrego, alinha-se com a recomendação da Carta de Burra: “O diagnóstico do estado de conservação é o primeiro passo para uma intervenção em edificações históricas. Para não causar danos adicionais é aconselhável o uso de técnicas de avaliação com métodos não-destrutivos, como termografia infravermelha. (DORREGO, J. *et al.*, 2003, p. 1). Assim, as ações em favor da defesa do patrimônio histórico e artístico devem ter seu foco fundamental direcionado às ações de preservação e conservação.

## **2.2 Técnica de identificação de estruturas ocultas e das patologias**

A técnica de identificação de patologias por meio de suas manifestações visíveis implica em subestimar uma variável importante em todo o processo: o TEMPO. Portanto, a inserção mais rigorosa desta variável no processo de avaliação vem ao encontro de uma necessidade básica: minimizar ou mesmo impedir o surgimento de patologias nos sistemas construtivos. A identificação de patologias nas edificações tem como pré-requisito um correto diagnóstico das manifestações. O diagnóstico não é uma atividade somente técnica, mas também uma atividade de observação. Os erros no diagnóstico podem resultar em intervenções (terapêutica) que, simplesmente, causam grandes

desastres, visto que muitas patologias são superficialmente similares, ou seja, tem manifestações iniciais iguais, mas, depois de algum tempo, apresentam diferenciações importantes, FIGURA.2.2

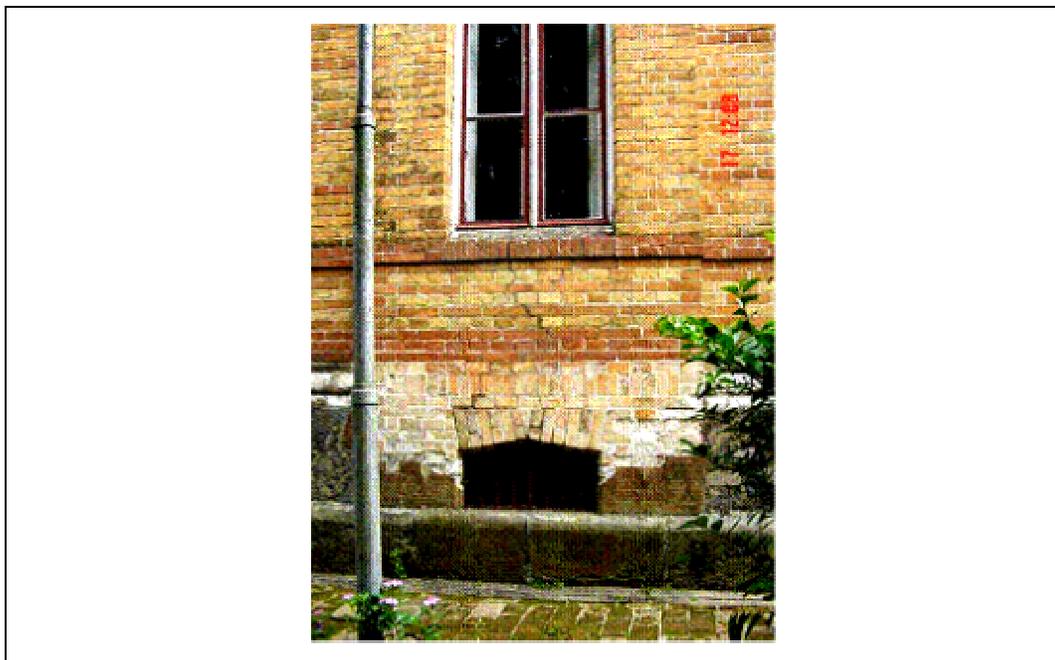


FIGURA 2.2 – Presença de Patologia, 2005. Fotos do Museu Mariano Procópio – Juiz de Fora, MG.

FONTE: Foto do arquivo particular do AUTOR, 2006.

Gomes (1995) apresenta propostas para a identificação de patologias nos materiais a partir de ensaios, a fim de detectar fissuras em superfícies de argamassas: técnica destrutiva e não destrutiva. Diana (1995), destaca uma lista de ensaios que possibilitam a caracterização dos materiais e suas propriedades físicas e químicas. Dentre outros, têm-se a termografia.

### **2.3 Técnica destrutiva de identificação de estruturas ocultas e das patologias**

A técnica destrutiva de identificação de anomalias, patologias ou estruturas ocultas por processo de intervenção física pode, em geral, descaracterizar, danificar, alterar ou destruir características, detalhes ou mesmo a integralidade do bem imóvel.

No estudo de caso do presente trabalho foi possível documentar uma intervenção executada em anos anteriores. Os trabalhos de intervenção na edificação (FIGURA 2.3) foram significativos, pois substituíram elementos estruturais, de vedação, de cobertura e de revestimento que se encontravam em estágio de decomposição avançado.



FIGURA 2.3 - Foto da intervenção na fachada de adobe e estrutura autônoma

FONTE: MENEZES, 1986.

As intervenções realizadas na capela de São Sebastião não prejudicaram o valor histórico da edificação, mas recuperaram e preservaram o patrimônio histórico garantindo a restauração da obra. A documentação fotográfica é um registro importante de todo o processo utilizado na restauração e recuperação da edificação.

#### **2.4 Técnica não destrutiva de identificação de estruturas ocultas e das patologias**

Toda e qualquer intervenção para conservação ou re-uso no Patrimônio Histórico deve

começar pela análise do estado de conservação da edificação. O ideal é que sejam usadas técnicas não destrutivas, de forma a não causar ou agravar danos à edificação. O uso deste tipo de técnica não-destrutiva que abrange, entre outros, o uso de termografia é relativamente novo e pouco usado, seja pelo alto custo dos equipamentos de análise ou por sua dificuldade de aplicação prática. Este trabalho de tese centra-se no estudo das possibilidades de análise NDT (Nondestructive Testing). Dentre as técnicas de análise NDT, a termografia Infravermelha (IR- Infrared): tem sido utilizada para aplicações em diversos campos de atuação. Na construção civil, esta técnica tem sido empregada para a detecção de vazamentos, inspeção térmica de entorno de novas obras e testes térmicos para conservação de patrimônio histórico. Em síntese, as técnicas de termografia permitem a visualização da edificação, Igreja de San Omobono - Cremona, Itália, possibilitando a identificação da presença de elementos e anomalias ocultos, conforme pode ser visto na FIGURA 2.4 e FIGURA 2.5.

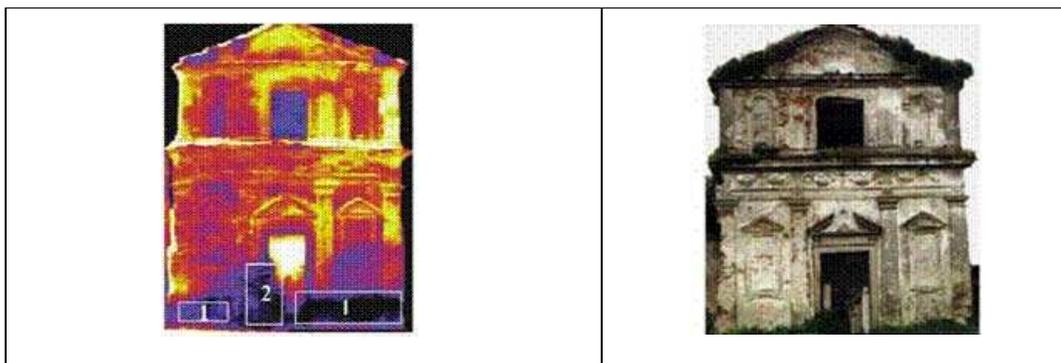


FIGURA 2.4 – Termograma da termografia da fachada. FIGURA 2.5 – Foto da fachada da Igreja .

FONTE: MALDAGUE, 2001, p.642.

Na revisão bibliográfica, constatou-se que foram escolhidos prédios históricos *européus* de diferentes materiais e tipologias e em condições ambientais diversas (marítima e continental), para avaliar a eficiência desta técnica na análise do comportamento físico das edificações. Não há nenhum trabalho científico publicado, acadêmico ou técnico de termografia digital analisando o Patrimônio Histórico Brasileiro.

A utilização do método e principalmente da técnica é bastante difundida em países europeus, com evidência para a Itália, devido ao grande acervo histórico do país. Porém,

a diferença e a especificidade do Brasil<sup>3</sup>, quer pela sua posição tropical (regime climático diferenciado), quer pelos materiais empregados nas edificações de séculos anteriores e também na técnica de produção, justificam e impõem a necessidade da assimilação dessa tecnologia para a garantia e salvaguarda do valioso Patrimônio Histórico e Cultural do nosso país.

A singularidade e a relevância dos estudos do presente trabalho são inquestionáveis e prementes devido à grande importância dos valores históricos, culturais, sociais, humanos e econômicos do Patrimônio Histórico Cultural Brasileiro. Portanto, a geração e o incremento em pesquisas para o desenvolvimento de novas técnicas de preservação e conservação, utilizando métodos não destrutivos, serão um dos instrumentos mais importantes para garantir o melhor diagnóstico<sup>4</sup> da edificação e, por conseqüência, a melhor preservação, conservação e restauração do patrimônio físico das edificações históricas brasileiras.

## 2.5 Transferência de Calor

De acordo com Incropera (2003), sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios diferentes, ocorre, necessariamente transferência de calor. Os mecanismos de transferência de calor são: radiação, condução e convecção.

Para a identificação de estruturas e anomalias de uma edificação pode-se utilizar o mecanismo de radiação empregando a termografia digital (medição de temperatura sem contato) ou de condução, por meio de termopares (medição de temperatura com contato). A mensuração do mecanismo de condução ocorre pela determinação dos

---

<sup>3</sup> O Brasil, em geral, e Minas Gerais, em particular, têm um dos mais significativos patrimônios edificados em arquitetura de terra do Mundo. REZENDE, 2006.

<sup>4</sup> O foco do problema do diagnóstico na construção com o uso de termografia infravermelha está em olharmos algumas divergências entre a temperatura normal da construção e a temperatura obtida com a termografia, podendo demonstrar um potencial defeito (GRINZATTO *et al.*, 1998, p. 2).

gradientes de temperatura do corpo. Existem inúmeros métodos e técnicas de determinação da distribuição de temperatura, com e sem contato com a superfície:

- Medição sem contato
  - \* Equipamento de imageamento térmico infravermelho.
- Medição com contato na superfície do corpo ou sistema:
  - \* Termômetros de vários tipos;

Neste trabalho foram adotados a termografia digital, para a medição sem contato e termômetros do tipo termopares para a medição com contato. A termografia baseia-se na teoria da radiação, enquanto a medição com termopar baseia-se na teoria da condução.

#### 2.5.1 Medição de temperatura sem contato

Para a medição de temperatura sem contato, foi utilizada, neste trabalho, a técnica de termografia digital, por determinação da radiação infravermelha.

Tavares (2004), faz um amplo levantamento dos conceitos de termografia, de acordo com diversos autores da literatura técnico-científica, apresentado a seguir:

Willians *et al.* (1980) – de acordo com o autor, a termografia pode ser descrita como sendo um ensaio térmico não destrutivo, utilizado na obtenção do perfil de temperatura superficial em estruturas e, subseqüentemente a correlação da informação obtida com algumas imperfeições internas;

Krapez *et al.* (1994) – definiram o ensaio térmico não destrutivo como uma técnica de diagnose, que avalia o comportamento temporal do campo de temperatura superficial de uma estrutura excitada termicamente;

Giorleo *et al.* (2002) – de acordo com o autor, a termografia é uma técnica não destrutiva, bidimensional, utilizada na medição do campo de temperatura da superfície de todos os tipos de materiais;

Sakagami *et al.*, (2002) – afirmam que a termografia é uma das mais poderosas técnicas de

medição de temperatura sem contato. (TAVARES, 2004, p.13-14).

Observa-se um consenso conceitual da termografia. Assim, a termografia pode ser apresentada como sendo: a técnica de um método não destrutivo sem contato de identificação visual do gradiente de temperatura superficial de um corpo em condições ambientais (FIGURA 2.6).

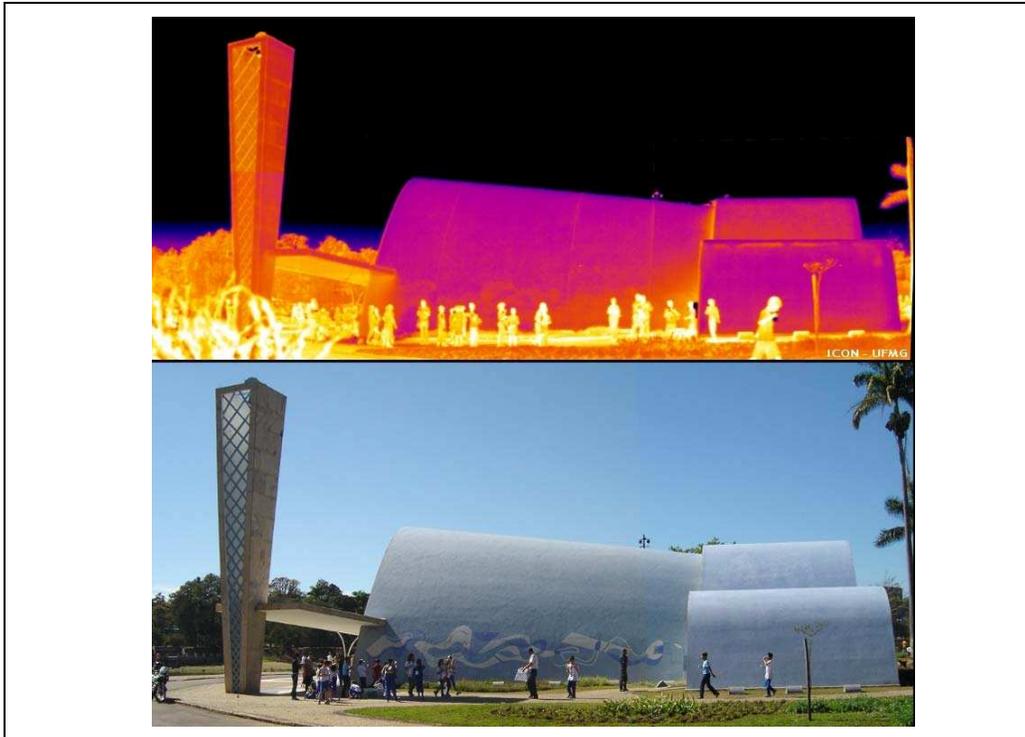


FIGURA 2.6 – Termograma e foto e de Igreja São Francisco de Assis, 2006, Belo Horizonte, Brasil.

FONTE: Fotos e termogramas do arquivo particular do AUTOR, 2007.

### 2.5.2 Medição de temperatura com contato

A técnica empregada para a medição de temperatura com contato necessita do contato físico direto entre o corpo e o instrumento de medição (termômetro), para a captação da transferência de calor pelo mecanismo de condução até a estabilização da medida, indicando equilíbrio térmico entre o corpo e o termômetro.

Existem diversos tipos de termômetros, dentre eles os termopares que são os utilizados no presente trabalho.

Em dois metais diferentes com temperaturas distintas, quando aplicarmos um diferencial de temperatura (resfriamento ou aquecimento) em suas extremidades, gerar-se-á o aparecimento de uma força eletromotriz. Devido às propriedades dos materiais, os termopares podem ser classificados conforme sua composição e características de medição. Essa classificação recebeu nomenclatura específica em várias Normas Internacionais<sup>5</sup>.

No, QUADRO 2.1 é apresentado as características do termopar tipo T, empregado no presente trabalho.

QUADRO 2.1  
Características do Termopar T

TIPO	COMPOSIÇÃO	CARACTERÍSTICA	FAIXA DE TEMPERATURA
T	Composição: Cobre (+) / CobreNíquel(-)	Estes termopares são resistentes à corrosão em atmosferas úmidas.	Faixa de utilização: ar ou em ambientes oxidantes.

FONTE: DO AUTOR, 2007

## 2.6 Termografia

A termografia é a percepção da temperatura superficial de um corpo, uma vez que todo corpo com temperatura acima do Zero Absoluto emite radiação térmica. A história da termografia se passa há aproximadamente 200 anos. Em 1800, Willians Herschel e depois seu filho John Herschel (1840) realizaram as primeiras imagens utilizando o

<sup>5</sup> As nomenclaturas adotadas neste trabalho estão de acordo com as normas IEC 584 -2 de julho de 1982.

sistema infravermelho por meio da técnica evaporográfica, ou seja, a evaporação do álcool obtido de uma superfície pintada com carbono (HOLST, 2000). Em 1843, Henry Becquerel descobriu que certas substâncias emitiam luminescência quando expostas à radiação infravermelha, além de que poderiam ser produzidas emulsões fotográficas sensíveis à radiação próxima do infravermelho (VERATTI, 1992). Samuel Langley, 1880, produziu o primeiro bolômetro, que é um aparelho capaz de medir diferenças de temperatura extremamente pequenas, por meio da variação da resistência elétrica de um metal com a variação de sua temperatura. Já Case, em 1917, desenvolveu o primeiro detector baseado na interação direta entre fótons da radiação infravermelha e elétrons do material (sulfeto de tálio) (VERATTI, 1992). O primeiro termograma foi elaborado por Czerny, em 1929. Na metade dos anos de 1940, no período da Segunda Guerra Mundial, foi empregado o Sistema de Visão Noturna em tanques alemães para a invasão da Rússia (VERATTI, 1992). A resposta dos aliados foi a elaboração e o desenvolvimento da FLIR – *Forward Looking Infra Red* (visão dianteira por infravermelho), utilizada pelo exército americano para localização dos inimigos. O emprego do sistema não se limitou à localização de tropas, abrangendo também o desenvolvimento de armamento (mísseis) com detectores de calor (VERATTI, 1992). Em 1946, surge o escâner de infravermelho de uso militar, com a característica da produção de termograma em horas. Seguindo os avanços, em 1954, era possível o próprio sistema gerar uma imagem em duas dimensões em 45 minutos. Nos anos 1960 e 1970, houve um salto significativo com o desenvolvimento de imageadores infravermelhos e o lançamento de sistemas integrados de formação de imagens termais instantâneas, a imagem já era gerada em 5 minutos, com a determinação de temperatura (VERATTI, 1992). Em 1975, foi desenvolvido um sistema que permitia a visão termográfica e a visão ótica de uma pessoa simultaneamente. Este sistema foi denominado ENOUX e se baseava em sistema elétrico óptico. Entre 1980 e 1990 a imagem em tempo real é consagrada. A redução no tempo de produção da imagem acompanha o avanço nos equipamentos de captura e tratamento da imagem. Associado a substituição dos sistemas de resfriamento de nitrogênio líquido pelos sistemas de resfriamento termoelétricos, somado ainda o uso da computação – programas e equipamentos – foram lançados termovisores mais compactos e versáteis. Já nos meados da década de 1990, ocorre novo salto tecnológico com o uso do *Charge Coupled Device* (CCD).

Nessa linha histórica, os autores apresentam o QUADRO 2.2, a seguir:

QUADRO. 2.2  
Linha histórica da evolução da termografia

Época	Evento
1950	Os primeiros radiômetros.
1960	Os primeiros sistemas de infravermelho imageadores (termovisores).
1970	Os visores térmicos, sem a determinação de temperatura, somente a detecção qualitativa.
1980	Aprimoramento na óptica e a utilização de circuito integrado, permitindo redução de peso e volume dos equipamentos. Em especial no ano de 1985, os detectores resfriados termoeletricamente, substituindo os equipamentos que utilizavam o nitrogênio líquido.
1990	Introdução dos CCD e logo após os FPAs, permitindo a realização de centenas de imagens por segundo com alta resolução e grande sensibilidade.

FONTE: DO AUTOR, 2007.

A partir dessa consolidação e síntese histórica, percebe-se a evolução dos sistemas de imageamento infravermelho, com uma ligação umbilical a partir da década de 90 com os avanços da eletrônica e da computação.

O imageamento termográfico atende às propriedades físicas da termodinâmica, ou seja, é a documentação da transferência de calor pelo processo ou mecanismo da radiação.

### 2.6.1 Características e princípios do imageamento termográfico

A termografia basicamente é a percepção da temperatura superficial de um corpo pelo mecanismo de transferência de calor (radiação), uma vez que todo corpo com temperatura acima do Zero Absoluto emite radiação térmica. Segundo Holst (2000), deverá haver um diferencial de temperatura entre o alvo e o meio, pois somente neste caso será possível ocorrer uma diferenciação entre o alvo e o meio.

### 2.6.1.1 Propagação do calor no interior de um corpo

A propagação do calor no interior do corpo é apresentada por Holst (2000) no diagrama a seguir (FIGURA 2.7):

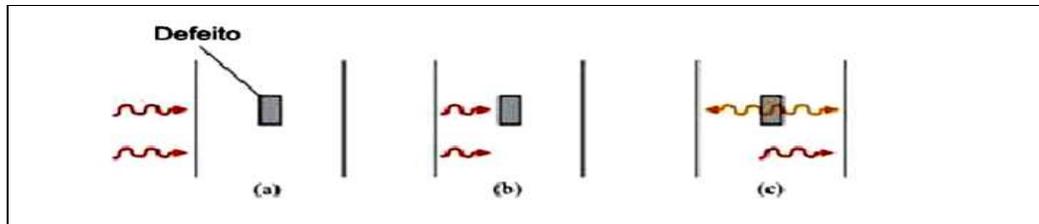


FIGURA 2.7 – Propagação idealizada de um único pulso de calor em um material: (a) Um impulso de energia é aplicado à superfície; (b) O pulso de calor viaja dentro do material e encontra um defeito; (c) O defeito reflete parcialmente e transmite parcialmente o pulso;

FONTE: HOLST, 2000, p. 292.

### 2.6.1.2 Técnicas de termografia digital

Maldague (2001) apresenta duas técnicas para o método não destrutivo de imageamento termal, a primeira: *Técnicas Passivas* aquelas nas quais os materiais já contêm armazenamento interno de energia térmica ou são estimulados por uma fonte natural de calor (energia solar), a segunda: *Técnicas Ativas*: aquelas que envolvem o aquecimento ou resfriamento dos materiais para causar o fluxo de calor e o gradiente térmico necessário.

#### 2.6.1.2.1 Técnicas de termografia digital - Termografia passiva

A técnica de termografia passiva é caracterizada pela falta de um estímulo de energia “artificial”. Somente ocorre o estímulo, excitação, por meio de carga solar ambiental atuante sobre o corpo.

Na termografia passiva, condições de contorno naturais são utilizadas na análise, uma vez que

nenhuma estimulação térmica é utilizada. Neste caso, deve existir uma diferença natural de temperatura entre o objeto sob estudo e o meio onde ele está inserido. (MALDAGUE, 2001, p. 34) (FIGURA 2.8).

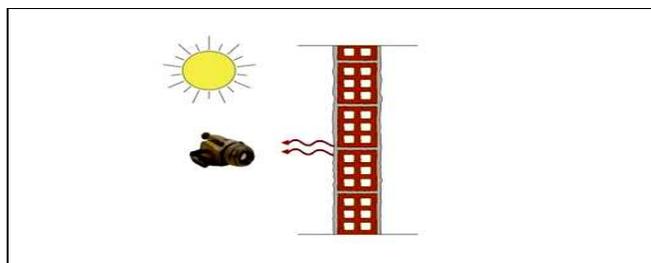


FIGURA 2.8 – Técnica de termografia passiva

FONTE: DO AUTOR, 2007

#### 2.6.1.2.2 Técnicas de termografia digital - Termografia ativa

Na termografia ativa a principal característica é a aplicação de um estímulo de energia sobre o corpo. O calor ou a injeção de energia podem variar segundo, QUADRO 2.3 e QUADRO 2.4.

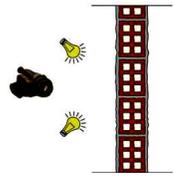
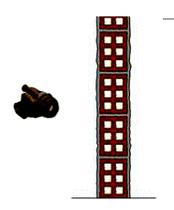
QUADRO 2.3

Variação da energia em termografia ativa

Propriedades	Característica
Intensidade	Alta
	Baixa
Posição	Sobre a face da superfície pesquisada
	Sobre a face oposta da superfície pesquisada
Fonte geradora	Lâmpadas incandescentes
Frequência	Pulso
	Constante
	Modulado
Tempo	Instantâneo
	Moderado espaço de tempo
Tipo	Injeção de calor
	Injeção de jatos de ar frio

FONTE: DO AUTOR, 2007

QUADRO 2.4  
Possibilidades de técnica ativa

Posição relativa – câmera e fonte	Posicionamento da fonte
Mesmo sentido da câmera e fonte	
Sentido oposto da câmera e fonte	

FONTE: DO AUTOR, 2007

No diagrama apresentado por Holst (2000), observam-se os tipos de aplicação de energia em um determinado corpo, em função do tempo de exposição (FIGURA 2.9)

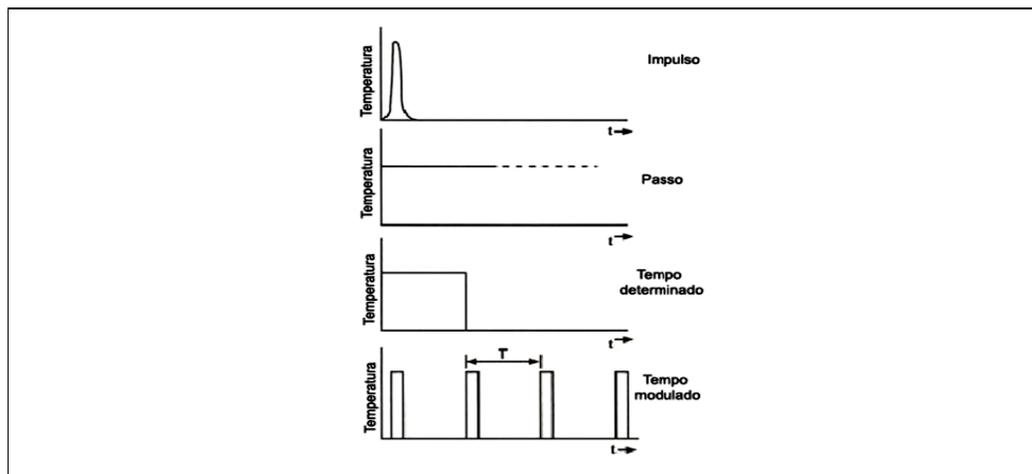


FIGURA 2.9 – Diversas fontes de energia. Um pulso senoidal é difícil de gerar. Ele é aproximado por uma série periódica de pulsos (pulse train). O período do pulso modulado é  $T$ . No gráfico *Impulso* o tempo de exposição é instantâneo. O gráfico *Passo* o tempo de exposição é indeterminado (pode ser infinito), enquanto no gráfico *Tempo determinado* o tempo de exposição é específico ( $t$ ). Por fim o gráfico *Tempo modulado* tem-se a exposição de energia de um corpo em determinado tempo repetido sucessivamente gerando uma frequência.

FONTE: HOLST, 2000, p. 295.

O pulso de energia aplicado sobre uma superfície pode ser através de uma fonte de *calor* ou uma fonte *fria* em ambas, o objetivo será a produção de um diferencial térmico no corpo. O pulso frio é muito utilizado quando o corpo apresenta-se com temperatura igual ou maior que a temperatura do meio externo.

Para Maldague (2001), o pulso de calor é uma das técnicas mais comuns de estimulação termal. Basicamente consiste em um breve tipo de aquecimento e, então, no registro da queda de temperatura. O fenômeno físico foi descrito pelo autor, como sendo:

A temperatura do material muda rapidamente depois do pulso térmico inicial porque a frente termal propaga-se, por difusão, sob a superfície e também por causa das perdas de radiação e convecção. A presença de uma descontinuidade modifica a taxa de difusão, assim quando a temperatura da superfície é absorvida, a descontinuidade apresentará áreas com temperaturas diferentes, com respectivo efeito nas vizinhanças da área. (MALDAGUE, 2001, p. 42.

Maldague (2001) ainda relata que o tempo de observação é uma função do quadrado da profundidade:

$$t = \frac{z^2}{\alpha} \quad (2.1)$$

Onde:  $t \rightarrow$  tempo

$z \rightarrow$  Profundidade

$\alpha \rightarrow$  Difusividade térmica

Assim o contraste, Maldague (2001), é inversamente proporcional ao cubo da profundidade:

$$c = \frac{1}{z^3} \quad (2.2)$$

De acordo com Maldague (2001), a termografia passiva tem mais o caráter qualitativo, pois apresenta indicativos de anormalidades, enquanto o processo de excitação térmica tende a um caráter de resultados quantitativos, pela possibilidade de mensurar e

controlar os eventos (fonte, tempo, intensidade e distância).

### 2.6.2 Sistema de imageamento termal infravermelho

Os equipamentos de imageamento termal infravermelho geram imagens que são os termogramas. Para a análise dos termogramas é necessário ter conhecimentos básicos e fundamentais de temperatura, transferência de calor e do sistema de imageamento termal infravermelho (programa de obtenção e tratamento da imagem térmica) (FIGURA 2.10).

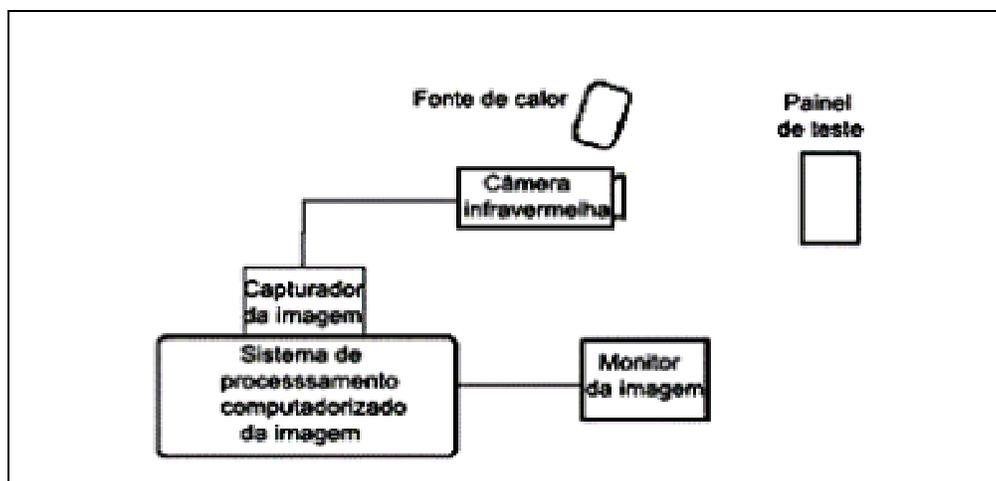


FIGURA 2.10 – Diagrama, adaptado, de um sistema típico de sistema de inspeção infravermelha.

FONTE: MALDAGUE, 2001, p. 34

#### 2.6.2.1 A constituição dos equipamentos

São inúmeros os equipamentos, hoje, disponíveis para execução da termografia digital, portanto faz-se necessário a apresentação das características básicas dos equipamentos:

- Óticas;

- Captação da imagem – mecanismo de varredura;
- Percepção de calor;
- Técnicas de resfriamento dos detectores;
- Imageamento – produção da imagem.

Maldague (2001) apresenta uma ilustração da configuração básica de um equipamento termosensor de radiação infravermelha (FIGURA 2.11).

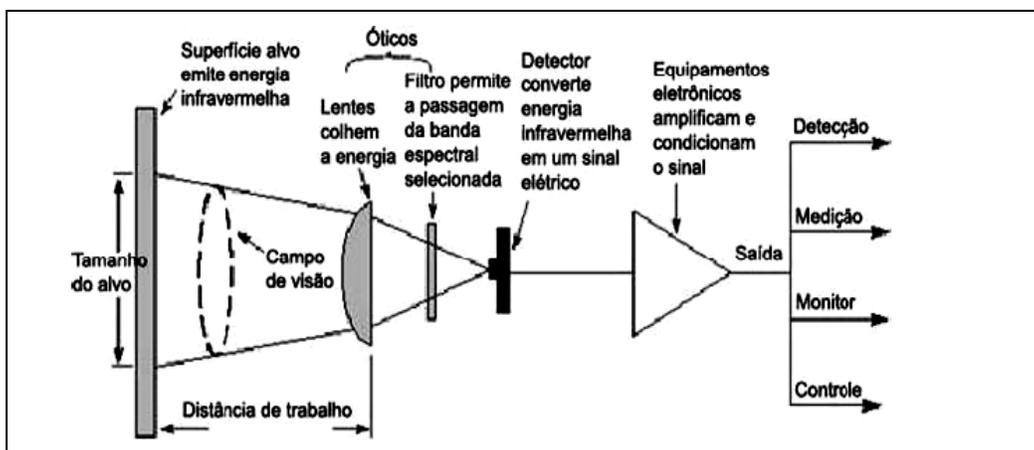


FIGURA 2.11 – Configuração básica do termômetro de radiação infravermelha

FONTE: MALDAGUE, 2001, p. 273

Os equipamentos são sensíveis à energia infravermelha irradiada e transformam essa energia em sinais elétricos proporcionais à temperatura da superfície do corpo. Esse equipamento utiliza: estruturas detectivas de temperatura, sistemas ópticos e tratamento de imagem (digitalização e produção).

#### 2.6.2.1.1 Sistema Óptico

Somente na década de 1960 foram introduzidos no mercado os sistemas infravermelhos

imageadores.

A grande dificuldade era a propriedade física das lentes, pois o vidro apresentava propriedades de transmitância e refletância específicas e que impossibilitavam o seu uso nos equipamentos (FIGURA 2.12).

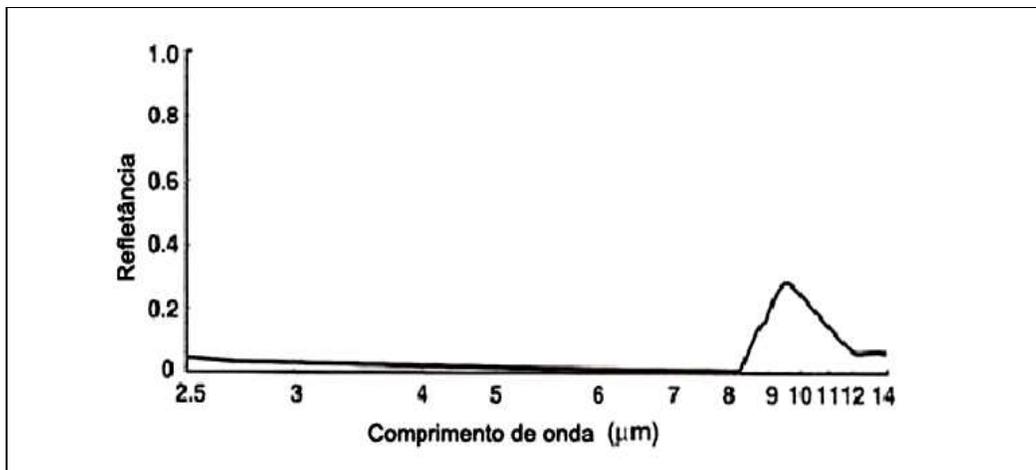


FIGURA 2.12 – Refletância espectral do vidro (cristal).

FONTE: HOLST, 2000, p. 69

Como o cristal ótico (convencional) é *opaco* à radiação infravermelha são utilizados materiais especiais, tais como: silício, germânio, compostos de zinco e cádmio depositado a partir da fase gasosa.

#### 2.6.2.1.2 Sistema de Varredura

Para Veratti (1992) todo imageamento é a forma de apresentação térmica que permite a observação direta da distribuição de calor nas superfícies dos objetos em estudo.

As imagens são captadas em telas de cristal líquido ou em tubo de raios catódicos através de um feixe que varre a tela.

O feixe de varredura deve apresentar uma sincronia entre o sistema de captação do objeto e o deslocamento do feixe.

O processo consiste em uma varredura bidimensional ou linear (FIGURA 2.13).

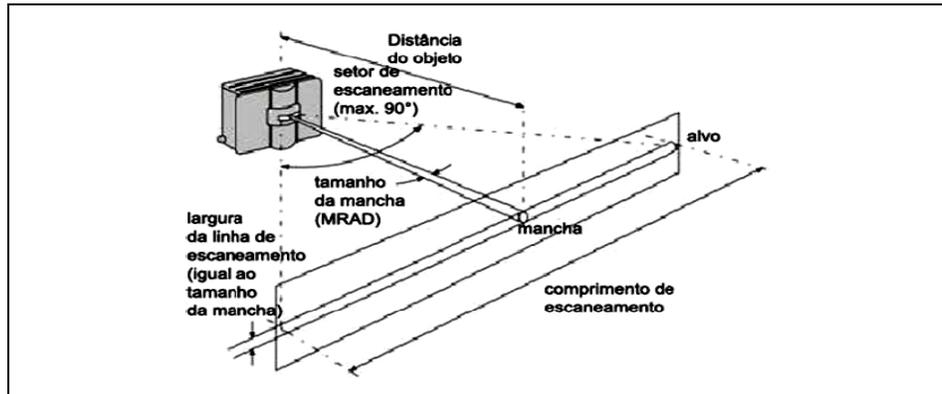


FIGURA 2.13 – Esquema de sensoriamento de um scanner linear Thermoprofile, utilizado para monitoração de fornos rotativos e linhas de produção contínua.

FONTE: VERATTI, 1992, p. II-18

A produção da imagem é obtida pelo deslocamento do feixe, produzindo uma linha completa e seqüencial (sucessão de pontos). Portanto, a função do scanner é mover-se pelo campo de visão, FOV – Field of View. Veratti (1992) afirma que, para uma boa qualidade visual, a imagem deve incluir o maior número possível de linhas e pontos e a frequência de varredura deve ser tal que não produza cintilação. Como exemplos ele apresenta (FIGURA 2.14), o objeto está inserido em um meio circunvizinho, tanto o objeto (z) e o meio são alvos termográficos, para a câmera infravermelha.

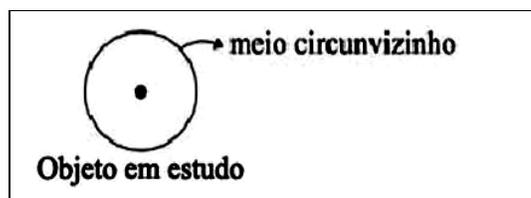


FIGURA 2.14 – Diagrama do alvo (z) em seu meio.

FONTE: DO AUTOR, 2007.

No processo de scanner, a câmera infravermelha, percebe a temperatura do objeto ( $t_z$ ) e a temperatura de todos os pontos próximos (presentes no meio circunvizinho), FIGURA 2.15.

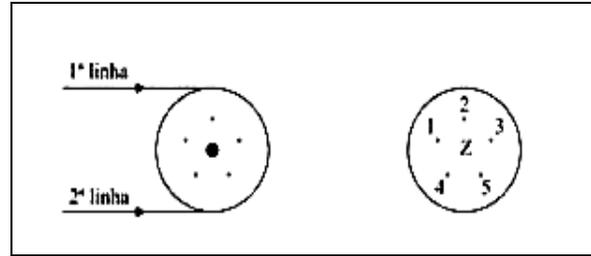


FIGURA 2.15 – Diagrama da área de pesquisa e o meio.

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Como consequência a leitura da temperatura do objeto ( $t_z$ ) será uma média aritmética das temperaturas de todos os pontos, ( $t_{pi}$ ), presentes na área de influência próxima ao mesmo, logo:

$$t_z = \frac{\sum t_{pi}}{i} \quad (2.3)$$

Portanto, quanto menor a área de influência; menor a contribuição de temperatura de outros pontos presentes na área, que não façam parte integrante do objeto. Assim maior será tendência para a convergência da medida da temperatura para um único ponto, o objeto. A FIGURA 2.16 apresenta o diagrama de qualidade na visada do objeto.

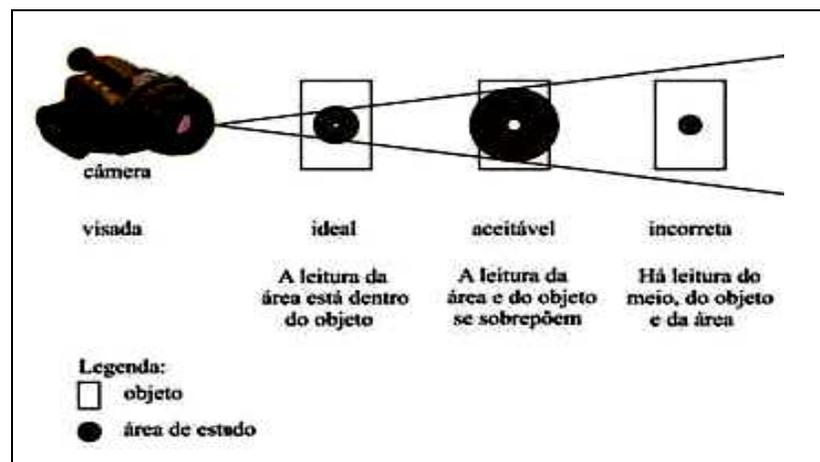


FIGURA 2.16 – Diagrama da visada de um alvo.

FONTE: VERATTI,1992.

Como demonstrou a FIGURA 2-16, um cuidado especial com a distância da câmera ao objeto, durante o processo de leitura, deverá ser primordial, no sentido de diminuir a influência do meio na leitura da temperatura do objeto. De acordo com Veratti (1992), apenas quando o campo de visão instantâneo (Instant Field of View – IFOV) é menor ou igual à área medida (fonte extensa) pode-se realizar uma medição precisa de temperatura. Na prática, é necessário que o IFOV seja no máximo  $\frac{1}{2}$  da área medida para minimizar o efeito da medição por média do detector. No caso de fontes pontuais, a temperatura medida será sempre inferior ao valor real.

#### 2.6.2.1.3 *Percepção de temperatura*

Veratti (1992) define a função dos detectores como sendo a conversão de energia radiante captada pelo sistema em outra forma mensurável de energia, geralmente um sinal elétrico. Maldague define:

Um detector de infravermelho é o coração de todo sistema infravermelho e imageamento digital, qualquer que seja sua configuração. Detectores infravermelhos podem sentir a energia radiante infravermelha e produzir usualmente um sinal elétrico proporcional à temperatura superficial do corpo. (MALDAGUE, 2001, p. 274).

A partir de 1970, uma nova geração de detectores foi lançada: Focal Plane Array Imaging. Especificamente 1973, Shephred e Yang propuseram o primeiro Focal Plane Arrays (FPAs). Maldague apresenta o aparelho como:

O aparelho é geralmente similar ao video charge coupled device (CCD), na armazenagem e nos circuitos 'readout'. A radiação induz a uma carga que é armazenada em um capacitor em níveis isolados. A carga é então transferida para o elemento vizinho por meio do efeito de campo magnético. As cargas armazenadas são novamente transferidas dessa maneira, de elemento para elemento até toda área estar cheia. (MALDAGUE, 2001, p. 190).

O avanço da tecnologia gerou uma nova geração de FPAs com a introdução da “*z plane technology*” aumentando a performance das câmeras infravermelho. Maldague descreve a “*z plane technology*” assim:

Circuitos de silício são fabricados sobre um fino quadro de cerâmica tipicamente com 100  $\mu\text{m}$  (0,004in) de espessura com um detector colocado na extremidade. Estes quadros são então empilhados para formar completamente a área. (MALDAGUE, 2001, p. 192) (FIGURA 2.17).

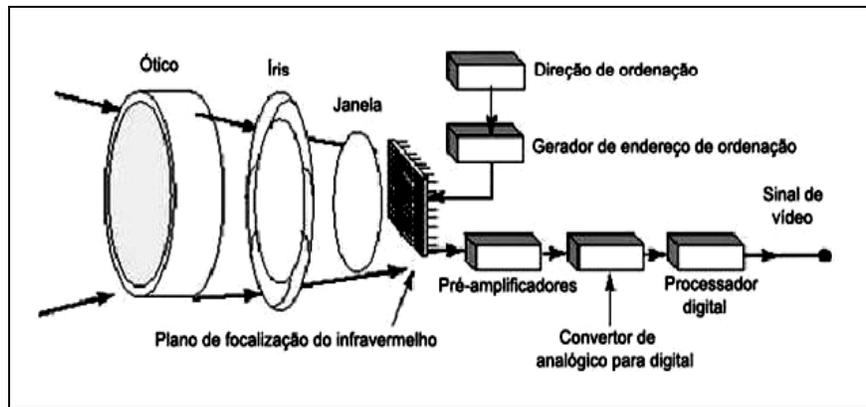


FIGURA 2.17 – Típico sistema de imageamento infravermelho sem resfriamento

FONTE: MALDAGUE, 2001, p. 277

Rogalski (2002) apresenta uma classificação em função dos substratos nos quais são elaborados os FPAs:

- Monolíticos: o elemento básico é um metal isolante semiconductor – MIS;
- Híbridos: os detectores FPAs são fabricados sobre diferentes substratos e unidos uns com os outros por uma ligação “flip-chip”.

Pode-se apresentar uma classificação para os detectores em função de seus materiais constituintes, conforme Holst (2000):

- Semi condutores clássicos;
- Semi condutores novos ou recentes;
- Detectores térmicos.

Já Veratti apresenta a classificação em função da radiação dos materiais:

Termodetectores: baseiam-se no efeito de aquecimento causado pela radiação incidente em um elemento sensor, alterando alguma propriedade física do mesmo. Têm como característica a

larga faixa de sensibilidade espectral e tempo de resposta relativamente longo devido à inércia térmica dos materiais.

Fotodetectores: operam pela interação direta entre os fótons da radiação incidente e os elétrons do material detector. Têm como característica maior sensibilidade e possuem tempo de resposta mais curto.” (VERATTI, 1992, cap. 2-p. 7-8).

Rogalski (2002) antecipa que a evolução da tecnologia infravermelha para um futuro próximo incorporará os seguintes requisitos para os detectores:

Pixel's de alta sensibilidade;

Aumento na densidade de pixels acima de 106 pixels;

Redução no custo de sistemas de imageamento por área, portanto utilizando em menor escala a tecnologia de resfriamento de sensores, combinado a integração de detectores com funções de processamento de sinal (maior número de mais processadores de sinal “on-chip”). (ROGALSKI, 2002, p. 207).

A evolução permitirá o aumento da funcionalidade do processo de imageamento termal de área, através do desenvolvimento de sensores multispectrais. Isso implicará em equipamento com mais de uma faixa espectral, permitindo a utilização do mesmo equipamento para objetos com diferentes faixas de temperatura.

#### 2.6.2.1.4 *Técnica de resfriamento de detectores*

Os equipamentos que usam como detectores os semicondutores quase sempre trabalham em baixas temperaturas para evitar interferências no processo físico (agitação térmica no sinal gerado pelo detector). Naqueles que empregam supercondutores, tais como bolômetros de germânio, as temperaturas de trabalho são próximas do zero absoluto. As principais técnicas de resfriamento são: uso de gases liquefeitos, resfriadores termelétricos e Criofato Joule-Thompson.

Uso de gases liquefeitos

Os gases são armazenados em recipientes térmicos de alta eficiência, com o intuito de manter o detector rigorosamente na temperatura de ebulição, uma vez que as trocas térmicas sempre

ocorrem às custa do calor latente de evaporação.

#### Resfriadores termelétricos

Peltier, em 1834, descobriu que uma corrente passando através de termopar provoca aquecimento de uma extremidade e o resfriamento de outra, portanto, o máximo efeito térmico é conseguido pela junção de semicondutores n-p em uma disposição que permita uma rápida dissipação de calor nas extremidades aquecidas.

#### Criofato Joule-Thompson

O Criofato Joule-Thompson é uma unidade de liquefação de gases em miniatura, montada em contato direto sobre o detector. O processo de resfriamento consiste em fazer passar por uma válvula de expansão um gás em alta pressão. Ao passar, ele se liquefaz e provoca uma troca de calor, retornando em seguida em contra corrente, pré-resfriando o fluxo de entrada. (VERATTI, 1992, p.22).

#### 2.6.2.1.5 *A formação da imagem*

O imageamento é a forma de apresentação térmica que permite a observação direta da distribuição de calor na superfície dos alvos estudados. O equipamento infravermelho só irá distinguir um objeto contra um plano de fundo se houver contraste suficiente entre ambos (VERATTI, 1992). Este autor continua afirmando que o contraste é definido como a diferença entre a intensidade de radiação proveniente do objeto e do plano de fundo. Portanto, a capacidade do equipamento em distinguir entre dois pontos na imagem é chamada de Resolução Geométrica ou Resolução Óptica do Sistema. Portanto para a garantia de uma imagem de boa qualidade deve-se garantir:

- Contraste térmico;
- Sensibilidade;
- Boa resolução térmica.

### 2.6.3 Termografia aplicada em edificações

Na literatura científica internacional há vários trabalhos desenvolvidos, na Europa principalmente, utilizando termografia infravermelha em edificações do patrimônio histórico, como um instrumento de diagnóstico de patologias, de identificação de estruturas ocultas e da estrutura dos elementos que compõem a edificação. Enquanto no Brasil não há registro de trabalhos científicos, acadêmicos ou técnicos empregando a tecnologia de termografia digital em edificações do Patrimônio Histórico Brasileiro. As primeiras imagens termográficas executadas nos estudos iniciais desse trabalho, FIGURA 2.24 a FIGURA 2.26, podem ser apresentadas como “*as precursoras*” de um longo e promissor caminho a ser percorrido. Para Maldague (2001), a técnica de termografia poderá ser usada tanto para a alvenaria recém construída quanto para a antiga: “Termografia infravermelha é aplicada com processo similar para ambas, a moderna e a antiga construção”. Atendendo às diferenças existentes para construções históricas. O autor acrescenta: a termografia passiva tem mais o caráter qualitativo, pois apresenta indicativos de anormalidades, enquanto o processo de excitação térmica tende a um caráter de resultados quantitativos, pela possibilidade de mensurar e controlar os eventos (fonte, tempo, intensidade e distância). Nas edificações ocorre a predominância de trabalhos de termografia passiva, pelas dificuldades na excitação térmica externas, pelas dimensões do alvo e pela grande quantidade de energia necessária (HOLST, 2000). A escolha da técnica passiva baseia-se: na menor intervenção possível no patrimônio histórico, no intuito de evitar que a carga térmica adicional acelere o processo patológico. Cabe ressaltar que a utilização de fontes de energia externa atuando sobre um revestimento, poderá ocasionar alteração na fixação, na cor e no brilho da camada superficial, promovendo uma patologia na obra histórica.

Um dos principais agentes patológicos nas edificações é a *movimentação de partículas de água no interior dos materiais*, para Torraca (1988), as forças de ativação que podem atuar no movimento da água são apresentadas como sendo:

- a) Sucção: força proveniente de diferencial de pressão entre capilares, promovendo a molhagem do sólido seco, ou seja, a água é movimentada de um meio úmido, quando em contato, para um meio seco.
- b) Difusão: seria a ocorrência de forças de atração das moléculas de água, de um meio com maior volume de água para um meio com menor volume de água.
- c) Osmose: presença de soluções

salinas (cristais de sais diluídos em água), promovendo atração por ação de forças elétricas, originadas pelos íons. A água move-se de regiões com pouca concentração de íons para regiões com alta concentração iônica. d) Eletrocinese: a movimentação ocorre pela presença de um campo elétrico (podem-se incluir os íons salíneos). A água tende a movimentar-se no sentido do pólo positivo para o pólo negativo, ou seja, a água movimenta-se no sentido do pólo negativo. e) **Calor: quando ocorre uma diferença de potencial térmico no corpo, a água movimenta-se da região mais quente para uma região mais fria.** (TORRACA, 1988, p. 11-15).

De acordo com Maldague (2001), na construção civil, uma variação de temperatura de 1°C até 2°C (2 a 4 °F) é geralmente um indicativo ou uma suspeição de existência de problemas. A partir de 4°C ( $\cong 7^\circ\text{F}$ ) pode-se afirmar a existência de anormalidade no corpo. Por sua vez Holst (2000) afirma: A diferença de temperatura de aproximadamente 15°C entre o interior e o exterior de uma edificação é suficiente para ver a penetração de água. Nas afirmações de Host (2000), as edificações expostas a uma temperatura exterior abaixo de 0°C e uma temperatura interior acima de 0°C haverá indubitavelmente ocorrência de uma ponte térmica na alvenaria, a qual pode provocar uma mudança de fase da água debaixo da superfície do revestimento. Devido à propriedade de alta condutividade térmica da água, poderá ocorrer um fluxo de calor para fora ou para dentro das construções. Materiais com baixa condutividade térmica tendem a reduzir o fluxo de calor. De um modo geral, imagens térmicas do processo de termografia passiva apresentam, no **interior** das edificações, **áreas úmidas com imagem de áreas quentes** e **áreas secas com imagens de áreas frias**, isto deve ocorrer quando houver um processo de **aquecimento** da parede (recebendo calor do sol, por exemplo) porque a região com água se aquece mais rapidamente que a alvenaria seca. Se a **parede** estiver se **resfriando**, deve acontecer o **contrário** (por exemplo, quando a parede não recebe mais o calor do sol – tarde ou noite).

Nos trabalhos apresentados em MALDAGUE (2001), tem-se estudos utilizando técnica da termografia infravermelha passiva (**P**) e utilizando técnica da termografia infravermelha ativa (**A**). Há também a discretização dos problemas e anomalias encontrados em cada edificação histórica e a época da realização dos ensaios termográficos, a seguir uma consolidação dos trabalhos, FIGURA 2.18 a FIGURA 2.23.

1 - P Igreja de San Omobono, cidade de Cremona, Itália. Trabalho realizado no dia 22-05-1994. Patologia: presença de água na parte inferior da alvenaria frontal, possivelmente por processo de capilaridade (FIGURA 2.18 e FIGURA 2.19).

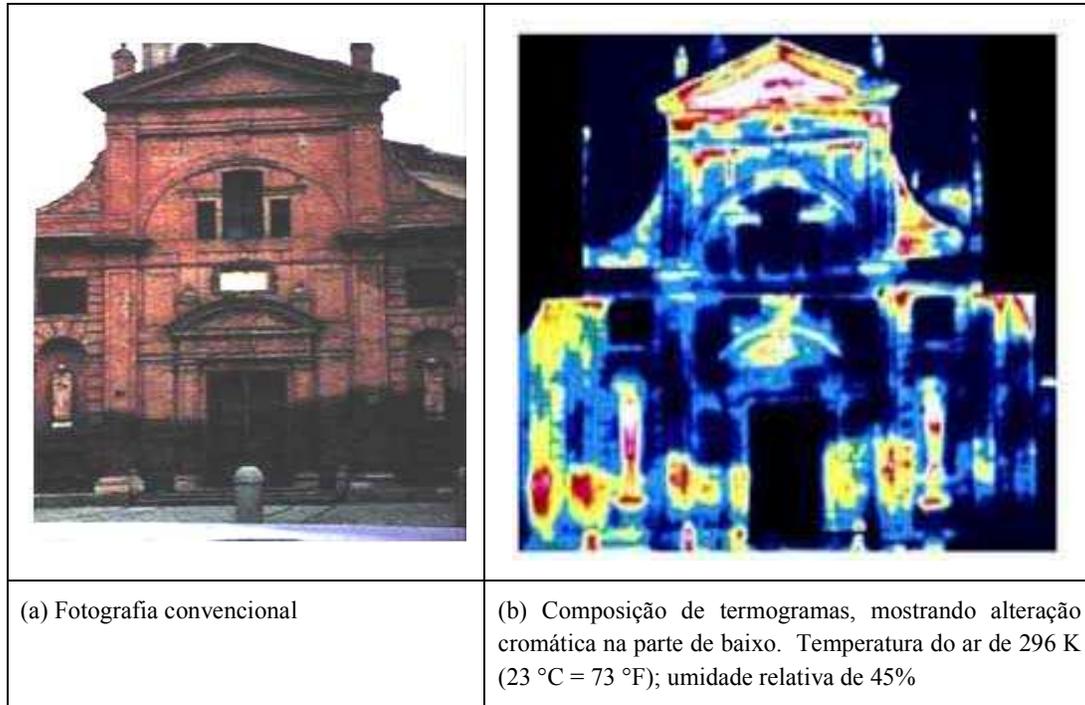


FIGURA 2.18 – Igreja de San Omobono, Cremona, Itália, 22 de maio de 1994

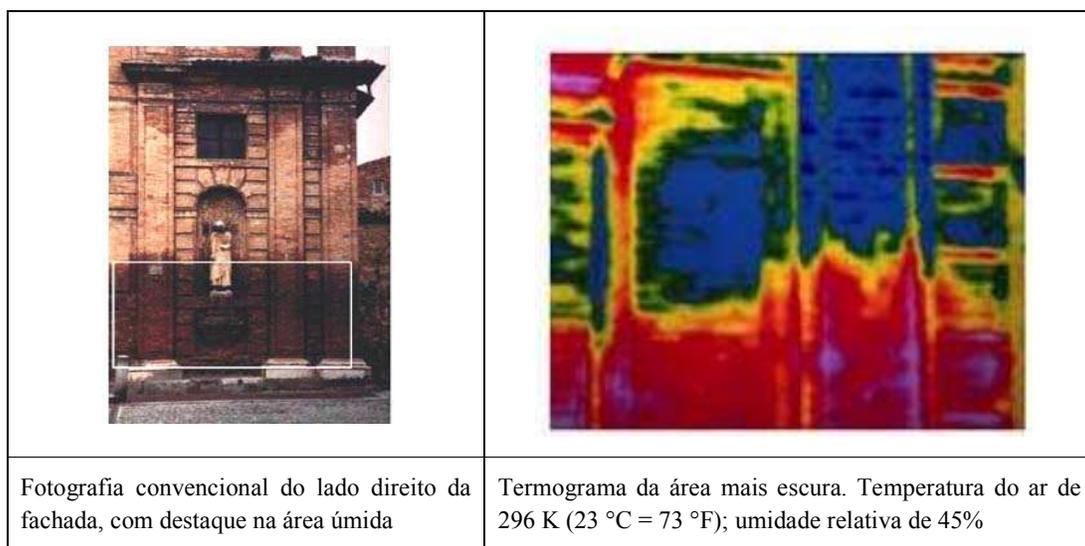


FIGURA 2.19 – Igreja de San Omobono, Cremona, Itália

FONTE: MALDAGUE, 2001, p. 626 e 627.

2 - P Fachada do oratório da Guardia de Sotto Corisco, Itália. Trabalho realizado no período de 11/1995 a 06/1997. Em 1995, detectou-se um gradiente de temperatura indicando uma argamassa contínua. Em 1997, detectou-se uma elevação do teor da umidade da alvenaria frontal próximo ao piso (FIGURA 2.20).

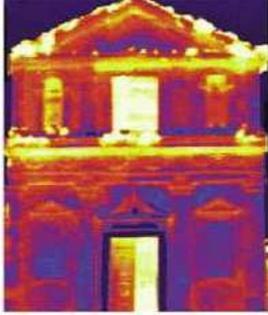
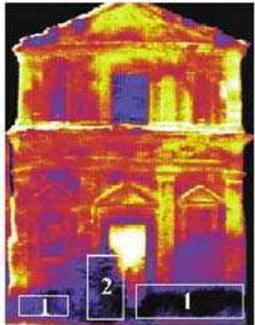
		
<p>Fotografia convencional;</p>	<p>Termograma da fachada não revela nenhuma acumulação de umidade (21 de 11/1995, temperatura do ar de 280 K = 7 °C = 45 °F, umidade relativa de 57%, céu claro);</p>	<p>Termograma passivo (16 de 06/1997, temperatura do ar de 296 K = 23 °C = 73 °F, umidade relativa de 67%)</p>

FIGURA 2.20 – Fachada do oratório de Guardia di Sotto, Corsico, Itália:

FONTE: MALDAGUE, 2001, p. 642.

3 - P Fachada da Igreja de San Massimo, Sedriano, Itália. Trabalho realizado em maio de 2000. Detectou elevação de umidade ao longo da base da parede (FIGURA 2.21).

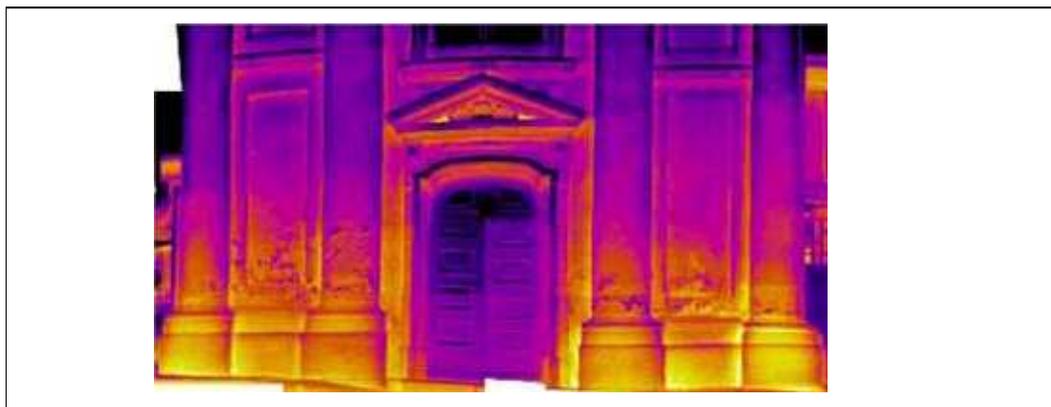


FIGURA 2.21 – A imagem de termogramas infravermelhos mostra a distribuição da elevação da umidade na base da fachada da Igreja de San Massimo, Sedriano, Itália, 2000.

FONTE: MALDAGUE, 2001, p. 643.

4 - P Igreja Santa Maria de Cantuello, Ricengo, Itália. Trabalho realizado em março de 1997. Identificou fissuras no arco principal (FIGURA 2.22).

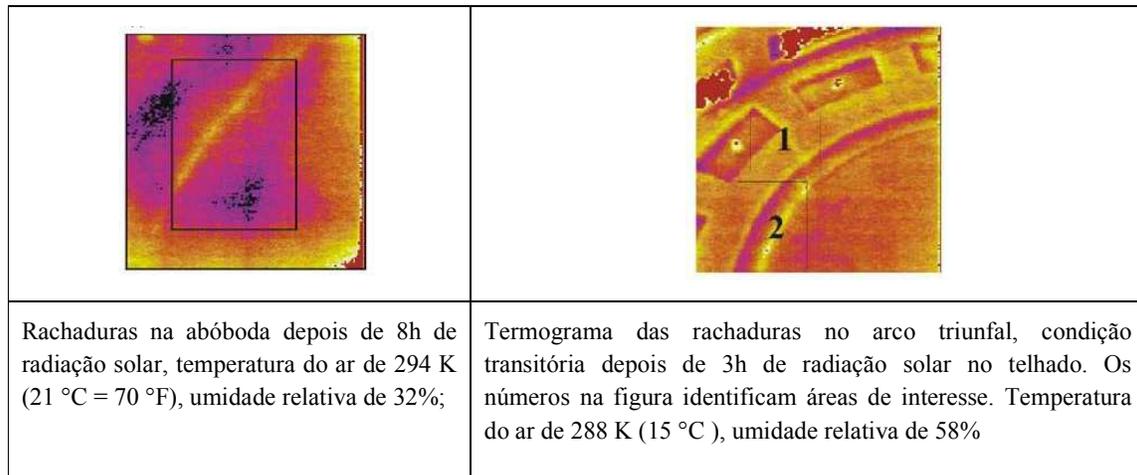


FIGURA 2.22 – Igreja de Santa Maria de Cantuello, Ricengo, Itália,

FONTE: MALDAGUE, 2001, p. 631.

5 - P Sacristia da Igreja Santa Maria do Lavello, Bergamo, Itália. Trabalho realizado em março de 1998. Detectou área úmida maior que a zona do reboco danificado na sacristia, ou seja, a umidade já ultrapassava a altura do reboco danificado, indicando que a patológica estava em estágios diferenciados: um estágio avançado (alteração do reboco) e em um segundo estágio ascensão da água (FIGURA 2.23).

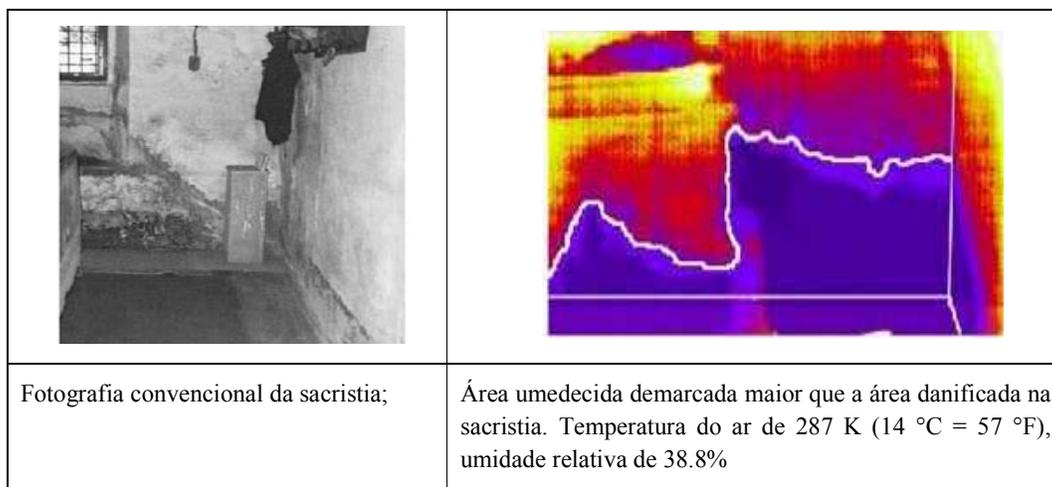


FIGURA 2.23 – Santa Maria do Lavello, Bergamo, Itália,

FONTE: MALDAGUE, 2001, p. 644

Os primeiros ensaios em edificações do *Patrimônio Histórico Brasileiro* utilizando técnica da termografia infravermelha passiva (P) foram realizados neste estudo, em outubro de 2006, FIGURAS 2.24 a FIGURA 2.26.

1 - P Altar da Igreja de São Francisco de Assis, Belo Horizonte, Brasil. Trabalho realizado em outubro de 2006. Detectou-se umidade no painel do Altar Mor (FIGURA 2.24).



FIGURA 2.24 – Altar Mor da Igreja de São Francisco de Assis. Foto montagem termografia e fotografia convencional do painel de Portinari.

FONTE: Foto do arquivo particular do AUTOR, 2007

2 - P Coro da Igreja de São Francisco de Assis, Belo Horizonte, Brasil. Trabalho realizado em outubro de 2006. Presença de alteração térmica, possibilidade da presença de umidade na face de contato (áreas em azul) da estrutura de concreto e no painel de madeira, alteração térmica nos painéis de madeira na lateral do Coro. (FIGURA 2.25).



FIGURA 2.25 – Foto montagem - Termografia e fotografia convencional.

FONTE: Foto do arquivo particular do AUTOR, 2007

3 - P Detalhe da fachada lateral da Igreja de São Francisco de Assis, Belo Horizonte, Brasil. Trabalho realizado em outubro de 2006 (FIGURA 2.26).

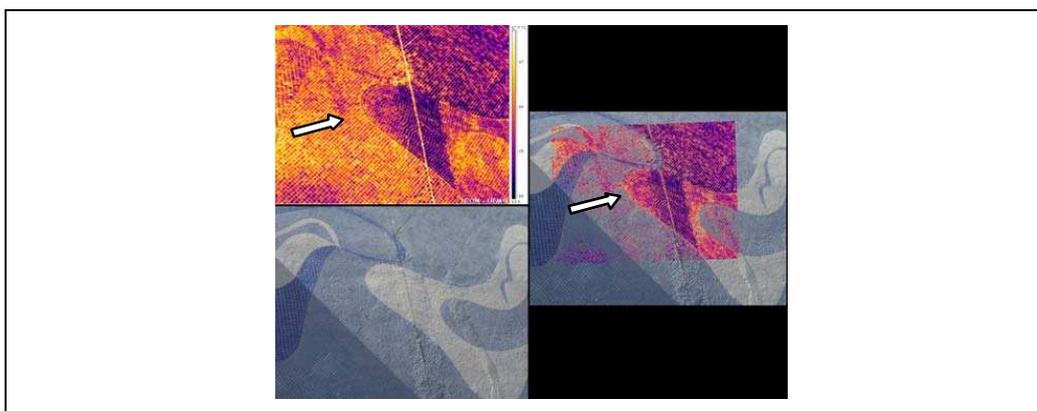


FIGURA 2.26 – Detalhe da fachada lateral da Igreja de São Francisco de Assis, Belo Horizonte: termografia e fotografia convencional da fachada lateral. Presença de alteração térmica nas pastilhas de revestimento, possibilidade de presença de vazios ou de umidade.

FONTE: Fotos do arquivo particular do AUTOR, 2007.

### **3. METODOLOGIA**

A pesquisa aplicada proposta para este trabalho consiste na caracterização da presença oculta de elementos estruturais no interior de uma edificação do Patrimônio Histórico do Estado de Minas Gerais.

Para alcançar os objetivos foi executado um trabalho de campo, onde empregou-se duas técnicas de identificação de anomalias e estruturas ocultas na alvenaria: a primeira caracteriza-se pelo emprego da termografia digital e a segunda pelo emprego de termopares fixados na superfície da alvenaria.

Com o intuito de avaliar o processo de medição também foram levantados os dados ambientais do entorno da edificação.

#### **3.1 Apresentação do objeto em estudo**

A representante do patrimônio histórico selecionado foi a “Capela São Sebastião de Águas Claras” (FIGURA 3.1), construída no século XVII em adobe. Implantada no distrito de São Sebastião de Águas Claras, município de Nova Lima, situada na região metropolitana de Belo Horizonte capital do Estado de Minas Gerais, Brasil.

A escolha da edificação teve como critério a importância histórica, a sua localização e o acervo técnico documental da edificação.

A edificação destaca-se não só pela época (século XVII), mas também pela tipologia do alvo, pelos materiais de época utilizados no processo de construção (a alvenaria de adobe e estrutura de madeira revestida de adobe) e por sua conservação e preservação.



FIGURA 3.1 – Foto da Capela de São Sebastião das Águas Claras.

FONTE: Foto do arquivo particular do AUTOR, 2007

### 3.2 Importância histórica

O distrito de São Sebastião das Águas Claras tem origem no ciclo do ouro, quando os bandeirantes paulistas buscavam e exploravam as riquezas minerais do Estado. Com a descoberta de ouro nos cursos d'água dos ribeirões dos Cristais e do Campo, a região apresentou uma grande expansão, (QUEIROZ, 2003). No ano de 2000, no dia 13 de Abril, a prefeitura de Nova Lima, em seu Decreto Municipal nº 1657/2000, (Livro de Tombo, p.01, item 6 – Departamento de Patrimônio Histórico e Artístico de Nova Lima, Minas Gerais), declarou o tombamento da Capela de São Sebastião das Águas Claras. Também fazia parte do decreto de tombamento toda a área externa da Capela, que compreendia seu adro e muros de divisa (QUEIROZ, 2003). O tombamento tinha como justificativa o valor arquitetônico e a necessidade de que suas características originais fossem preservadas, além da sua importância social, como sustentáculo dos traços da identidade cultural da comunidade (QUEIROZ, 2003).

### 3.3 Descrição da capela

A Capela é constituída de três corpos diferenciados – nave, capela-mor e sacristia (FIGURA 3.2), além de um anexo construído *a posteriori*.

A nave e a capela-mor sucedem-se alinhadas, cobertas por telhado de duas águas.

De acordo com os estudos de MENEZES (1986), sacristia está no corpo lateral, com pé-direito reduzido e com cobertura de meia-água.

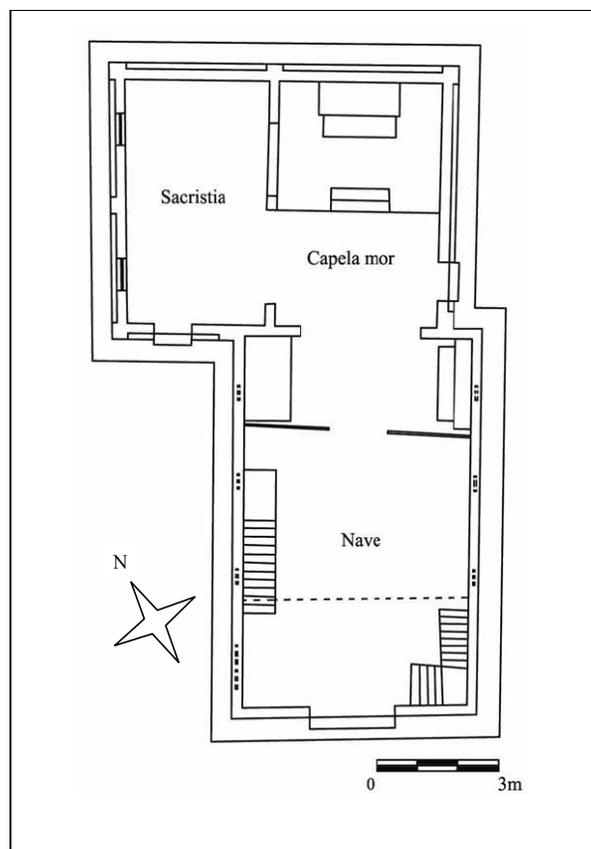


FIGURA 3.2 - Planta da Capela de São Sebastião

FONTE: MENEZES, 1986

A relação proporcional entre os elementos da Capela (sacristia, nave e capela-mor) foi alterada, no século XX, principalmente no que tange à sacristia e à capela mor.

Em sua pesquisa, Queiroz (2003) afirma que o traçado da capela e a técnica construtiva

obedecem às regras dos padrões dominantes no início do ciclo da mineração no Estado. A presença de alterações no conjunto arquitetônico (construção anexa aos fundos da capela e as alterações na sacristia) não afeta a integridade de suas características originais.

A Capela de São Sebastião de Águas Claras encontra-se implantada na Praça de São Sebastião, centro principal do distrito São Sebastião das Águas Claras.

A edificação apresenta a seguinte composição: estrutura autônoma de madeira e vedação em adobe (FIGURA 3.3). O revestimento das alvenarias é liso e claro, composto de argamassa de barro com pintura látex branca.

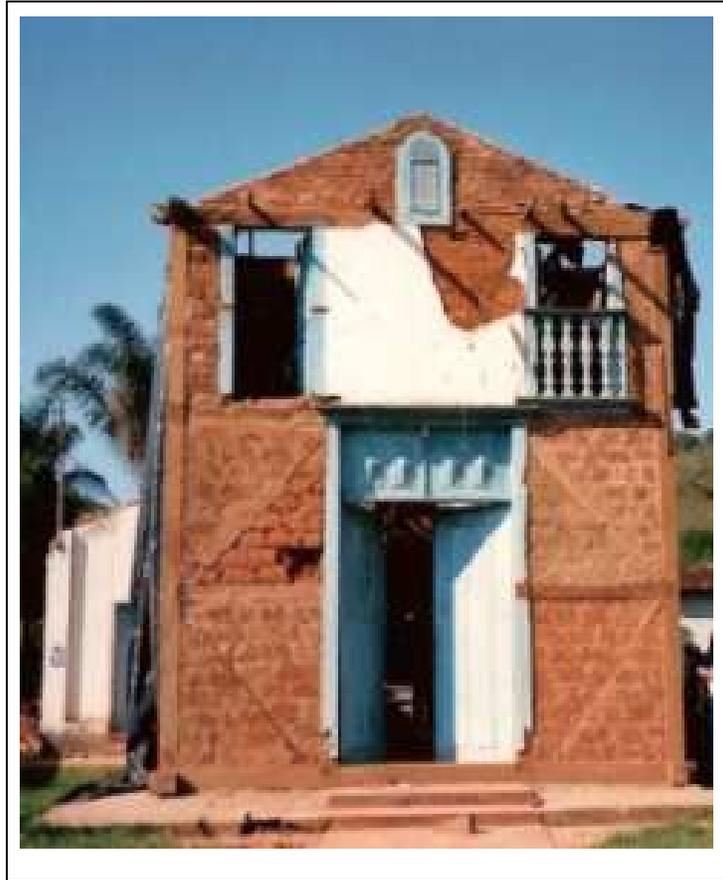


FIGURA 3.3 – Foto da capela. Alvenaria de vedação em adobe

FONTE: MENEZES, 1986

### 3.4 Variáveis Ambientais

O ambiente onde se encontra implantada a capela pode ser dividido em interno e externo. O interno da capela encontra-se livre de agentes das intempéries, ou seja, está protegido de chuva, mas apresenta pouca iluminação e ventilação natural.

Os valores de umidade relativa do ar no interior da capela são elevados.

Quanto ao ambiente externo, a capela encontra-se exposta às intempéries, com iluminação e ventilação natural, QUADRO 3.1, conforme levantamento executado por Queiroz (2003).

QUADRO 3.1  
Fatores climáticos da região

<b>Clima:</b> Temperado de inverno suave		
<b>Temperatura média anual</b>	19,5°C	Período de 1983 a 1990
<b>Umidade relativa média</b>	74,5%	
<b>Precipitação</b>	No verão	Precipitação
	No inverno	Seco
		1.709,1 mm de chuva anual
<b>Período de maior volume de precipitação:</b>		Dezembro (média 454,1mm)
<b>Insolação total média anual:</b>		2.049, 6 horas de sol
<b>Período de maior índice de insolação anual:</b>		Inverno seco
<b>Vento</b>	Velocidade média	Baixa (1,0 m/s)
	Direção:	SE (quase todo o período anual)

FONTE: Queiroz, 2003

### 3.5 Insolação

O sol, pela manhã, atinge as fachadas laterais à direita da edificação (sentido Sudeste). No período da tarde, o sol incide na fachada esquerda (incidência quase total da área da alvenaria). A fachada da frente recebe insolação no período da manhã e a fachada posterior recebe pouca insolação devido ao sombreamento do anexo da Igreja (QUEIROZ, 2003), FIGURA 3.4.



FIGURA 3.4 - Insolação nas fachadas e vãos de ventilação livre.

FONTE: QUEIROZ, 2003.

### 3.6 Desenvolvimento do trabalho de campo

#### 3.6.1 Data e condições climáticas

O experimento foi dividido em duas etapas:

A primeira etapa teve início no dia 13 de abril de 2007, sexta-feira, às 10h00min., com a montagem do experimento e término às 15h30min.

A segunda etapa teve início no dia 13 de abril de 2007, sexta-feira, às 17h00min.

com a coleta de dados e encerrada às 17h00min., do dia 14 de abril de 2007, sábado.

As condições ambientais, QUADRO 3.2, da região onde está localizado o alvo são:

QUADRO 3.2  
Data e condição ambientais de execução

PERÍODO	DIA 13/04/07	DIA 14/04/07
MANHÃ	Céu aberto com nuvens	Céu aberto com nuvens
TARDE	Céu com algumas nuvens	Céu aberto sem nuvens
NOITE	Céu aberto	

FONTE: DO AUTOR, 2007

### 3.7 Alvo termográfico – extrato da alvenaria

Inicialmente selecionou-se um extrato da fachada, alvenaria superior esquerda (vista frontal), para a execução dos trabalhos de coleta de dados e instalação dos aparelhos, FIGURA 3.5 e 3.6. Suas dimensões encontram-se no QUADRO 3.3.

QUADRO 3.3

Quadro de dimensões do modelo físico

Discriminação	Representação	Valor	Unidade
Altura	H	2,00	m
Largura	L	1,86	m
Espessura	E	0,24	m

FONTE: DO AUTOR, 2007



FIGURA 3.5 – Foto do extrato de alvenaria da fachada frontal da Capela., 1986

FIGURA 3.6 – Foto do extrato de alvenaria da fachada frontal da Capela, 2007

FONTE: MENEZES,1986

FONTE: Foto do arquivo particular do AUTOR, 2007

Esta parede de adobe apresenta na sua estruturação vigas de madeira formando um quadro retangular com uma viga na diagonal e revestimento de adobe pintado, com tinta na cor branca nas superfícies interna e externa.

### 3.8 Descrição dos equipamentos

O equipamento termográfico utilizado no ensaio de campo foi a ThermaCam E320, FLIR (USA), FIGURA 3.7, cuja especificação está detalhada no Anexo A do presente trabalho e nos ensaios laboratoriais iniciais a Teletherm - mark 1026 SC, FIGURA 3.8.

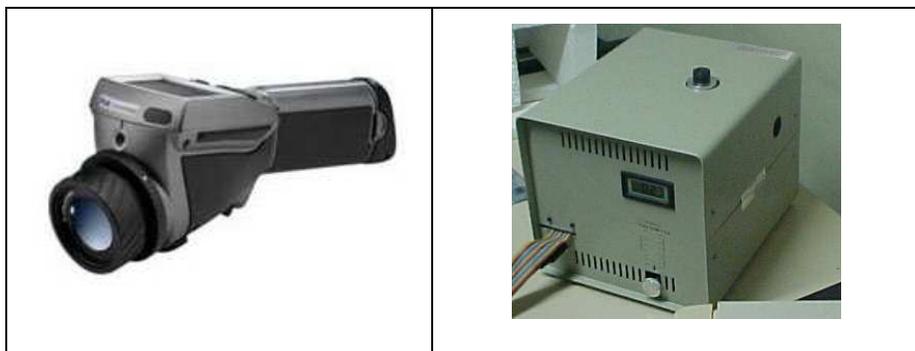


FIGURA 3.7- Foto da ThermoCam E320, FLIR (USA).

FIGURA 3.8 - Foto da TELETERM INFRARED - MARK-1026. ASHWIN SYSTEMS (USA.)

FONTE: Foto do arquivo particular do AUTOR, 2007

O conjunto de equipamentos – termopares e datalog – utilizado nos ensaios tem sua especificação detalhada no Anexo C do presente trabalho. A seguir a foto do termopar no interior da capela, FIGURA 3.9.



FIGURA 3.9 – Foto do termopar, no interior da Capela – sob o coro.

FONTE: Foto do arquivo particular do AUTOR, 2007.

A seguir, FIGURA 3.10, foto do equipamento utilizado nos ensaios para medição da velocidade do vento:



FIGURA 3.10 – Foto do termo anemômetro.

FONTE: Foto do arquivo particular do AUTOR, 2007.

A seguir, FIGURA 3.11, foto do equipamento utilizado nos ensaios para medição de temperatura ambiente e umidade relativa do ar. Foram utilizados dois equipamentos em ambiente externo e dois equipamentos no ambiente interno da capela,



FIGURA 3.11 – Foto do Hobo.

FONTE: Foto do arquivo particular do AUTOR, 2007.

### 3.9 Coleta de dados – Medição

#### 3.9.1 Medição com equipamentos fixos

Para a coleta dos dados com os equipamentos fixos foram utilizados:

- *Medição de Temperatura Ambiente e Umidade Relativa do Ar*

Foram instalados quatro aparelhos (Hobos) para captar e armazenar os dados de temperatura ambiente e umidade relativa do ar durante 24 horas com intervalos de 5 minutos.

- *Medição de Temperatura com Contato – termopares*

Os dados de temperatura foram coletados e armazenados em datalog de 16 canais. O período de armazenamento foi de 24 horas, com intervalos de tempo de 5 minutos.

- *Medição de Carga Solar Incidente na Superfície*

Os dados de temperatura foram coletados e armazenados em datalog de 16 canais. O período de armazenamento foi de 24 horas, com intervalos de tempo de 5 minutos.

#### 3.9.2 Medição com equipamentos móveis

Para coleta dos dados com os equipamentos móveis foram utilizados:

- *Medição de Temperatura sem contato*

Foram coletados termogramas da face interna e externa da alvenaria, utilizando uma ThermaCam E320, FLIR (USA), no período de 24 horas, em intervalos de tempo de 1 (uma) hora.

Preliminarmente, foi executado o teste de determinação de emissividade do alvo, apresentado por Maldague (2001, p. 36-37).

O método consiste na comparação da temperatura de um corpo negro com a temperatura do alvo em estudo, ou seja, deve-se afixar “fitas isolantes” na cor preta, para simulação de corpos negros, FIGURA 3.12, sobre alvenaria e, após 01h:30min. de sua fixação (tempo estimado para equilíbrio térmico fita/ superfície), efetuou-se uma medida de temperatura no ponto preto com emissividade igual a 1,00 (temperatura determinada: 298,25 K ou 25,1° C). A seguir, apontou-se a termocâmera para um ponto próximo e procedeu-se variação da emissividade até que a temperatura do ponto atingisse 298,25 K ou 25,1° C (emissividade obtida: 0,92).



FIGURA 3.12 – Fotos do experimento da emissividade.

FONTE: Foto do arquivo particular do AUTOR, 2007.

A distância de medição externa foi sempre constante e igual ao intervalo de 10 m. Internamente o intervalo foi de 5 m.

O valor da distância obedece às medidas IFOV (Anexo A) estabelecidas no manual do equipamento, a fim de evitar ou minimizar as incertezas no processo de coleta de dados para a termografia.

Pequenos deslocamentos laterais foram executados no intervalo, a fim de eliminar incertezas de reflexos externos incidentes sobre a superfície.

- *Medição de Vento*

A velocidade do vento externo foi coletada no período de 24 horas, em intervalos de uma hora.

Cada medição consistiu na determinação da velocidade do vento em 03 intervalos de tempo (5 segundos).

Os dados foram anotados para posterior tratamento matemático.

O aparelho utilizado foi um medidor de fio quente, (“*compuflow*”, FIGURA 3.10).

### **3.10 Localização dos equipamentos de medição**

#### **3.10.1 Localização dos equipamentos para medição por contato**

Foram afixados 14 (quatorze) termopares tipo T, diâmetro 24 AWG (0,51 mm.), sobre a superfície da alvenaria. Sua disposição atendeu ao posicionamento da matriz do modelo matemático proposto, observando sua posição nos planos x, y e z e a sua correspondência das faces interna e externa.

Os termopares tinham comprimento fixo (1,00 m) e sua extremidade oposta à parede era unida a um fio de prolongamento de compensação.

Na face externa frontal foram colocados os termopares de 1 a 7, o termopar de número 8 foi fixado na parede externa (lateral direita) e na face interna os termopares de 9 a 14. Foi colocado também no interior da capela um termopar (termopar nº 15), posicionado no ar, FIGURA 3.8, abaixo do coro, a uma altura de 2,40 m do piso interno da capela. Todos os termopares da alvenaria foram afixados com fita tipo crepe da “*ADERE*”, modelo *Tape Fix*, com largura de 19 mm e comprimento variável. Para o trabalho de campo foi elaborado um projeto de implantação, FIGURA 3.13, dos termopares. A sua disposição foi assim estabelecida, QUADRO 3.4

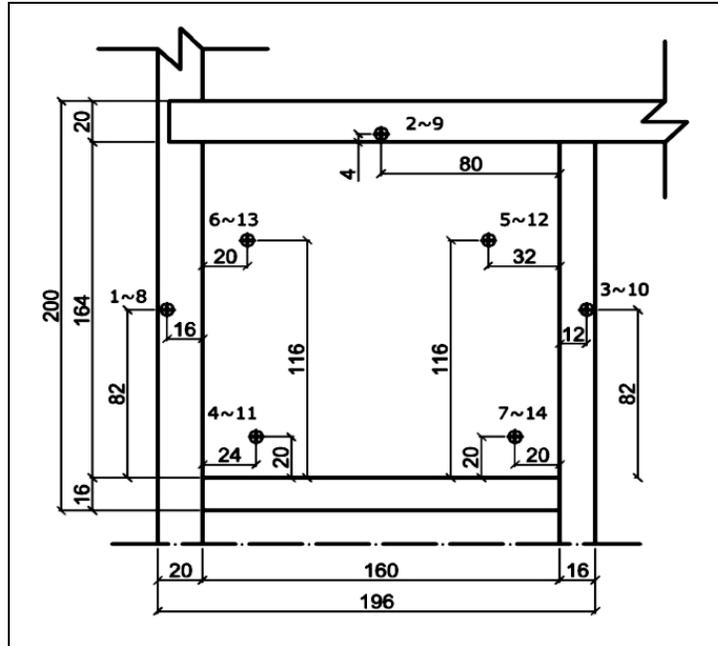


FIGURA 3.13 – Projeto da localização dos termopares.

FONTE: DO AUTOR, 2007.

QUADRO 3.4

Disposição dos Termopares

TERMOPARES	FACE		
	EXTERNA	INTERNA	POSIÇÃO EM RELAÇÃO AOS MATERIAIS
	01	08	Pilar de madeira - fibra vertical
	02	09	Viga de madeira - fibra horizontal
	03	10	Pilar de madeira (porta)
	04	11	Viga inclinada
	05	12	Viga inclinada
	06	13	Adobe superior
07	14	Adobe inferior	

FONTE: DO AUTOR, 2007.

A disposição dos termopares (linhas e colunas) foi sempre privilegiando as regiões mais representativas e as linhas de fronteiras de contato, a seguir, FIGURA 3.14:



FIGURA 3.14 – Fotos da localização externa e interna dos termopares.

FONTE: Foto do arquivo particular do AUTOR, 2007.

O termopar de número 8 não pôde ser fixado na posição original (face oposta do pilar de madeira), pelo fato de que o mesmo deveria ser fixado no interior da alvenaria perpendicular ao pilar. Sua fixação ocorreu no pilar de madeira na face ortogonal ao termopar 1.

### 3.10.2 Localização dos equipamentos para medição de Carga Solar Incidente na Superfície

Foram instalados 03 piranômetros nas faces: frontal (fachada frontal); lateral esquerda (vista frontal); lateral direita (vista frontal). Sua fixação na alvenaria é feita com presilhas no cabo e fita dupla face na face de contato do piranômetro e parede. Sua disposição e localização podem ser vista nas FIGURAS 3.15 e FIGURA 3.16, a seguir:

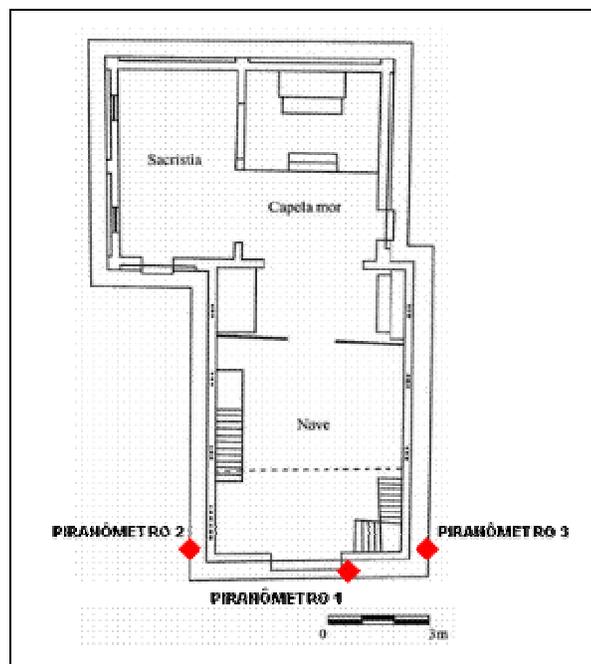


FIGURA 3.15 – Localização dos piranômetros.

FONTE: DO AUTOR, 2007.



FIGURA 3.16 – Fotos da localização dos piranômetros. Fachada frontal da capela.

FONTE: Foto do arquivo particular do AUTOR, 2007.

3.10.3 Localização dos equipamentos para medição de temperatura ambiente e umidade relativa do ar – Hobos - FIGURA 3.17

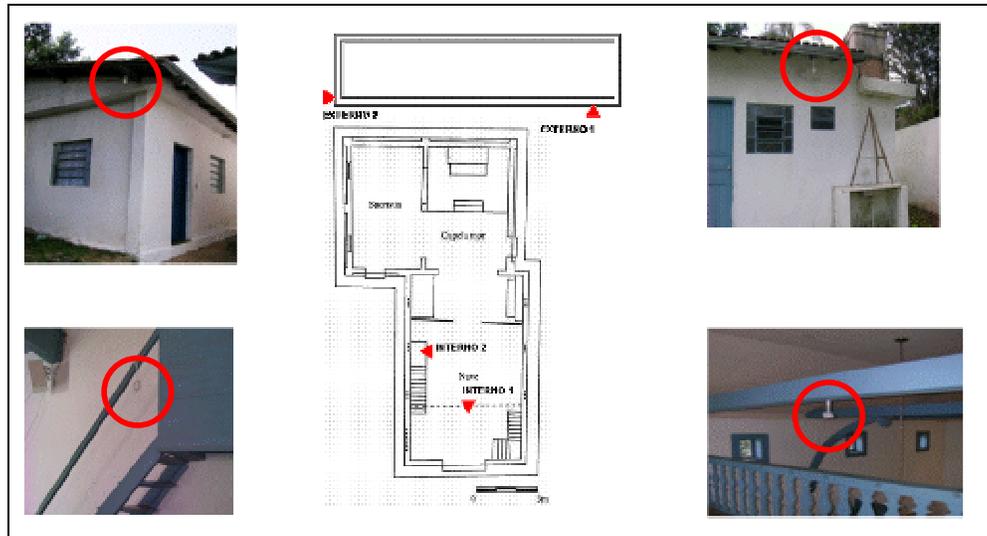


FIGURA 3.17 – Localização e fotos dos Hobos.

FONTE: Foto do arquivo particular do Autor, 2007.

3.10.4 Localização do equipamento de medição da velocidade do vento - FIGURA 3.18

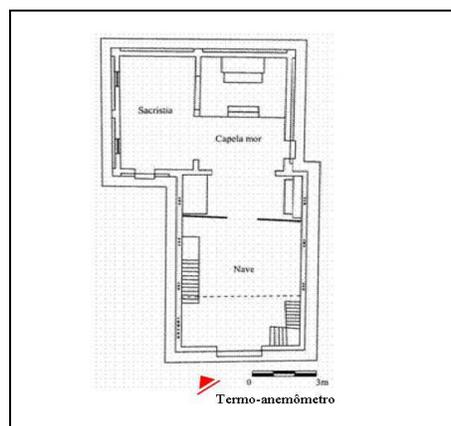


FIGURA 3.18 – Localização anemômetro.

FONTE: DO AUTOR, 2007

### 3.10.5 Localização do equipamento para medição de Termografia, FIGURA 3.19

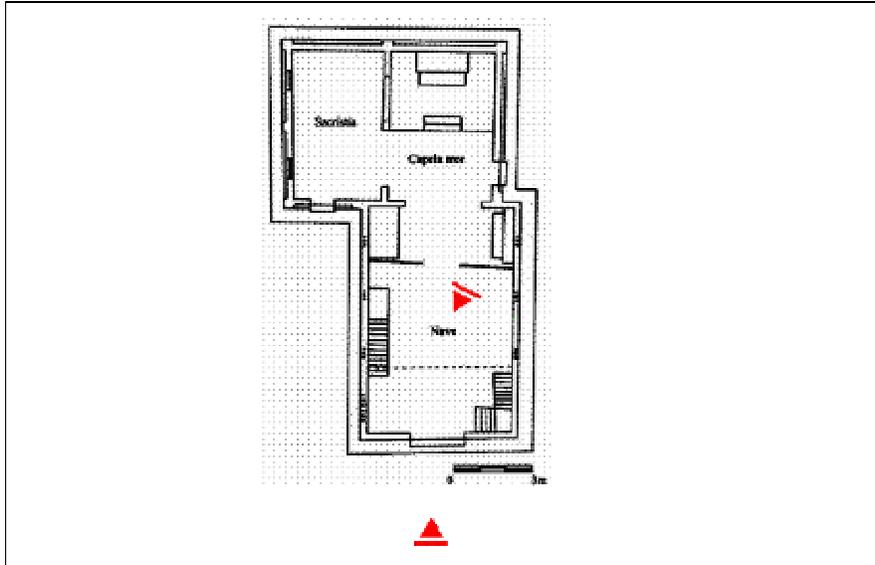


FIGURA 3.19 – Posição da execução dos pontos de execução da termografia.

FONTE: DO AUTOR, 2007

### 3.11 Validação dos resultados

A câmera termográfica capta a distribuição de temperaturas superficiais do corpo enfocado, com uma alta definição proporcionando uma análise qualitativa e quantitativa.

A sensibilidade do equipamento pôde ser comprovada pelo amplo espectro de cores da imagem termográfica obtida, que corresponde à variação térmica detectada no corpo, mesmo que a amplitude térmica seja pequena.

Resultados criteriosos e mais confiáveis da termografia, de um bem imóvel patrimoniado, poderiam ser obtidos ao se complementar o usual diagnóstico baseado na observação qualitativa da imagem infravermelha com uma análise quantitativa dos aspectos observáveis através desta técnica.

Para a validação optou-se por duas técnicas: a primeira qualitativa por meio da

documentação fotográfica histórica (parte documental integrante do processo de tombamento histórico), e a segunda quantitativa, por meio de um modelamento matemático do fenômeno em estudo.

Apesar de existir metodologias consagradas, para a solução de problemas complexos como este, a opção adotada foi elaborar um modelo linear discreto com controle individual das condições de contorno do alvo.

A validação do modelo matemático proposto passa pela comparação de seus resultados com os dados experimentais obtidos por meio dos ensaios de campo.

#### 3.11.1 Validação qualitativa dos resultados

A validação qualitativa dos resultados da termografia e dos termopares adotada foi por meio de uma pesquisa bibliográfica documental dos registros formais das intervenções promovidas na Capela de São Sebastião de Águas Claras.

#### 3.11.2 Validação quantitativa dos resultados

O modelo físico *tradicional* de transferência de calor não se aplica neste estudo, pois não é objeto de análise o fluxo de calor entre os meios internos e externos do ambiente no qual está inserida a alvenaria e, também não é objeto de análise a evolução temporal tendendo ao equilíbrio entre ambiente interno e externo, separados pela alvenaria.

O presente estudo de tem como objetivo a validação do método termográfico e ampliação de sua abrangência na análise de conservação de um imóvel patrimonial, por meio de um modelamento que enfoque a estrutura típica da construção conhecida, FIGURA 3.20.

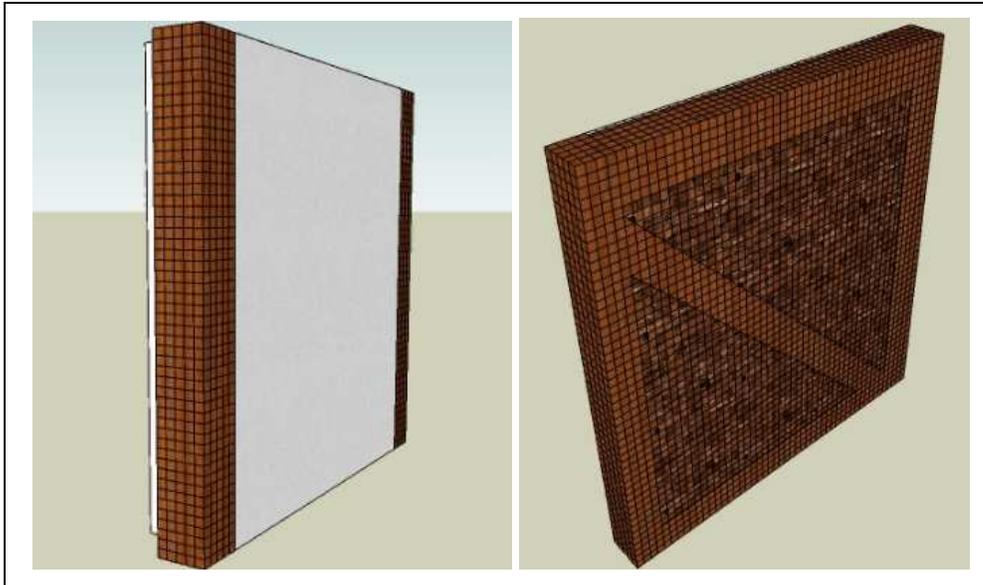


FIGURA 3.20 – Representação da estrutura típica da alvenaria.

FONTE: DO AUTOR, 2007

Pode-se descrever o modelo do estudo, por meio de suas propriedades, como sendo:

- Corpo sólido, tridimensional,
- Corpo não homogêneo e Superfície áspera;
- Corpo lamelar, poroso, permeável;
- Amostra de espessura finita, pequena em relação ao comprimento;

Suas condições de contorno são conhecidas:

- Sistema fechado, sem geração de energia interna;
- Regime transiente;

As condicionantes ambientais foram levantadas em campo:

- Velocidade do vento, Temperatura ambiente, Umidade relativa do ar;
- A energia solar atuante no alvo termográfico é determinada em campo.

O objetivo da análise é a obtenção de uma detalhada distribuição espacial de temperatura através do corpo conhecido, de modo a apresentar as variações desta distribuição, não só visualmente como na termografia, mas quantitativamente, indicando a presença de materiais distintos (adobe e madeira) de construção.

A alvenaria faz a separação de um ambiente externo sujeito a uma ampla variação de temperatura, umidade e incidência de radiação solar e um ambiente interno com variações de temperatura menos amplas e com respostas às oscilações externas amortecidas e defasadas no tempo.

A parede, em decorrência desta situação, apresenta a cada instante do dia uma distribuição diferente de temperatura. Devido a esta alternância os fluxos de calor internos da alvenaria, de acordo com o horário do dia, variam continuamente em intensidade e direção.

Tendo em vista o comportamento diversificado dos materiais básicos empregados – madeira e adobe – que apresentam diferentes valores de capacidade térmica e condutividade térmica (propriedade direcional na madeira).

Um modelo matemático, que almeje reproduzir a distribuição térmica da termografia com a mesma sensibilidade, deve levar em conta todos os fatores determinantes das mínimas distribuições de temperatura porventura existentes no corpo observado.

Para tal torna-se necessário o estabelecimento de um modelo *Tridimensional-Transiente* de transferência de calor tendo como condições de contorno os fluxos de transferência de calor convectivo e de radiação solar entre o ambiente externo e a parede. Já no ambiente interno ocorrerá fluxos convectivos sem incidência de radiação solar. Os ciclos térmicos diários dos ambientes externo e interno são diferenciados entre si e defasados no tempo. Estes ciclos conjugados às propriedades térmicas dos materiais utilizados proporcionam, ao longo do dia, diferentes condições de transferência e armazenamento de calor.

Pode-se concluir que **o perfil da distribuição de temperatura de cada setor do corpo, em função do tempo, terá características particulares**.

Desta maneira, torna-se inviável a utilização de um modelo matemático simplificado que poderia ser razoável caso o objetivo fosse tão somente calcular o calor transferido através da parede.

O modelo teórico matemático é composto por uma matriz de células, FIGURA 3.21 e a foto FIGURA 3.22., representam os materiais e sua posição no sistema de eixos cartesianos.

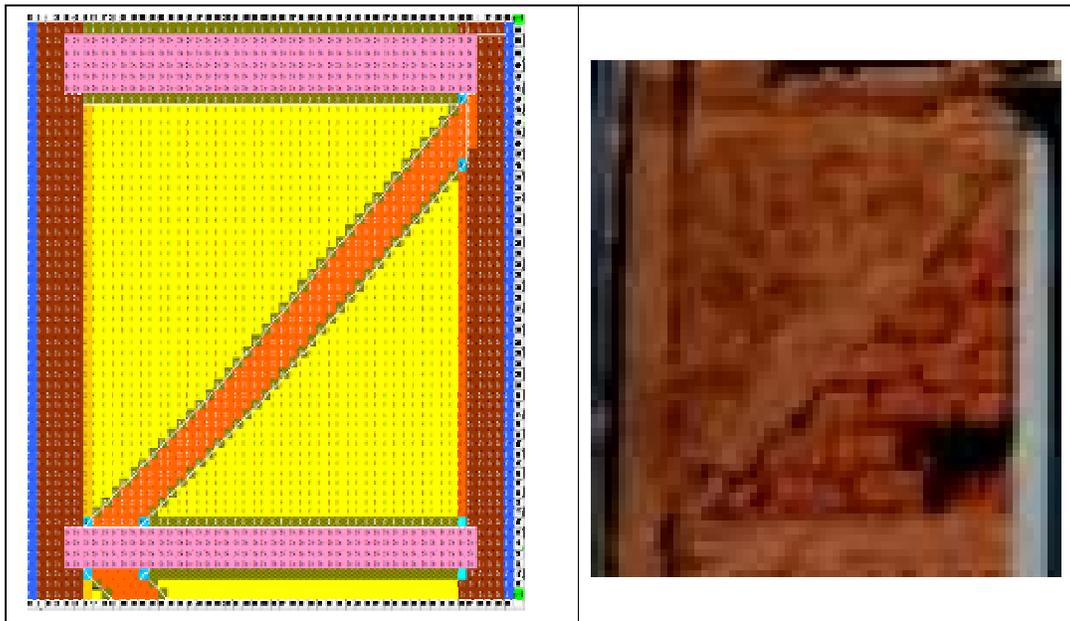


FIGURA 3.21 – Representação do modelo matemático. FIGURA 3.22 – Foto da alvenaria.

FONTE: DO AUTOR, 2007.

FONTE: MENEZES, 1986.

O QUADRO 3.5 apresenta as dimensões das células do modelo. O conjunto de coordenadas numéricas **m,n,p,t**, corresponde ao conjunto **x,y,z,t** de coordenadas analíticas.

QUADRO 3.5

Dimensões dos nodos da malha do modelo matemático.

Direção	Valor	Módulos	Quantidade	Posição
$\Delta x$	4,00 cm	60 módulos	50	M
$\Delta y$	4,00 cm	61 módulos	49	N
$\Delta z$	4,00 cm	5 módulos	6	P

FONTE: DO AUTOR, 2007.

As células, FIGURA 3.23, representam os materiais e sua posição na matriz.

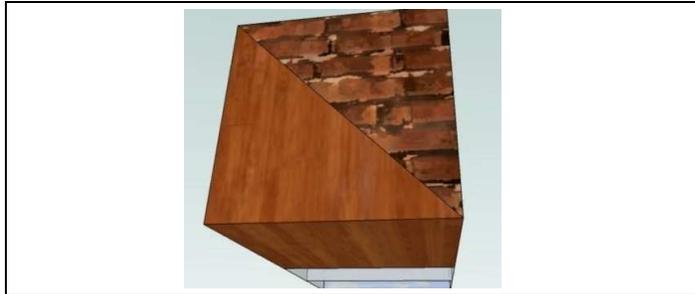


FIGURA 3.23 – Representação do modelo da célula da alvenaria

FONTE: DO AUTOR, 2007,

A alvenaria foi subdividida ainda em: 01 face interna, 01 face externa e quatro planos internos, paralelos às faces exteriores, FIGURA 3.24, divididos em células de modo similar. O contorno da face externa entre as colunas  $m=0$  a  $m=5$  é constituído pela parede lateral Oeste, o restante pelo ar ambiente interno.

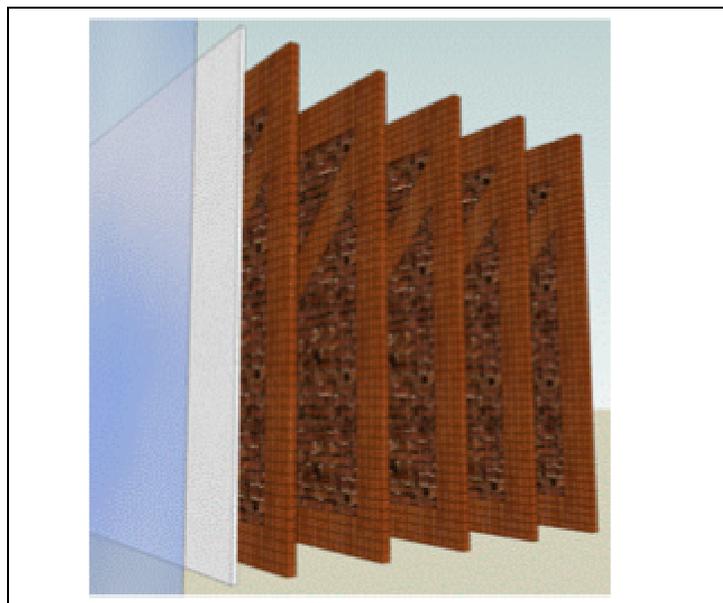


FIGURA 3.24 – Representação da estrutura interna da alvenaria.

FONTE: DO AUTOR, 2007

### 3.12 Formulação numérica

A organização da proposta do modelo matemático passa pela resolução de um problema inverso, ou seja, segundo Campos Velho (2007), *a solução de um problema inverso consiste em determinar causas baseado na observação dos seus efeitos.*

Pode-se assim classificar o método para solução do problema proposto (modelo) como de *inversão direta, estocástico* e, baseado no ajuste dos parâmetros físicos dos materiais.

O ajuste do modelo foi desenvolvido em aproximações sucessivas.

Como o problema não apresenta solução analítica, foi utilizada uma solução numérica. *A solução numérica escolhida é o de equações de diferenças finitas tridimensionais em regime transiente.*

A equação diferencial da condução do painel da parede plana é expressa por:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$

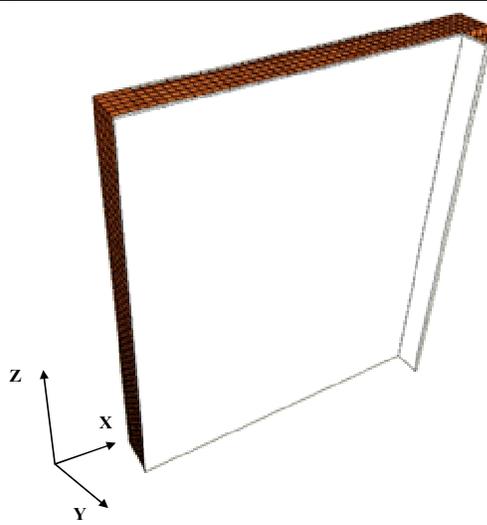
Devido a heterogeneidade da alvenaria considerou-se o adobe material isotrópico por domínio e a condutividade direcional da madeira, portanto tornou-se necessário as equações para cada tipo de material:

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (3.2)$$

As condições de contorno, para os eixos x,y,z, suas formulações e representação física, são apresentadas no QUADRO 3.6 e FIGURA 3.25, a seguir:

QUADRO 3.6

Condições de Contorno

Posição	Formulação		Representação Física
X	= 0	$-kx \frac{\partial T}{\partial x} = hce (T_{\infty} - T_x=0) + qsw$	
	= L	$-kx \frac{\partial T}{\partial x} = hce (T_i - T_x=0) + qsl$	
Y	= 0	$-ky \frac{\partial T}{\partial y} = 0$ ⇒ Condição de simetria com o painel inferior	
	= H	$-ky \frac{\partial T}{\partial y} = 0$ ⇒ Condição de simetria com o painel superior	
Z	= 0	$-kz \frac{\partial T}{\partial z} = hce (T_{\infty} - T_z=0) + qsF$	FIGURA 3.25 – Representação das condições de contorno
	= E	$-kz \frac{\partial T}{\partial z} = hci (T_i - T_z=P)$	FONTE: DO AUTOR, 2007

As condições de contorno são variáveis com o tempo dependendo da insolação e demais condições atmosféricas, exigindo a elaboração de uma equação em intervalos de tempo, sempre que esta variação se apresentar acentuada.

A condição inicial é especificada pela distribuição de temperatura existente (arbitrada) no instante inicial.

$$t = 0 \Rightarrow T(x,y,z,0) = T_0(x,y,z,0) \tag{3.3}$$

O instante inicial deve ser escolhido preferencialmente em horário de mínima variação espacial da temperatura. A distribuição arbitrada poderá ser corrigida ao se completar um ciclo de 24 horas.

No modelo matemático cada célula típica, dependendo do material, orientação e/ou condição de contorno, apresenta uma equação particular.

É importante observar que a condutividade térmica da madeira apresenta diferenciação na condução de calor em função do sentido das fibras (o sentido transversal apresenta uma condução mais elevada que no sentido longitudinal).

Este fato exige a partição do painel em volumes de controle diferenciados entre as partes de adobe e de madeira, estes últimos ainda levando em consideração a direção das fibras para cada viga de madeira.

As condições de controle nas superfícies limítrofes destes volumes são caracterizadas pela igualdade de fluxos de calor entre os diferentes volumes ao atravessar o contorno.

Na elaboração da solução do modelo matemático foi necessário o emprego de programa computacional em linguagem C++, uma vez que o mesmo pressupõe uma célula com dimensões de 4,0 centímetros nos eixos x, y e z, originando uma massa de dados da ordem de 4.000.000 de pontos.

Este valor foi considerado adequado em função do teste (estabilidade) de malha realizado. Portanto foi necessário associar um identificador numérico para cada fórmula na matriz, assim as equações desenvolvidas para atender o modelo matemático estão listadas no QUADRO 3.7. A estabilidade destas equações é verificada a partir dos critérios do QUADRO 3.8.

QUADRO 3.7

EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA EM CADA NODO.

EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA EM CADA NODO

SUPERFICIE DA FACE EXTERNA FRONTAL DA PAREDE

$T(m,n,p,t+1) =$

- 1.1  $CSA + Foa^* (T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t) + T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)) + 2^* T(m,n,p+1,t) + 2^* Bae^*(T_{\infty,t}) + [1 - 6^* Foa - 2^* Bae]^* T(m,n,p,t)$
- 1.2h  $CSM + Fml^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t)] + Fmt^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + 2^* Fmt^* T(m,n,p+1,t) + 2^* Bme^*(T_{\infty,t}) + [1 - 2^* Fml - 4^* Fmt - 2^* Bme]^* T(m,n,p,t)$
- 1.2v  $CSM + Fmt^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t)] + Fml^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + 2^* Fml^* T(m,n,p+1,t) + 2^* Bme^*(T_{\infty,t}) + [1 - 4^* Fmt - 2^* Fml - 2^* Bme]^* T(m,n,p,t)$
- 1.2i  $CSM + Fmi^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t) + T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + 2^* Fmi^* T(m,n,p+1,t) + 2^* Bme^*(T_{\infty,t}) + [1 - 4^* Fmi - 2^* Fmt - 2^* Bme]^* T(m,n,p,t)$
- 1.3  $CSI + Foa^* T(m+1,n,p,t) + Fmt^* T(m-1,n,p,t) + (Foa + Fml)^2 / 2^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + (Foa + Fmt)^* T(m,n,p+1,t) + 2^* Bie^*(T_{\infty,t}) + [1 - 3^* Foa - Fml - 2^* Fmt - 2^* Bie]^* T(m,n,p,t)$
- 1.4  $CSI + Fmt^* T(m+1,n,p,t) + Foa^* T(m-1,n,p,t) + (Foa + Fml)^2 / 2^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + (Foa + Fmt)^* T(m,n,p+1,t) + 2^* Bie^*(T_{\infty,t}) + [1 - 3^* Foa - Fml - 2^* Fmt - 2^* Bie]^* T(m,n,p,t)$
- 1.5  $CSI + (Foa + Fml)^2 / 2^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t)] + Fmt^* T(m,n+1,p,t) + Foa^* T(m,n-1,p,t) + (Foa + Fmt)^* T(m,n,p+1,t) + 2^* Bie^*(T_{\infty,t}) + [1 - 3^* Foa - Fml - 2^* Fmt - 2^* Bie]^* T(m,n,p,t)$
- 1.6  $CSI + (Foa + Fml)^2 / 2^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t)] + Foa^* T(m,n+1,p,t) + Fmt^* T(m,n-1,p,t) + (Foa + Fmt)^* T(m,n,p+1,t) + 2^* Bie^*(T_{\infty,t}) + [1 - 3^* Foa - Fml - 2^* Fmt - 2^* Bie]^* T(m,n,p,t)$
- 1.7  $CSM + CSO + 2^* Fmt^* T(m+1,n,p,t) + Fml^* T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t) + 2^* Fmt^* T(m,n,p+1,t) + 4^* Bme^*(T_{\infty,t}) + [1 - 4^* Fmt - 2^* Fml - 4^* Bme]^* T(m,n,p,t)$
- 1.8  $CSM + CSL + 2^* Fmt^* T(m-1,n,p,t) + Fml^* T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t) + 2^* Fmt^* T(m,n,p+1,t) + 4^* Bme^*(T_{\infty,t}) + [1 - 4^* Fmt - 2^* Fml - 4^* Bme]^* T(m,n,p,t)$
- 1.9  $T(m,47,p,t+1) = T(m,45,p,t+1)$
- 1.10  $T(m,0,p,t+1) = T(m,4,p,t+1)$  e  $T(m,1,p,t+1) = T(m,3,p,t+1)$
- 1.11  $CSI + Foa^* T(m+1,n,p,t) + Fmi^* T(m-1,n,p,t) + Fmi^* T(m,n+1,p,t) + Foa^* T(m,n-1,p,t) + (Foa + Fmt)^* T(m,n,p+1,t) + 2^* Bie^*(T_{\infty,t}) + [1 - 3^* Foa - 2^* Fmi - Fmt - 2^* Bie]^* T(m,n,p,t)$
- 1.12  $CSI + Fmi^* T(m+1,n,p,t) + Foa^* T(m-1,n,p,t) + Foa^* T(m,n+1,p,t) + Fmi^* T(m,n-1,p,t) + (Foa + Fmt)^* T(m,n,p+1,t) + 2^* Bie^*(T_{\infty,t}) + [1 - 3^* Foa - 2^* Fmi - Fmt - 2^* Bie]^* T(m,n,p,t)$
- 1.13  $CSM + (Fml + Fmi)^2 / 2^* T(m+1,n,p,t) + (Fml + Fmt)^2 / 2^* T(m-1,n,p,t) + (Foa + Fml)^2 / 2^* T(m,n+1,p,t) + Fmt^* T(m,n-1,p,t) + (Foa + 7^* Fmt) / 4^* T(m,n,p+1,t) + (Bae + 7^* Bme) / 4^* T_{\infty,t} + (1 - 1,5^* Fml + 0,5^* Fmi + 3,25^* Fmt + 0,75^* Foa + (Bae + 7^* Bme) / 4)^* T(m,n,p,t)$

PLANOS VERTICAIS INTERNOS DA PAREDE

$T(m,n,p,t+1) =$

- 2.1  $Foa^* [T(m+1,n,p,t) + T(m+1,n,p,t) + T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t) + T(m,n,p+1,t) + T(m,n,p-1,t)] + [1 - 6^* Foa]^* T(m,n,p,t)$
- 2.2h  $Fml^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t)] + Fmt^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + Fmt^* T(m,n,p+1,t) + T(m,n,p-1,t) + [1 - 2^* Fml - 4^* Fmt]^* T(m,n,p,t)$
- 2.2v  $Fmt^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t)] + Fml^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + Fmt^* T(m,n,p+1,t) + T(m,n,p-1,t) + [1 - 4^* Fmt - 2^* Fml]^* T(m,n,p,t)$
- 2.2i  $Fmi^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t)] + Fml^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + Fmt^* T(m,n,p+1,t) + T(m,n,p-1,t) + [1 - 4^* Fmi - 2^* Fmt]^* T(m,n,p,t)$
- 2.3  $Foa^* T(m+1,n,p,t) + Fmt^* T(m-1,n,p,t) + (Foa + Fml)^2 / 2^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + (Foa + Fmt)^2 / 2^* (T(m,n,p+1,t) + T(m,n,p-1,t)) + [1 - 3^* Foa - 2^* Fmt - Fml]^* T(m,n,p,t)$
- 2.4  $Fmt^* T(m+1,n,p,t) + Foa^* T(m-1,n,p,t) + (Foa + Fml)^2 / 2^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + (Foa + Fmt)^2 / 2^* (T(m,n,p+1,t) + T(m,n,p-1,t)) + [1 - 3^* Foa - 2^* Fmt - Fml]^* T(m,n,p,t)$
- 2.5  $(Foa + Fml)^2 / 2^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t)] + Fmt^* T(m,n+1,p,t) + Foa^* T(m,n-1,p,t) + (Foa + Fmt)^2 / 2^* [T(m,n,p+1,t) + T(m,n,p-1,t)] + [1 - 3^* Foa - Fml - 2^* Fmt]^* T(m,n,p,t)$
- 2.6  $(Foa + Fml)^2 / 2^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t)] + Foa^* T(m,n+1,p,t) + Fmt^* T(m,n-1,p,t) + (Foa + Fmt)^2 / 2^* [T(m,n,p+1,t) + T(m,n,p-1,t)] + [1 - 3^* Foa - Fml - 2^* Fmt]^* T(m,n,p,t)$
- 2.7  $CSO + 2^* Fmt^* T(m+1,n,p,t) + 2^* Bme^*(T_8,t) + Fml^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + Fmt^* [T(m,n,p+1,t) + T(m,n,p-1,t)] + [1 - 4^* Fmt - 2^* Fml - 2^* Bme]^* T(m,n,p,t)$
- 2.8  $CSL + 2^*(Fmt^* T(m-1,n,p,t) + 2^* Bme^*(T_8,t) + Fml^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + Fmt^* [T(m,n,p+1,t) + T(m,n,p-1,t)]) + [1 - 4^* Fmt - 2^* Fml + 2^* Bme]^* T(m,n,p,t)$
- 2.9  $T(m,47,p,t+1) = T(m,45,p,t+1)$
- 2.10  $T(m,0,p,t+1) = T(m,4,p,t+1)$  e  $T(m,1,p,t+1) = T(m,3,p,t+1)$
- 2.11  $Foa^* T(m+1,n,p,t) + Fmi^* T(m-1,n,p,t) + Fmi^* T(m,n+1,p,t) + Foa^* T(m,n-1,p,t) + (Foa + Fmt)^2 / 2^* (T(m,n,p+1,t) + T(m,n,p-1,t)) + [1 - 3^* Foa - 2^* Fmi - Fmt]^* T(m,n,p,t)$
- 2.12  $Fmi^* T(m+1,n,p,t) + Foa^* T(m-1,n,p,t) + Foa^* T(m,n+1,p,t) + Fmi^* T(m,n-1,p,t) + (Foa + Fmt)^2 / 2^* (T(m,n,p+1,t) + T(m,n,p-1,t)) + [1 - 3^* Foa - 2^* Fmi - Fmt]^* T(m,n,p,t)$
- 2.13  $(Fml + Fmi)^2 / 2^* T(m+1,n,p,t) + (Fml + Fmt)^2 / 2^* T(m-1,n,p,t) + (Foa + Fml)^2 / 2^* T(m,n+1,p,t) + Fmt^* T(m,n-1,p,t) + (Foa + 7^* Fmt) / 8^* T(m,n,p+1,t) + T(m,n,p-1,t) + (1 - 1,5^* Fml - 0,5^* Fmi - 3,25^* Fmt - 0,75^* Foa)^* T(m,n,p,t)$

SUPERFICIE DA FACE INTERNA DA PAREDE

$T(m,n,p,t) =$

- 3.1  $Foa^* (T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t) + T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)) + 2^* T(m,n,p-1,t) + 2^* Bai^*(T_i,t) + [1 - 6^* Foa - 2^* Bai]^* T(m,n,p,t)$
- 3.2h  $Fml^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t)] + Fmt^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + 2^* Fmt^* T(m,n,p-1,t) + 2^* Bmi^*(T_i,t) + [1 - 2^* Fml - 4^* Fmt - 2^* Bmi]^* T(m,n,p,t)$
- 3.2W  $(Foa + Fmt)^2 / 2^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t)] + (Fml + Foa)^2 / 2^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + Foa^* T(m,n,p+1,t) + Fmt^* T(m,n,p-1,t) + [1 - 3^* Foa - 2^* Fmt - Fml]^* T(m,n,p,t)$
- 3.2V  $(Foa + Fmt)^2 / 2^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t)] + (Fml + Foa)^2 / 2^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + Foa^* T(m,n,p+1,t) + Fmt^* T(m,n,p-1,t) + [1 - 3^* Foa - 2^* Fmt - Fml]^* T(m,n,p,t)$
- 3.2v  $Fmt^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t)] + Fml^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + 2^* Fmt^* T(m,n,p-1,t) + 2^* Bmi^*(T_i,t) + [1 - 4^* Fmt - 2^* Fml - 2^* Bmi]^* T(m,n,p,t)$
- 3.2i  $Fmi^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t)] + T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t) + 2^* Fmi^* T(m,n,p-1,t) + 2^* Bmi^*(T_i,t) + [1 - 4^* Fmi - 2^* Fmt - 2^* Bmi]^* T(m,n,p,t)$
- 3.3  $Foa^* T(m+1,n,p,t) + (Foa + Fmt)^2 / 3^* T(m-1,n,p,t) + (2^* Foa + Fml)^2 / 3^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + Foa^* T(m,n,p+1,t) + (Foa + Fmt)^2 / 2^* T(m,n,p-1,t) + [1 - 4,33^* Foa - Fmt - 2^* Fml]^* T(m,n,p,t)$   
A temperatura  $T(m,n,p+1,t)$  deve ser simulada a partir de ponto homólogo na parede frontal.  $T(6,n,5,t)$
- 3.3W  $2/3^* Foa^* T(m+1,n,p,t) + 2/3^* (Foa + Fmt)^2 / 2^* T(m-1,n,p,t) + (2^* Foa + Fml)^2 / 3^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + 2/3^* Foa^* T(m,n,p+1,t) + 2/3^* (Foa + Fmt)^2 / 2^* T(m,n,p-1,t) + 4/3^* Bmi^*(T_i,t) + [1 - 4^* Foa - 2/3^* Fml - 4/3^* Fmt - 4/3^* Bmi]^* T(m,n,p,t)$
- 3.4  $Fmt^* T(m+1,n,p,t) + Foa^* T(m-1,n,p,t) + (Foa + Fml)^2 / 2^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + (Foa + Fmt)^* T(m,n,p-1,t) + 2^* Bii^*(T_i,t) + [1 - 3^* Foa - Fml - 2^* Fmt - 2^* Bii]^* T(m,n,p,t)$   
Usar a equação 2.4 com  $p+1$  simulado na parede frontal
- 3.5  $(Foa + Fml)^2 / 2^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t)] + Fmt^* T(m,n+1,p,t) + Foa^* T(m,n-1,p,t) + (Foa + Fmt)^* T(m,n,p-1,t) + 2^* Bii^*(T_i,t) + [1 - 3^* Foa - Fml - 2^* Fmt - 2^* Bii]^* T(m,n,p,t)$
- 3.6  $(Foa + Fml)^2 / 2^* [T(m+1,n,p,t) + T(m-1,n,p,t)] + Foa^* T(m,n+1,p,t) + Fmt^* T(m,n-1,p,t) + (Foa + Fmt)^* T(m,n,p-1,t) + 2^* Bii^*(T_i,t) + [1 - 3^* Foa - Fml - 2^* Fmt - 2^* Bii]^* T(m,n,p,t)$
- 3.7  $CSO + (Foa + Fmt)^* T(m+1,n,p,t) + 2^* Bme^*(T_8,t) + (Foa + Fml)^2 / 2^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + Foa^* T(m,n,p+1,t) + Fmt^* T(m,n,p-1,t) + [1 - 3^* Foa - 2^* Fmt - Fml - 2^* Bme]^* T(m,n,p,t)$
- 3.8  $2^* Fmt^* T(m-1,n,p,t) + Fml^* [T(m,n+1,p,t) + T(m,n-1,p,t)] + 2^* Fmt^* T(m,n,p-1,t) + 4^* Bmi^*(T_i,t) + [1 - 4^* Fmt - 2^* Fml - 4^* Bmi]^* T(m,n,p,t)$
- 3.9  $T(m,47,p,t) = T(m,45,p,t+1)$   
 $T(m,0,p,t+1) = T(m,4,p,t+1)$
- 3.10  $T(m,0,p,t+1) = T(m,4,p,t+1)$  e  $T(m,1,p,t+1) = T(m,3,p,t+1)$
- 3.11  $Foa^* T(m+1,n,p,t) + Fmi^* T(m-1,n,p,t) + Fmi^* T(m,n+1,p,t) + Foa^* T(m,n-1,p,t) + (Foa + Fmt)^* T(m,n,p-1,t) + 2^* Bii^*(T_i,t) + [1 - 3^* Foa - 2^* Fmi - Fmt - 2^* Bii]^* T(m,n,p,t)$
- 3.12  $Fmi^* T(m+1,n,p,t) + Foa^* T(m-1,n,p,t) + Foa^* T(m,n+1,p,t) + Fmi^* T(m,n-1,p,t) + (Foa + Fmt)^* T(m,n,p-1,t) + 2^* Bii^*(T_i,t) + [1 - 3^* Foa - 2^* Fmi - Fmt - 2^* Bii]^* T(m,n,p,t)$
- 3.13  $(Fml + Fmi)^2 / 2^* T(m+1,n,p,t) + (Fml + Fmt)^2 / 2^* T(m-1,n,p,t) + (Foa + Fml)^2 / 2^* T(m,n+1,p,t) + Fmt^* T(m,n-1,p,t) + (Foa + 7^* Fmt) / 4^* T(m,n,p+1,t) + (Bai + 7^* Bmi) / 4^* T_i(t) + (1 - 1,5^* Fml - 0,5^* Fmi - 3,25^* Fmt - 0,75^* Foa - (Bai + 7^* Bmi) / 4)^* T(m,n,p,t)$

QUADRO 3.8

Equações para determinação da estabilidade do modelo.

EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DA ESTABILIDADE DO MODELO			
SUPERFÍCIE DA FACE EXTERNA FRONTAL DA PAREDE	1.1	$6*Foa + 2*Bae$	$\leq 1$
	1.2h	$2*Fml + 4*Fmt + 2*Bme$	$\leq 1$
	1.2v	$4*Fmt + 2*Fml + 2*Bme$	$\leq 1$
	1.2i	$4*Fmi + 2*Fmt + 2*Bme$	$\leq 1$
	1.3	$3*Foa + Fml + 2*Fmt + 2*Bie$	$\leq 1$
	1.4	$3*Foa + Fml + 2*Fmt + 2*Bie$	$\leq 1$
	1.5	$3*Foa + Fml + 2*Fmt + 2*Bie$	$\leq 1$
	1.6	$3*Foa + Fml + 2*Fmt + 2*Bie$	$\leq 1$
	1.7	$4*Fmt + 2*Fml + 4*Bme$	$\leq 1$
	1.8	$4*Fmt + 2*Fml + 4*Bme$	$\leq 1$
	1.11	$3*Foa + 2*Fmi + Fmt + 2*Bie$	$\leq 1$
	1.12	$3*Foa + 2*Fmi + Fmt + 2*Bie$	$\leq 1$
	1.13	$1,5*Fml + 0,5*Fmi + 3,25*Fmt + 0,75*Foa + (Bae + 7*Bme)/4$	$\leq 1$
PLANOS VERTICAIS INTERNOS DA PAREDE	2.1	$6*Foa$	$\leq 1$
	2.2h	$2*Fml + 4*Fmt$	$\leq 1$
	2.2v	$4*Fmt + 2*Fml$	$\leq 1$
	2.2i	$4*Fmi + 2*Fmt$	$\leq 1$
	2.3	$3*Foa + 2*Fmt + Fml$	$\leq 1$
	2.4	$3*Foa + 2*Fmt + Fml$	$\leq 1$
	2.5	$3*Foa + Fml + 2*Fmt$	$\leq 1$
	2.6	$3*Foa + Fml + 2*Fmt$	$\leq 1$
	2.7	$4*Fmt + 2*Fml + 2*Bme$	$\leq 1$
	2.8	$4*Fmt + 2*Fml + 2*Bme$	$\leq 1$
	2.11	$3*Foa + 2*Fmi + Fmt$	$\leq 1$
	2.12	$3*Foa + 2*Fmi + Fmt$	$\leq 1$
	2.13	$1,5*Fml + 0,5*Fmi + 3,25*Fmt + 0,75*Foa$	$\leq 1$
SUPERFÍCIE DA FACE INTERNA DA PAREDE	3.1	$6*Foa + 2*Bai$	$\leq 1$
	3.2h	$2*Fml + 4*Fmt + 2*Bmi$	$\leq 1$
	3.2W	$3*Foa + 2*Fmt + Fml$	$\leq 1$
	3.2v	$4*Fmt + 2*Fml + 2*Bmi$	$\leq 1$
	3.2i	$4*Fmi + 2*Fmt + 2*Bmi$	$\leq 1$
	3.3	$4,33*Foa + Fmt + 2/3*Fml$	$\leq 1$
	3.3W	$4*Foa + 2/3*Fml + 4/3*Fmt + 4/3*Bii$	$\leq 1$
	3.4	$3*Foa + Fml + 2*Fmt + 2*Bii$	$\leq 1$
	3.5	$3*Foa + Fml + 2*Fmt + 2*Bii$	$\leq 1$
	3.6	$3*Foa + Fml + 2*Fmt + 2*Bii$	$\leq 1$
	3.7	$3*Foa + 2*Fmt + Fml + 2*Bme$	$\leq 1$
	3.8	$4*Fmt + 2*Fml + 4*Bmi$	$\leq 1$
	3.11	$3*Foa + 2*Fmi + Fmt + 2*Bii$	$\leq 1$
3.12	$3*Foa + 2*Fmi + Fmt + 2*Bii$	$\leq 1$	
3.13	$1,5*Fml + 0,5*Fmi + 3,25*Fmt + 0,75*Foa + (Bai + 7*Bmi)/4$	$\leq 1$	

FONTE: DO AUTOR, 2007.

O QUADRO 3.9 apresenta a legenda da representação de cada elemento na formulação, a seguir:

QUADRO 3.9

Legenda da representação e nomenclatura dos elementos

REPRESENTAÇÃO E NOMENCLATURA DOS ELEMENTOS DE CADA CÉLULA.	
Csa	Carga Solar Absorvida pelo Adobe
Csm	Carga Solar Absorvida pela madeira
Foa	Número de Fourier para o Adobe
Fml	Número de Fourier Madeira Longitudinal
Fmt	Número de Fourier Madeira Transversal
Fmi	Número de Fourier Madeira Inclinada
Bae	Número de Biot Adobe Externo
Bai	Número de Biot Adobe Interno
Bie	Número de Biot
Bii	Número de Biot
Bmi	Número de Biot madeira inclinada
Bme	Número de Biot madeira
Hci	Condutância convectiva junto à superfície interna da parede. (W/m <sup>2</sup> /K).
Hce	Condutância convectiva junto à superfície externa da parede. (W/m <sup>2</sup> /K).
k <sub>x,y,z</sub>	Condutividade térmica nas direções, x, y ou z, (W/m <sup>2</sup> /K).
q <sub>sF</sub>	Irradiação solar absorvida pela face frontal da parede. (W/m <sup>2</sup> )
q <sub>sL</sub>	Irradiação solar absorvida pela face lateral Leste da parede. (W/m <sup>2</sup> )
q <sub>sW</sub>	Irradiação solar absorvida pela face lateral Oeste da parede. (W/m <sup>2</sup> )
T(m,n,p,t)	Temperatura no ponto (m,n,p) no instante t. (°C).
T <sub>∞</sub>	Temperatura do ar ambiente externo, (°C).
T <sub>i</sub>	Temperatura do ar ambiente interno, (°C).

FONTE: DO AUTOR, 2007.

## 4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Todos os dados foram obtidos por leitura dos equipamentos. Os resultados de temperatura estão listados em graus Celsius (°C), mas no tratamento e análise de resultados são apresentados em graus Kelvin (K), conforme literatura científica.

### 4.1 Medições em campo

#### 4.1.1 Termopares

Os resultados obtidos com a medição de temperatura com os termopares. São apresentados no QUADRO 4.1, a seguir:

QUADRO 4.1  
Termopares e temperaturas

Data	Hora corrigida	Valores de temperatura - °C														
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15
04/13/2007	17:00:18	27,5	24,2	25,4	23,9	23,9	23,6	23,7	28,0	22,2	24,0	22,3	22,7	22,2	22,5	24,7
04/13/2007	18:00:18	24,6	22,8	23,3	22,5	22,6	22,5	22,5	24,7	22,2	23,6	22,3	22,5	22,3	22,4	22,5
04/13/2007	19:00:18	22,6	21,8	21,9	21,5	21,6	21,6	21,6	23,0	22,2	23,3	22,3	22,5	22,4	22,5	22,6
04/13/2007	20:00:18	21,6	21,2	21,1	21,0	21,1	21,1	21,2	22,1	22,1	22,7	22,1	22,4	22,3	22,3	22,0
04/13/2007	21:00:18	20,7	20,7	20,4	20,4	20,6	20,7	20,7	21,3	22,1	22,7	22,3	22,4	22,3	22,4	22,1
04/13/2007	22:00:18	19,2	19,7	19,0	19,2	19,4	19,6	19,6	20,0	22,1	22,3	22,1	22,2	22,2	22,1	21,6
04/13/2007	23:00:18	18,1	18,9	17,9	18,4	18,5	18,8	18,8	19,1	21,9	21,8	21,9	22,0	22,0	21,9	21,2
04/13/2007	0:00:18	17,5	18,3	17,4	17,9	18,1	18,4	18,3	18,4	21,7	21,4	21,5	21,7	21,7	21,6	20,6
04/13/2007	1:00:18	16,9	17,9	16,9	17,5	17,6	17,9	17,9	18,0	21,5	20,9	21,1	21,3	21,3	21,1	19,7
04/14/2007	2:00:18	16,2	17,4	16,3	16,9	17,0	17,4	17,3	17,3	21,1	20,6	20,9	21,0	21,1	20,9	20,1
04/14/2007	3:00:18	15,5	16,8	15,5	16,3	16,4	16,8	16,7	16,7	20,9	20,0	20,4	20,6	20,6	20,4	19,2
04/14/2007	4:00:18	15,4	16,6	15,4	16,3	16,3	16,8	16,6	16,7	20,5	19,4	20,0	20,1	20,2	20,0	18,5
04/14/2007	5:00:18	15,5	16,5	15,5	16,2	16,3	16,8	16,6	16,8	20,2	19,2	19,8	19,9	19,9	19,7	18,4
04/14/2007	6:00:18	15,7	16,7	15,7	16,4	16,5	16,9	16,7	16,6	20,0	19,0	19,6	19,7	19,7	19,5	18,5
04/14/2007	7:00:18	15,6	16,6	15,7	16,2	16,2	16,6	16,5	16,6	19,7	18,8	19,5	19,5	19,5	19,3	18,6
04/14/2007	8:00:18	19,2	18,8	19,4	18,7	18,7	18,8	18,8	19,2	19,6	18,8	19,4	19,3	19,3	19,2	19,0
04/14/2007	9:00:18	21,6	20,6	22,0	20,2	20,2	20,2	20,2	21,3	19,7	19,4	19,6	19,6	19,4	19,4	20,0
04/14/2007	10:00:18	23,4	21,5	23,2	21,2	21,1	21,1	21,1	23,5	19,8	20,0	19,7	19,8	19,5	19,6	20,6
04/14/2007	11:00:18	24,8	22,5	24,5	22,3	22,1	22,0	22,0	24,5	20,1	21,5	20,1	20,4	19,9	20,1	22,4
04/14/2007	12:00:18	27,5	23,6	26,3	23,6	23,5	23,2	23,3	28,1	20,5	21,9	20,6	20,8	20,3	20,5	22,1
04/14/2007	13:00:18	32,8	26,5	30,0	26,6	26,2	25,8	26,1	34,7	20,9	22,5	20,9	21,3	20,7	21,0	23,2
04/14/2007	14:00:18	34,9	27,1	31,2	27,4	26,9	26,2	26,9	40,3	21,3	23,5	21,4	21,9	21,3	21,5	23,9
04/14/2007	15:00:18	36,3	27,1	31,3	27,9	26,8	27,4	28,1	42,1	21,6	23,8	21,6	22,2	21,6	21,8	23,6
04/14/2007	16:00:18	35,5	26,1	31,6	27,3	27,6	26,9	27,4	36,9	22,1	24,6	22,3	22,8	22,2	22,4	24,6
04/14/2007	17:00:18	34,6	26,8	30,1	25,5	26,3	25,6	25,5	35,4	22,5	24,7	22,6	23,0	22,5	22,7	24,5

FONTE: DO AUTOR, 2007.

#### 4.1.2 Medições da velocidade do vento

Os resultados da velocidade do vento estão tratados matematicamente e listados no Apêndice B. Para análise e discussão, optou-se por consolidá-los no QUADRO 4.2, a seguir:

QUADRO 4.2

Medição da velocidade do ar – externo

<b>MEDIÇÃO VELOCIDADE DO AR - EXTERNO</b>			
<b>DIA</b>	<b>Nº MEDIÇÃO</b>	<b>HORA</b>	<b>VELOCIDADE MEDIA (m/s)</b>
13.04.2007	1	17:00:00	0,336
	2	18:00:00	0,242
	3	19:00:00	0,288
	4	20:00:00	0,202
	5	21:00:00	0,188
	6	22:00:00	0,190
	7	23:00:00	0,104
14.04.2007	8	00:00:00	0,116
	9	01:00:00	0,230
	10	02:00:00	0,172
	11	03:00:00	0,158
	12	04:00:00	0,174
	13	05:00:00	0,118
	14	06:00:00	0,158
	15	07:00:00	0,104
	16	08:00:00	0,094
	17	09:00:00	0,036
	18	10:00:00	0,234
	19	11:00:00	0,358
	20	12:00:00	0,088
	21	13:00:00	0,418
	22	14:00:00	0,454
	23	15:00:00	0,46
	24	16:00:00	0,218
	25	17:00:00	0,132

FONTE: DO AUTOR, 2007.

#### 4.1.3 Medições dos Piranômetros

Os resultados das medidas, em  $W/m^2$ , dos piranômetros, P1, P2 e P3, estão listados no QUADRO 4.3, a seguir:

QUADRO 4.3

Dados dos piranômetros ( $W/m^2$ )

Data	Hora corrigida	P1	P2	P3
04/13/2007	17:00:16	4,3	3,3	2,6
04/13/2007	18:00:16	0,3	0,3	0,3
04/13/2007	19:00:16	0,3	0,3	0,3
04/13/2007	20:00:16	0,3	0,3	0,3
04/13/2007	21:00:16	0,3	0,3	0,3
04/13/2007	22:00:16	0,3	0,3	0,3
04/13/2007	23:00:16	0,3	0,3	0,3
04/14/2007	0:00:16	0,3	0,3	0,3
04/14/2007	1:00:16	0,3	0,3	0,3
04/14/2007	2:00:16	0,3	0,3	0,3
04/14/2007	3:00:16	0,3	0,3	0,3
04/14/2007	4:00:16	0,3	0,3	0,3
04/14/2007	5:00:16	0,3	0,3	0,3
04/14/2007	6:00:16	1,2	1,2	1,3
04/14/2007	7:00:16	19,9	24,7	20,8
04/14/2007	8:00:16	75,8	82,5	212,8
04/14/2007	9:00:16	58,1	63,6	116,3
04/14/2007	10:00:16	153,0	96,1	146,6
04/14/2007	11:00:16	135,0	105,8	131,6
04/14/2007	12:00:16	346,4	150,2	119,9
04/14/2007	13:00:16	750,3	229,9	201,7
04/14/2007	14:00:16	875,5	217,7	146,7
04/14/2007	15:00:16	888,0	254,6	191,9
04/14/2007	16:00:16	826,4	267,6	101,1
04/14/2007	17:00:16	39,8	51,8	42,9

FONTE: DO AUTOR, 2007.

4.1.4 Medições da temperatura ambiente e umidade relativa do ar - HOBOS

Os resultados da temperatura ambiente e umidade relativa do ar estão consolidá-los no QUADRO 4.4, a seguir:

## QUADRO 4.4

Tratamento das medidas de temperatura e umidade relativa do ar

TRATAMENTO DAS MEDIDAS DE TEMPERATURA AMBIENTE E UMIDADE RELATIVA DO AR										
HORÁRIO		EXTERNO 1		EXTERNO 2		INTERNO 1		INTERNO 2		
		Média da temp.	Média da U.R.							
		°C	%	°C	%	°C	%	°C	%	
13/04/07 5h3min2s	17:00	22,9	73,46	22,6	75,73	24,7	67,87	23,3	72,20	
13/04/07 6h3min2s	18:00	21,4	80,04	21,1	82,43	23,9	72,13	22,9	75,68	
13/04/07 7h3min2s	19:00	20,6	82,39	20,3	84,40	23,5	73,27	22,8	75,52	
13/04/07 8h3min2s	20:00	20,2	83,59	19,8	85,76	23,1	73,97	22,6	75,81	
13/04/07 9h3min2s	21:00	19,5	84,61	19,2	86,65	22,7	74,02	22,2	75,55	
13/04/07 10h3min2s	22:00	18,6	85,67	18,3	87,59	22,3	73,59	21,9	74,84	
13/04/07 11h3min2s	23:00	18,0	85,57	17,7	87,65	21,9	72,96	21,5	73,78	
14/04/07 12h3min2s	00:00	17,5	86,42	17,2	88,12	21,5	72,81	21,1	73,72	
14/04/07 1h3min2s	01:00	17,0	86,49	16,6	88,54	21,1	72,64	20,7	73,56	
14/04/07 2h3min2s	02:00	16,5	86,41	16,1	88,56	20,7	72,27	20,4	73,02	
14/04/07 3h3min2s	03:00	15,8	86,95	15,7	88,31	20,3	71,71	20,0	72,28	
14/04/07 4h3min2s	04:00	15,7	87,01	15,5	88,58	20,0	71,92	19,7	72,46	
14/04/07 5h3min2s	05:00	15,7	87,40	15,6	88,78	19,7	72,61	19,4	73,45	
14/04/07 6h3min2s	06:00	15,8	87,48	15,6	89,00	19,5	73,35	19,3	74,06	
14/04/07 7h3min2s	07:00	17,3	86,23	16,8	88,77	19,5	75,25	19,1	76,54	
14/04/07 8h3min2s	08:00	19,9	82,37	19,4	85,38	20,0	78,83	19,7	79,75	
14/04/07 9h3min2s	09:00	22,0	71,42	21,5	73,87	20,9	76,04	20,3	77,59	
14/04/07 10h3min2s	10:00	22,9	66,65	22,5	68,66	21,7	71,83	21,0	74,49	
14/04/07 11h3min2s	11:00	24,4	61,44	23,5	64,94	22,8	69,13	22,4	70,03	
14/04/07 12h3min2s	12:00	26,9	54,66	25,4	59,26	23,7	65,57	22,7	69,09	
14/04/07 1h3min2s	13:00	28,3	50,02	26,7	53,23	24,8	60,99	23,4	66,06	
14/04/07 2h3min2s	14:00	28,0	49,71	27,0	52,28	25,5	58,96	23,8	64,92	
14/04/07 3h3min2s	15:00	27,5	51,07	27,7	50,28	25,9	58,12	24,2	63,71	
14/04/07 4h3min2s	16:00	25,6	55,88	26,3	53,63	26,0	57,88	24,5	62,92	
14/04/07 5h3min2s	17:00	24,6	58,51	25,0	57,14	25,9	57,94	24,5	62,74	

FONTE: DO AUTOR, 2007.

## 4.1.5 Resultados da termografia

Os resultados qualitativos da termografia no período de observação (24 horas) estão apresentados nos termogramas no Apêndice A, em um intervalo de 01 hora (iniciando as 17:00hs do dia 13/04/2007, com termino 17:00hs do dia 14/04/2007). No presente capítulo optou-se por apresentar apenas um extrato dos resultados qualitativos e quantitativos.

4.1.5.1 Resultados Qualitativos

Os termogramas disponibilizam informações sobre a temperatura nos pontos selecionados e apresentam a imagem visual da distribuição das isotermas da alvenaria.

Pode-se obter uma leitura da distribuição comparando as cores da alvenaria com as cores da escala térmica do termograma, QUADRO 0.5.

QUADRO 4.5  
Termogramas – Alvenaria frontal externa e interna

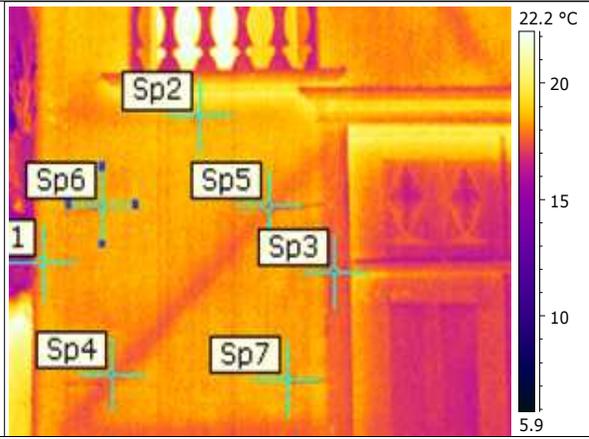
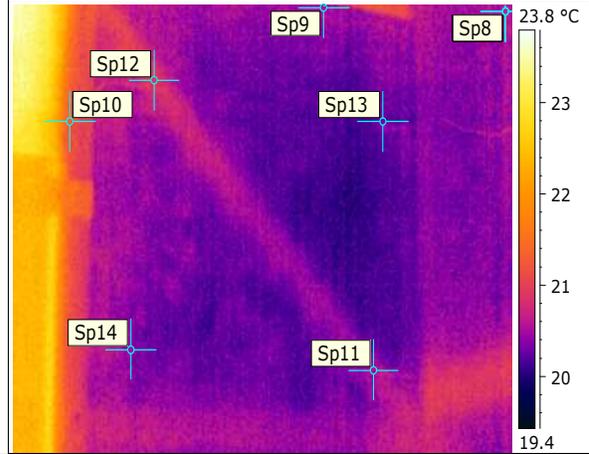
Dia	Posição	Termograma
13/04/2007	Interno	
13/04/2007	Externo	

FONTE: DO AUTOR, 2007.

4.1.5.2 Resultados Quantitativos

Para os resultados quantitativos dos termogramas, QUADRO 4.6, optou-se por avaliar os valores adjacentes aos termopares nas superfícies externa e interna da alvenaria.

QUADRO 4.6  
Resultados qualitativos – Termogramas da alvenaria frontal externa e interna.

Dia	Posição	Termograma
13/04/2007	Externo	
	Interno	

FONTE: DO AUTOR, 2007.

## 5. DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos com a termografia se baseiam na distribuição de temperaturas superficiais da alvenaria, analisada e visualizada pela medição da distribuição espacial da radiação térmica emitida pela sua superfície.

Esta distribuição é interpretada numericamente pela câmera que decodifica a radiação em forma de cor, ou seja, cada cor (e seus matizes) é interpretada como um sinal térmico de uma região isotérmica.

A análise qualitativa dos termogramas, baseada na imagem colorida observada, conduz a um diagnóstico, que possibilita observar e concluir a presença de materiais diversificados na estrutura da alvenaria de adobe e madeira.

No problema enfocado, que é a análise da conservação de bens patrimoniados (Capela de São Sebastião de Águas Claras), a termografia, sendo um método de análise não destrutivo, possibilitou um diagnóstico da presença dos materiais empregados na alvenaria. Este diagnóstico proporcionou conclusões que possibilitam a análise da composição dos materiais presentes e sua disposição no interior da alvenaria.

### 5.1 Análise dos resultados das técnicas com contato direto (termopares) e sem contato direto (termografia)

No confronto dos resultados da termografia e dos termopares, TABELA 5.1 e TABELA 5.2, pode-se perfeitamente constatar que as diferenças entre os valores do *desvio padrão* das duas técnicas estão sempre abaixo de 1,0, na análise das superfícies como um todo, no período de observação.

Na análise das medias das temperaturas das superfícies interna e externa pode-se observar uma pequena variação entre os resultados da termografia e dos termopares, GRÁFICO 5.1 e 5.2.

TABELA 5.1

Valores das diferenças de temperatura – superfície interna

Superfície Interna - TEMPERATURA (K)													
DIA	HORA	TÉCNICA	PONTOS						desvio padrão			energia	resolução
			8	9	10	11	12	13	14	1	2		
13/4/2007	17:00:00	TERMOGRAFIA	296,6	297,0	296,0	296,6	295,9	296,1	0,5	0,5	0,0	resfriamento	baixa
		TERMOPARES	295,4	297,2	295,5	295,9	295,4	295,7					
		diferenças 1 (termografia e termopar)	1,2	-0,2	0,5	0,7	0,5	0,4					
		dados do software	295,4	297,2	295,5	295,9	295,4	295,7					
		diferenças 2 (termografia e software)	1,2	-0,2	0,5	0,7	0,5	0,4					
		diferenças 3 (termopares e software)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
	20:00:00	TERMOGRAFIA	295,8	296,1	295,2	295,5	295,6	295,2	0,3	0,3	0,2		
		TERMOPARES	295,3	295,9	295,3	295,6	295,5	295,5					
		diferenças 1 (termografia e termopar)	0,5	0,2	-0,1	-0,1	0,1	-0,3					
		dados do software	296,0	296,1	296,0	296,0	295,9	295,8					
		diferenças 2 (termografia e software)	-0,2	0,0	-0,8	-0,5	-0,3	-0,6					
		diferenças 3 (termopares e software)	-0,7	-0,2	-0,7	-0,4	-0,4	-0,3					
23:00:00	TERMOGRAFIA	295,3	295,8	295,1	295,5	295,2	295,3	0,3	0,4	0,1			
	TERMOPARES	295,1	295,0	295,1	295,2	295,2	295,1						
	diferenças 1 (termografia e termopar)	0,2	0,8	0,0	0,3	0,0	0,2						
	dados do software	295,1	294,7	295,1	295,1	294,9	294,9						
	diferenças 2 (termografia e software)	0,2	1,1	0,0	0,4	0,3	0,4						
	diferenças 3 (termopares e software)	0,0	0,3	0,0	0,1	0,3	0,2						
02:00:00	TERMOGRAFIA	294,3	294,3	294,3	294,3	294,4	294,0	0,2	0,2	0,2			
	TERMOPARES	294,3	293,8	294,1	294,2	294,3	294,0						
	diferenças 1 (termografia e termopar)	0,0	0,5	0,2	0,1	0,1	0,0						
	dados do software	293,9	293,4	293,9	293,9	293,6	293,6						
	diferenças 2 (termografia e software)	0,4	0,9	0,4	0,4	0,8	0,4						
	diferenças 3 (termopares e software)	0,4	0,4	0,2	0,3	0,7	0,4						
06:00:00	TERMOGRAFIA	292,7	292,3	292,0	292,2	292,1	292,0	0,3	0,3	0,3			
	TERMOPARES	293,2	292,2	292,8	292,9	292,9	292,7						
	diferenças 1 (termografia e termopar)	-0,5	0,1	-0,8	-0,7	-0,8	-0,7						
	dados do software	293,0	292,6	292,9	293,0	292,5	292,5						
	diferenças 2 (termografia e software)	-0,3	-0,3	-0,9	-0,8	-0,4	-0,5						
	diferenças 3 (termopares e software)	0,2	-0,4	-0,1	-0,1	0,4	0,2						
09:00:00	TERMOGRAFIA	293,0	292,9	292,9	292,8	292,7	292,6	0,1	0,1	0,2			
	TERMOPARES	292,9	292,6	292,8	292,8	292,6	292,6						
	diferenças 1 (termografia e termopar)	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,0						
	dados do software	292,8	293,0	292,6	292,6	292,4	292,4						
	diferenças 2 (termografia e software)	0,2	-0,1	0,3	0,2	0,3	0,2						
	diferenças 3 (termopares e software)	0,1	-0,4	0,2	0,2	0,2	0,2						
12:00:00	TERMOGRAFIA	293,7	294,6	293,6	294,1	293,5	293,7	0,2	0,3	0,4			
	TERMOPARES	293,7	295,1	293,8	294,0	293,5	293,7						
	diferenças 1 (termografia e termopar)	0,0	-0,5	-0,2	0,1	0,0	0,0						
	dados do software	294,6	295,1	294,5	294,4	294,6	294,6						
	diferenças 2 (termografia e software)	-0,9	-0,5	-0,9	-0,3	-1,1	-0,9						
	diferenças 3 (termopares e software)	-0,9	0,0	-0,7	-0,4	-1,1	-0,9						
16:00:00	TERMOGRAFIA	296,6	296,9	295,3	296,0	295,4	295,8	0,7	0,5	0,6			
	TERMOPARES	295,3	297,8	295,5	296,0	295,4	295,6						
	diferenças 1 (termografia e termopar)	1,3	-0,9	-0,2	0,0	0,0	0,2						
	dados do software	296,5	297,4	296,3	296,4	296,6	296,5						
	diferenças 2 (termografia e software)	0,1	-0,5	-1,0	-0,4	-1,2	-0,7						
	diferenças 3 (termopares e software)	-1,2	0,4	-0,8	-0,4	-1,2	-0,9						
17:00:00	TERMOGRAFIA	296,2	297,8	296,5	296,6	296,6	296,3	0,3	0,3	0,5			
	TERMOPARES	295,7	297,9	295,8	296,2	295,7	295,9						
	diferenças 1 (termografia e termopar)	0,5	-0,1	0,7	0,4	0,9	0,4						
	dados do software	296,7	297,6	296,6	296,6	296,8	296,7						
	diferenças 2 (termografia e software)	-0,5	0,2	-0,1	0,0	-0,2	-0,4						
	diferenças 3 (termopares e software)	-1,0	0,3	-0,8	-0,4	-1,1	-0,8						

FONTE: DO AUTOR, 2007.

TABELA 5.2

Valores das diferenças de temperatura – superfície externa

Superfície Externa - TEMPERATURA (K)										Valores medios					
DIA	HORA	TÉCNICA	PONTOS							desvio padrão			energia	resolução	K
			1	2	3	4	5	6	7	1	2	3			
13/04/2007	17:00:00	TERMOGRAFIA	300,6	297,7	298,5	296,5	297,0	297,0	296,5	0,3	0,3	0,0	restrição	boa	297,2
		TERMOPARES	300,7	297,4	298,6	297,1	297,1	296,8	296,9						297,3
		diferenças 1 (termografia e termopar)	-0,1	0,3	-0,1	-0,6	-0,1	0,2	-0,4						
		dados do software	300,7	297,4	298,6	297,1	297,1	296,8	296,9						297,3
		diferenças 2 (termografia e software)	-0,1	0,3	-0,1	-0,6	-0,1	0,2	-0,4						
		diferenças 3 (termopares e software)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0						
	20:00:00	TERMOGRAFIA	295,2	295,6	294,1	293,6	294,1	294,4	294,0	0,6	0,7	0,2			294,3
		TERMOPARES	294,8	294,4	294,3	294,2	294,3	294,3	294,4						294,3
		diferenças 1 (termografia e termopar)	0,4	1,2	-0,2	-0,6	-0,2	0,1	-0,4						
		dados do software	294,5	294,3	294,3	294,4	294,3	294,6	294,5						294,4
		diferenças 2 (termografia e software)	0,7	1,3	-0,2	-0,8	-0,2	-0,2	-0,5						
		diferenças 3 (termopares e software)	0,3	0,1	0,0	-0,2	0,0	-0,3	-0,1						
23:00:00	TERMOGRAFIA	291,5	291,6	291,1	290,9	291,2	291,5	291,7	0,3	0,4	0,3	291,3			
	TERMOPARES	291,3	292,0	291,1	291,6	291,7	292,0	292,0				291,7			
	diferenças 1 (termografia e termopar)	0,2	-0,4	0,0	-0,7	-0,5	-0,5	-0,3							
	dados do software	291,4	291,5	291,3	291,6	291,5	292,3	292,2				291,7			
	diferenças 2 (termografia e software)	0,1	0,1	-0,2	-0,7	-0,3	-0,8	-0,5							
	diferenças 3 (termopares e software)	-0,1	0,5	-0,2	0,0	0,2	-0,3	-0,2							
02:00:00	TERMOGRAFIA	290,2	290,4	289,6	289,8	290,0	290,6	290,6	0,4	0,3	0,3	290,1			
	TERMOPARES	289,4	290,6	289,5	290,1	290,2	290,6	290,5				290,2			
	diferenças 1 (termografia e termopar)	0,8	-0,2	0,1	-0,3	-0,2	0,0	0,1							
	dados do software	290,0	290,2	289,9	290,3	290,2	290,9	290,9				290,4			
	diferenças 2 (termografia e software)	0,2	0,2	-0,3	-0,5	-0,2	-0,3	-0,3							
	diferenças 3 (termopares e software)	-0,6	0,4	-0,4	-0,2	0,0	-0,3	-0,4							
06:00:00	TERMOGRAFIA	288,6	289,3	288,3	288,8	288,8	289,4	289,3	0,2	0,2	0,3	288,9			
	TERMOPARES	288,9	289,9	288,9	289,6	289,6	290,0	289,8				289,6			
	diferenças 1 (termografia e termopar)	-0,3	-0,6	-0,6	-0,8	-0,8	-0,6	-0,5							
	dados do software	289,1	289,4	289,1	289,4	289,3	289,9	289,9				289,5			
	diferenças 2 (termografia e software)	-0,5	-0,1	-0,8	-0,6	-0,5	-0,5	-0,6							
	diferenças 3 (termopares e software)	-0,2	0,5	-0,2	0,2	0,3	0,1	-0,1							
14/04/2007	09:00:00	TERMOGRAFIA	295,0	293,6	294,9	292,4	292,5	292,4	292,5	0,5	1,1	0,6	aquecimento	baixa	293,0
		TERMOPARES	294,8	293,8	295,1	293,4	293,3	293,4	293,3						293,7
		diferenças 1 (termografia e termopar)	0,2	-0,2	-0,2	-1,0	-0,8	-1,0	-0,8						
		dados do software	293,9	293,6	294,0	293,6	293,6	293,7	293,8						293,7
		diferenças 2 (termografia e software)	1,1	0,0	0,9	-1,2	-1,1	-1,3	-1,3						
		diferenças 3 (termopares e software)	0,9	0,2	1,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,5						
	12:00:00	TERMOGRAFIA	300,2	296,2	299,1	295,6	295,7	294,8	295,4	0,5	2,1	1,7			296,1
		TERMOPARES	300,6	296,8	299,5	296,8	296,7	296,4	296,5						297,1
		diferenças 1 (termografia e termopar)	-0,4	-0,6	-0,4	-1,2	-1,0	-1,6	-1,1						
		dados do software	297,2	297,1	297,0	297,0	297,2	297,1	297,0						297,0
		diferenças 2 (termografia e software)	3,0	-0,9	2,1	-1,4	-1,5	-2,3	-1,6						
		diferenças 3 (termopares e software)	3,4	-0,3	2,5	-0,2	-0,5	-0,7	-0,5						
15:00:00	TERMOGRAFIA	309,7	300,2	304,1	299,6	299,5	299,8	300,2	0,6	3,4	3,0	300,5			
	TERMOPARES	309,4	300,3	304,4	301,0	300,0	300,6	301,3				301,2			
	diferenças 1 (termografia e termopar)	0,3	-0,1	-0,3	-1,4	-0,5	-0,8	-1,1							
	dados do software	303,0	301,8	302,4	301,7	301,7	302,0	302,0				301,9			
	diferenças 2 (termografia e software)	6,7	-1,6	1,7	-2,1	-2,2	-2,2	-1,8							
	diferenças 3 (termopares e software)	6,4	-1,5	2,0	-0,7	-1,7	-1,4	-0,7							
17:00:00	TERMOGRAFIA	307,5	299,6	303,9	298,0	298,4	297,6	297,8	0,6	3,4	3,0	299,2			
	TERMOPARES	307,8	299,9	303,3	298,7	299,5	298,8	298,6				299,8			
	diferenças 1 (termografia e termopar)	-0,3	-0,3	0,6	-0,7	-1,1	-1,2	-0,8							
	dados do software	302,0	300,9	301,4	300,8	300,8	301,0	300,9				300,9			
	diferenças 2 (termografia e software)	5,5	-1,3	2,5	-2,8	-2,4	-3,4	-3,1							
	diferenças 3 (termopares e software)	5,8	-1,0	1,9	-2,1	-1,3	-2,2	-2,3							

FONTE: DO AUTOR, 2007.

É importante também observar que os valores iguais ou próximos das temperaturas nos pontos (termopares e termogramas) indicam uma forte tendência de assertividade na interpretação *qualitativa* da termografia.

## **5.2 Análise dos resultados de termografia – condições ambientais**

Nos resultados termográficos podem-se observar importantes diferenciações na resolução visual dos termogramas.

A primeira quando se relaciona a *umidade relativa do ar* e a resposta visual, a *segunda* ao comparar a *resposta visual* e o *tipo de energia atuante*.

Constatou-se que as respostas térmicas das superfícies variam segundo a alteração das condições ambientais, ou seja, o resfriamento e o aquecimento da superfície e a variação da umidade relativa do ar.

A superfície externa exposta à excitação térmica (radiação solar) apresenta resolução visual melhor no período de resfriamento, enquanto a superfície interna não exposta diretamente a excitação térmica (radiação solar) apresenta resolução visual melhor exatamente no período de aquecimento.

Ao analisarmos as linhas do tempo é possível constatar que a opção da técnica de termografia passiva obtém ótimos resultados, embora em alguns intervalos de tempo a resposta da resolução visual não apresenta resultados esperados.

Portanto para pesquisa em construções com valores históricos deve-se primeiro esgotar todas as possibilidades na utilização da técnica passiva, antes da utilização da técnica ativa – adição externa de energia.

Neste trabalho a técnica termográfica passiva apresentou-se como uma solução após um período de observação maior (ciclo completo de aquecimento e resfriamento), assim deve-se optar preliminarmente por um estudo e planejamento do ensaio, quando se tratar de uma Edificação do Patrimônio Histórico.

É bastante evidenciado nas duas linhas de tempo que a melhor resolução ocorre, na

superfície interna quando os valores da temperatura do ambiente aumentam e caem os valores da umidade relativa do ar, já na superfície externa a melhor resolução ocorre quando os valores da temperatura do ambiente diminuem e a umidade relativa do ar permanece constante em torno de 80%.

### 5.2.1 Superfície interna

Na superfície interna durante o período de resfriamento, 17hs:00min. e 09hs:00min., tem baixa resolução térmica, ocasionando uma imagem térmica homogênea da superfície, não sendo possível identificar a presença da estrutura de madeira ou alterações na alvenaria.

Portanto a resolução visual entre o período de 17hs:00min. e 09hs:00min., não apresenta uma resolução visual muito baixa.

Durante o período de aquecimento, 10hs:00min. e 16hs:00min., a resolução térmica aumenta, possibilitando assim a percepção da estrutura de madeira abaixo do revestimento de adobe da alvenaria.

A FIGURA 5.1 relaciona os resultados da termografia com as alterações ambientais durante o período de observação.

Assim a melhor resolução visual ocorreu entre as 10hs:00min. e 16hs:00min.

Há uma *melhoria* significativa na qualidade da *resolução da imagem* na medida em que *decrecem os valores de umidade relativa do ar e aumenta os valores da temperatura ambiente.*

Não se pode afirmar qual dos fatores mencionados, diminuição da umidade relativa do ar ou o aumento da temperatura ambiente, são responsáveis pela melhoria da resolução visual ou mesmo se ambos os fatores atuam simultaneamente na melhoria dos resultados.

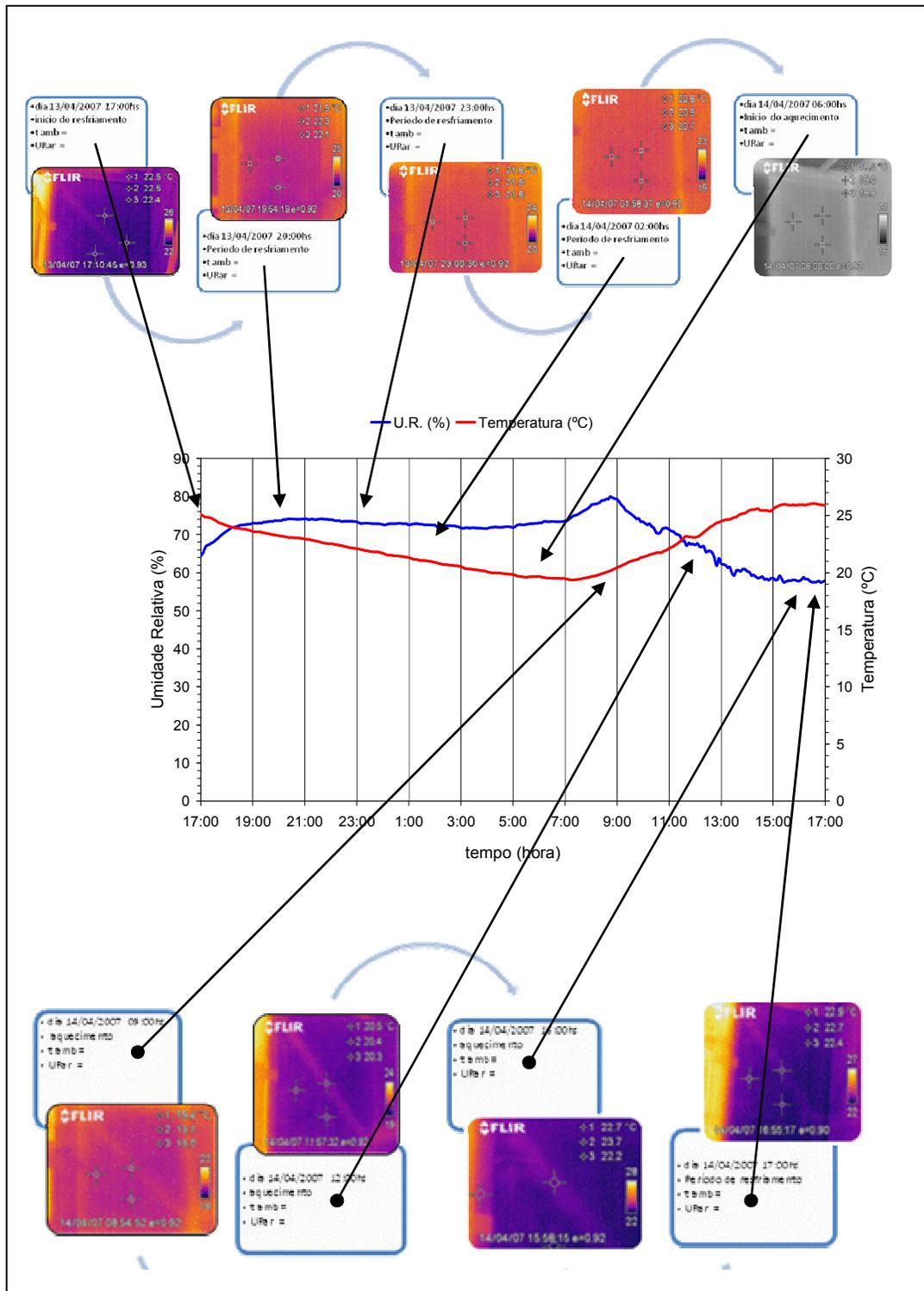


FIGURA 5.1 – Os Termogramas internos e condições climáticas no período de observação.

FONTE: DO AUTOR, 2007.

### 5.2.2 Superfície externa

Na superfície externa ocorre o fenômeno contrário, durante o período de resfriamento tem alta resolução visual térmica, ocasionando uma imagem térmica diferenciada da superfície, sendo possível identificar a presença da estrutura de madeira.

Durante o período de aquecimento a resolução visual térmica diminui, impossibilitando assim a percepção da estrutura de madeira abaixo do revestimento de adobe da alvenara. A FIGURA 5.2, relaciona os resultados da termografia com as alterações ambientais durante o período de observação.

A melhor resolução ocorreu entre 00hs:00min. e 06hs:00min.

É nítida a contribuição e influencia da umidade relativa do ar na resolução da imagem, na FIGURA 5.2 observa-se a relação direta: umidade relativa do ar alta apresenta uma resolução melhor, na medida em que ocorre uma redução nos valores de umidade relativa a qualidade da resolução decresce simultaneamente.

Há uma *melhoria* significativa na qualidade da *resolução da imagem* na medida em que *aumenta os valores de umidade relativa do ar e decrescem os valores da temperatura ambiente.*

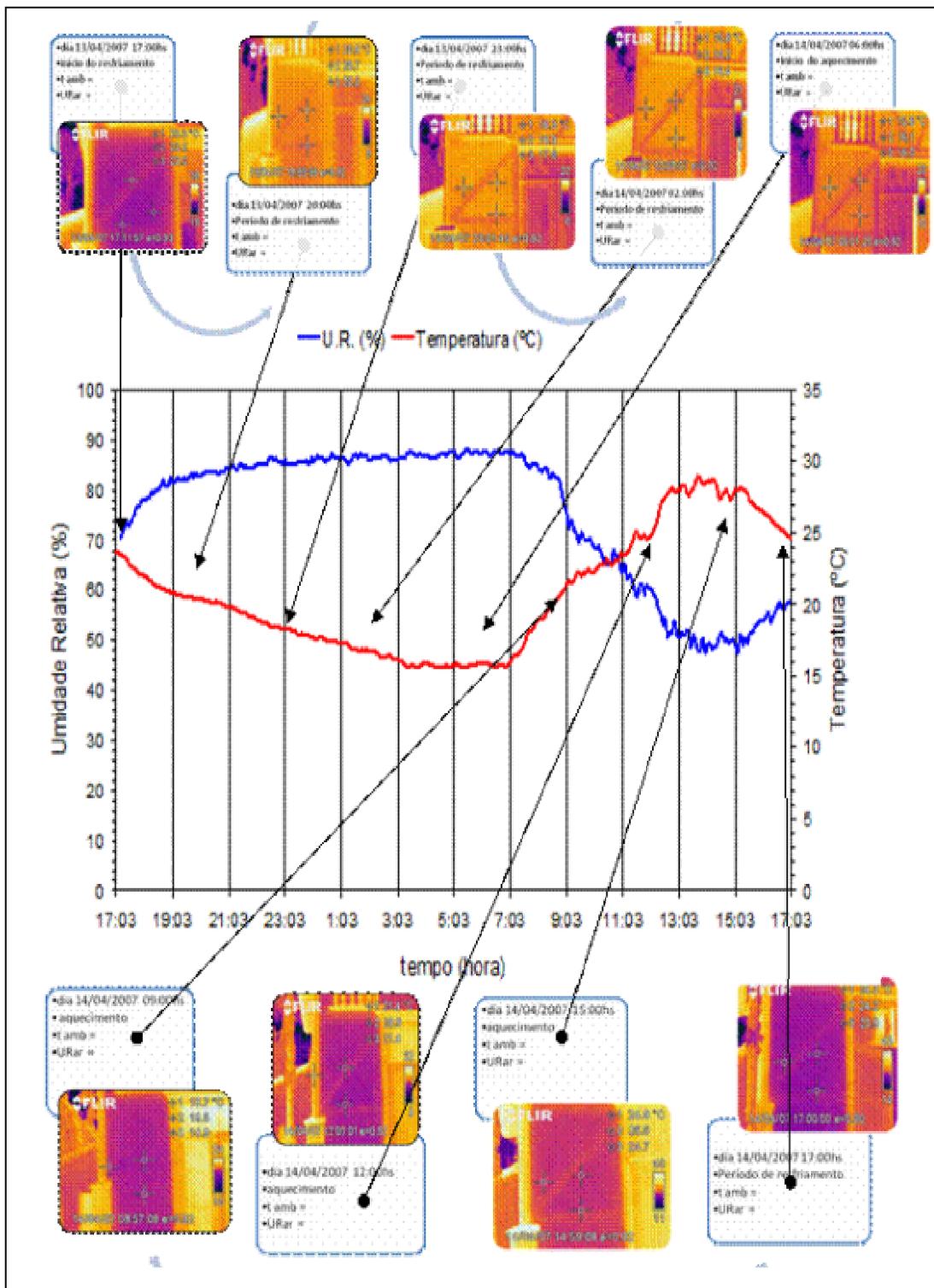


FIGURA 5.2 – Os Termogramas externos e condições climáticas no período de observação.

FONTE: DO AUTOR, 2007.

### 5.3 Análise dos resultados - resposta térmica dos materiais da alvenaria

O objeto de estudo é uma alvenaria de adobe revestido com argamassa de adobe, sem o prévio conhecimento da estrutura existente esperava-se uma resposta térmica uniforme do adobe, mas o resultado obtido foi: para o adobe uma temperatura uniforme no intervalo de 291,15 K a 292,15 K (18 °C a 19 °C), enquanto a madeira na diagonal e a peça montante da esquadria frontal apresenta um intervalo de 290,45 K a 290,65 K (17,3 °C a 17,5 °C).

Somente as peças de madeira próximas a corpos mais aquecidos (alvenaria oeste e piso superior do coro) apresentam variações similares a variação do adobe, FIGURA 5.3.

No gráfico da FIGURA 5.3, na linha Li1 (horizontal) é possível identificar a uniformidade da temperatura do adobe, ao cortar a região próxima da madeira, a temperatura do adobe apresenta uma queda de aproximadamente 273,15 K (1 °C).

Na linha Li2 (vertical) também é possível verificar o mesmo comportamento: quando a mesma corta a madeira, apresenta uma redução de temperatura próxima de 273,15 K .

Na análise individual dos materiais observa-se na FIGURA 5.4 o comportamento homogêneo. A linha Li1, na superfície da madeira, apresenta um intervalo de temperatura médio de 290 K ou 17°C, enquanto e Li2, na superfície do adobe, apresenta um intervalo de temperatura médio de 291 K ou 18°C .

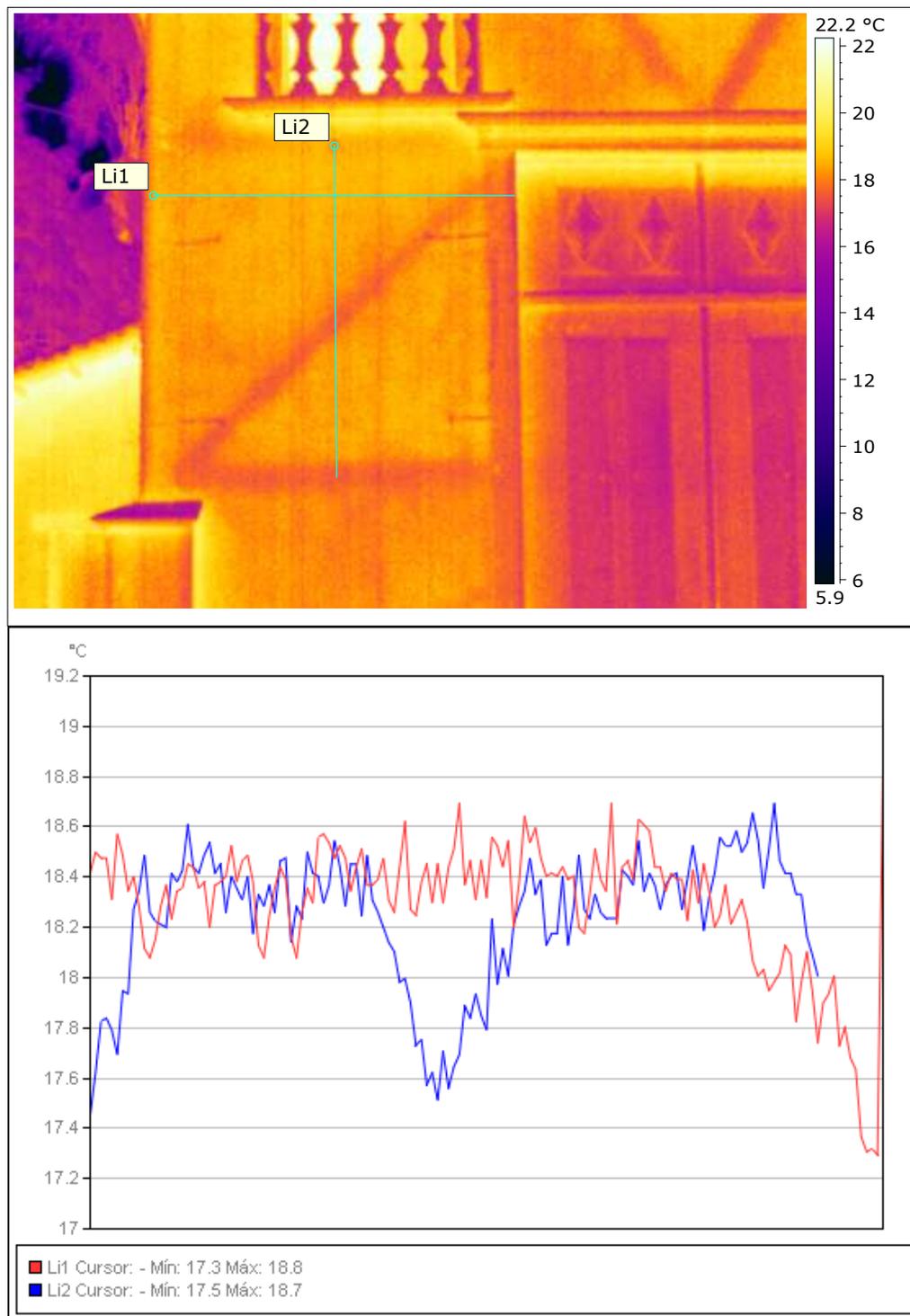


FIGURA 5.3 – O Termograma e os gráficos das temperaturas nas linhas.

FONTE: DO AUTOR, 2007.



FIGURA 5.4 – O Termograma e os gráficos das temperaturas nos materiais.

FONTE: DO AUTOR, 2007.

#### 5.4 Validação dos resultados da pesquisa

Resultados mais criteriosos e confiáveis da termografia de um bem imóvel patrimoniado poderiam ser obtidos ao se complementar o usual diagnóstico, baseado na observação qualitativa da imagem infravermelha, com uma análise quantitativa dos resultados observados através desta técnica. Para isto torna-se necessário uma validação dos resultados. Para a validação optou-se por duas técnicas: a primeira qualitativa por meio da documentação fotográfica histórica (parte documental integrante do processo de tombamento histórico), e a segunda quantitativa, por meio de um modelamento matemático do fenômeno em estudo.

##### 5.4.1 Validação qualitativa dos resultados da termografia

Na documentação para tombamento histórico constante no processo promovido pela Cúria Metropolitana de Belo Horizonte, foram identificadas as seguintes intervenções, QUADRO 5.1, (MENEZES, 1986 e QUEIROZ, 2003):

QUADRO 5.1

Intervenções na Capela de São Sebastião

Período	Intervenções Principais
1801	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reformas executadas (não há descrição)</li> </ul>
Século XX	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Retirada do cemitério, do piso e forro originais, a sacristia foi modificada e o anexo foi construído.</li> </ul>
1984-1986	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Intervenção em toda estrutura autônoma de madeira,</li> <li>▪ Reconstituição da alvenaria de adobe;</li> <li>▪ Revestimento de todas as alvenarias com argamassa;</li> <li>▪ Pintura de toda a argamassa com tinta látex branca;</li> </ul>
2000-2002	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Substituição de áreas de reboco em desagregação;</li> <li>▪ A alvenaria interior teve a pintura renovada;</li> <li>▪ Fachadas externas receberam novo reboco e pintura;.</li> </ul>

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Por meio da documentação fotográfica é possível identificar a estrutura autônoma da capela composta de madeira e alvenaria de adobe, FIGURAS 5.5.



FIGURA 5.5 – Fotos da restauração da Capela

FONTE: MENEZES, 1986

Ao confrontarmos os resultados da termografia com as fotos documentais, é possível, por um processo de comparação visual, identificar as similaridades entre os mesmos, QUADRO 5.2, a seguir:

#### QUADRO 5.2

Validação Qualitativa – por processo comparativo

VALIDAÇÃO DOS DADOS - PROCESSO QUALITATIVO		
VISÍVEL		VISUALIZAÇÃO
FOTO	FOTO	TERMOGRAMA
1986	2007	2007
		

FIGURA 5.6 – Fotografia da Restauração.

FONTE: MENEZES, 1986.

FIGURA 5.7 – Fotografia da fachada

FONTE: DO AUTOR, 2007.

FIGURA 5.8 – Termograma da fachada.

FONTE: DO AUTOR, 2007

Assim ao confrontarmos as imagens (Figuras 5.6, Figura 5.7 e figura 5.8) de ondas visíveis e infravermelhas é possível identificar a presença de elementos ocultos na alvenaria. No termograma, FIGURA 5.9, a estrutura de madeira apresenta uma cor violeta claro, enquanto o adobe apresenta uma cor amarelo. Mas, em particular para o alvo em estudo, a pesquisa bibliográfica proporcionou o testemunho real dos elementos, por meio das imagens reais das intervenções executadas anteriormente.

As fotos da reforma física apresentam os elementos ocultos na alvenaria, observados nos termogramas da termografia digital, ou seja, a diferença de temperatura ocorre exatamente onde às fotos históricas indicam os materiais distintos utilizados na construção. Portanto, a termografia apresenta um forte indicativo da composição real da alvenaria.

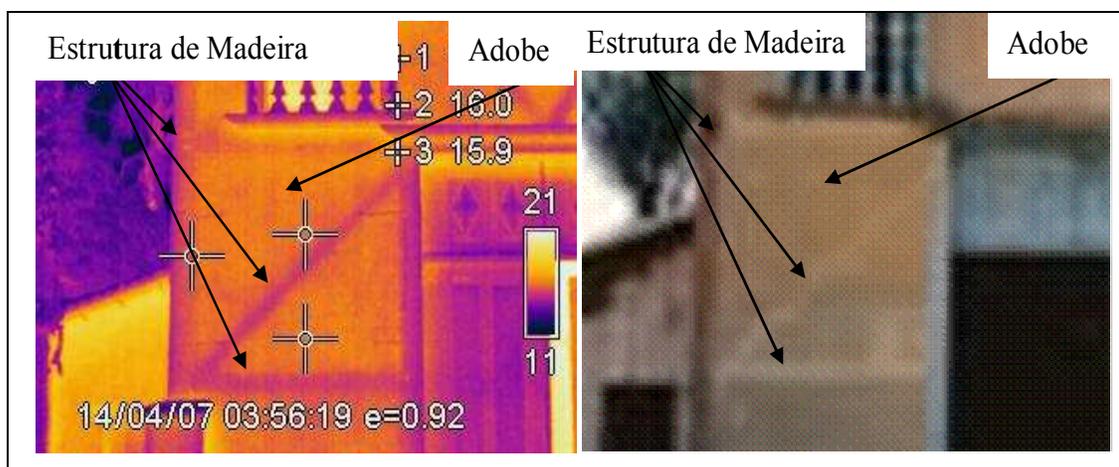


FIGURA 5.9 - A comparação dos resultados entre a termografia e a foto visível.

FONTE: DO AUTOR, 2007.

FONTE: MENEZES, 1986.

#### 5.4.2 Validação quantitativa dos resultados da termografia

Foi proposto um modelo matemático, a partir do prévio conhecimento do objeto (alvenaria de adobe envolvida em estrutura de madeira), capaz de determinar a distribuição de temperatura da superfície para um intervalo de tempo de 24 horas. Os dados obtidos no trabalho de campo, com a técnica de termografia e a técnica de termopares, são confrontados com os dados do modelo matemático, obtidos em um

programa de computador capaz de gerar as temperaturas da superfície interna e externa. Os resultados são consistentes e avaliados entre si, TABELA 5.3 e TABELA 5.4, a seguir. Destes resultados elaborou-se gráficos comparativos entre as técnicas utilizadas, para o estudo da superfície (interna e externa), GRÁFICO 5.1 e GRÁFICO 5.2.

TABELA 5.3

Valores da temperatura (termografia, termopares e software) e das *médias*, na superfície interna.

Superfície Interna - TEMPERATURA (K)													Valores medios						
DIA	HORA	TÉCNICA	PONTOS						desvio padrão			energia	resolução	K					
			8	9	10	11	12	13	14	1	2				3				
13/4/2007	17:00:00	TERMOGRAFIA	296,6	297,0	296,0	296,6	295,9	296,1									296,3		
		TERMOPARES	295,4	297,2	295,5	295,9	295,4	295,7										295,8	
		diferenças 1 (termografia e termopar)	1,2	-0,2	0,5	0,7	0,5	0,4	0,5										
		dados do software	295,4	297,2	295,5	295,9	295,4	295,7											295,8
		diferenças 2 (termografia e software)	1,2	-0,2	0,5	0,7	0,5	0,4	0,5										
		diferenças 3 (termopares e software)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0										
	20:00:00	TERMOGRAFIA	295,8	296,1	295,2	295,5	295,6	295,2										295,5	
		TERMOPARES	295,3	295,9	295,3	295,6	295,5	295,5										295,5	
		diferenças 1 (termografia e termopar)	0,5	0,2	-0,1	-0,1	0,1	-0,3	0,3										
		dados do software	296,0	296,1	296,0	296,0	295,9	295,8											295,9
		diferenças 2 (termografia e software)	-0,2	0,0	-0,8	-0,5	-0,3	-0,6	0,3										
		diferenças 3 (termopares e software)	-0,7	-0,2	-0,7	-0,4	-0,4	-0,3	0,2										
23:00:00	TERMOGRAFIA	295,3	295,8	295,1	295,5	295,2	295,3										295,3		
	TERMOPARES	295,1	295,0	295,1	295,2	295,2	295,1										295,1		
	diferenças 1 (termografia e termopar)	0,2	0,8	0,0	0,3	0,0	0,2	0,3											
	dados do software	295,1	294,7	295,1	295,1	294,9	294,9											294,9	
	diferenças 2 (termografia e software)	0,2	1,1	0,0	0,4	0,3	0,4	0,4											
	diferenças 3 (termopares e software)	0,0	0,3	0,0	0,1	0,3	0,2	0,1											
14/4/2007	02:00:00	TERMOGRAFIA	294,3	294,3	294,3	294,3	294,4	294,0										294,2	
		TERMOPARES	294,3	293,8	294,1	294,2	294,3	294,0										294,1	
		diferenças 1 (termografia e termopar)	0,0	0,5	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2										
		dados do software	293,9	293,4	293,9	293,9	293,6	293,6											293,7
		diferenças 2 (termografia e software)	0,4	0,9	0,4	0,4	0,8	0,4	0,2										
		diferenças 3 (termopares e software)	0,4	0,4	0,2	0,3	0,7	0,4	0,2										
	06:00:00	TERMOGRAFIA	292,7	292,3	292,0	292,2	292,1	292,0											292,2
		TERMOPARES	293,2	292,2	292,8	292,9	292,9	292,7											292,7
		diferenças 1 (termografia e termopar)	-0,5	0,1	-0,8	-0,7	-0,8	-0,7	0,3										
		dados do software	293,0	292,6	292,9	293,0	292,5	292,5											292,7
		diferenças 2 (termografia e software)	-0,3	-0,3	-0,9	-0,8	-0,4	-0,5	0,3										
		diferenças 3 (termopares e software)	0,2	-0,4	-0,1	-0,1	0,4	0,2	0,3										
09:00:00	TERMOGRAFIA	293,0	292,9	292,9	292,8	292,7	292,6											292,8	
	TERMOPARES	292,9	292,6	292,8	292,8	292,6	292,6											292,7	
	diferenças 1 (termografia e termopar)	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1											
	dados do software	292,8	293,0	292,6	292,6	292,4	292,4											292,6	
	diferenças 2 (termografia e software)	0,2	-0,1	0,3	0,2	0,3	0,2	0,1											
	diferenças 3 (termopares e software)	0,1	-0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2											
12:00:00	TERMOGRAFIA	293,7	294,6	293,6	294,1	293,5	293,7											293,8	
	TERMOPARES	293,7	295,1	293,8	294,0	293,5	293,7											293,9	
	diferenças 1 (termografia e termopar)	0,0	-0,5	-0,2	0,1	0,0	0,0	0,2											
	dados do software	294,6	295,1	294,5	294,4	294,6	294,6											294,6	
	diferenças 2 (termografia e software)	-0,9	-0,5	-0,9	-0,3	-1,1	-0,9	0,3											
	diferenças 3 (termopares e software)	-0,9	0,0	-0,7	-0,4	-1,1	-0,9	0,4											
16:00:00	TERMOGRAFIA	296,6	296,9	295,3	296,0	295,4	295,8											296,0	
	TERMOPARES	295,3	297,8	295,5	296,0	295,4	295,6											295,9	
	diferenças 1 (termografia e termopar)	1,3	-0,9	-0,2	0,0	0,0	0,2	0,7											
	dados do software	296,5	297,4	296,3	296,4	296,6	296,5											296,6	
	diferenças 2 (termografia e software)	0,1	-0,5	-1,0	-0,4	-1,2	-0,7	0,5											
	diferenças 3 (termopares e software)	-1,2	0,4	-0,8	-0,4	-1,2	-0,9	0,6											
17:00:00	TERMOGRAFIA	296,2	297,8	296,5	296,6	296,6	296,3											296,6	
	TERMOPARES	295,7	297,9	295,8	296,2	295,7	295,9											296,2	
	diferenças 1 (termografia e termopar)	0,5	-0,1	0,7	0,4	0,9	0,4	0,3											
	dados do software	296,7	297,6	296,6	296,6	296,8	296,7											296,8	
	diferenças 2 (termografia e software)	-0,5	0,2	-0,1	0,0	-0,2	-0,4	0,3											
	diferenças 3 (termopares e software)	-1,0	0,3	-0,8	-0,4	-1,1	-0,8	0,5											

FONTE: DO AUTOR, 2007.

TABELA 5.4

Valores da temperatura (termografia, termopares e software) e das *medias*, na superfície externa.

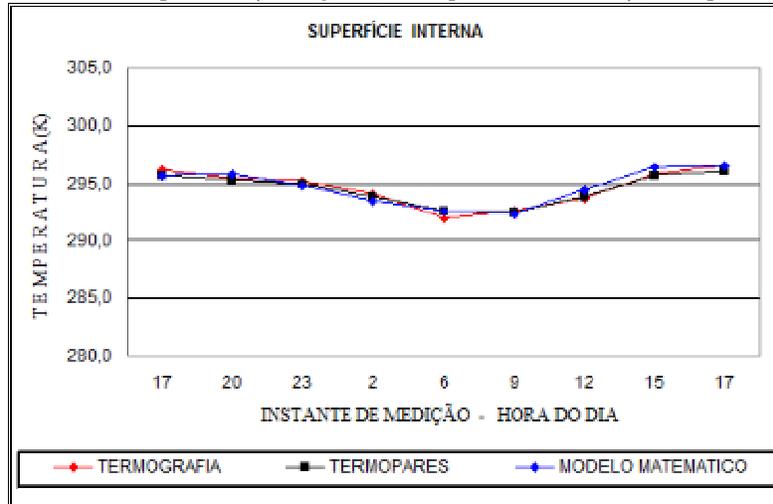
Superfície Externa - TEMPERATURA (K)													Valores medios		
DIA	HORA	TÉCNICA	PONTOS							desvio padrão			energia	resolução	K
			1	2	3	4	5	6	7	1	2	3			
13/04/2007	17:00:00	TERMOGRAFIA	300.6	297.7	298.5	296.5	297.0	297.0	296.5	0,3	0,3	0,0	resfriamento	boa	297,2
		TERMOPARES	300,7	297,4	298,6	297,1	297,1	296,8	296,9						297,3
		diferenças 1 (termografia e termopar)	-0,1	0,3	-0,1	-0,6	-0,1	0,2	-0,4						297,3
		dados do software	300,7	297,4	298,6	297,1	297,1	296,8	296,9						297,3
		diferenças 2 (termografia e software)	-0,1	0,3	-0,1	-0,6	-0,1	0,2	-0,4						297,3
		diferenças 3 (termopares e software)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0						297,3
	20:00:00	TERMOGRAFIA	295.2	295.6	294.1	293.6	294.1	294.4	294.0	0,6	0,7	0,2			294,3
		TERMOPARES	294,8	294,4	294,3	294,2	294,3	294,3	294,4						294,3
		diferenças 1 (termografia e termopar)	0,4	1,2	-0,2	-0,6	-0,2	0,1	-0,4						294,4
		dados do software	294,5	294,3	294,3	294,4	294,3	294,6	294,5						294,4
		diferenças 2 (termografia e software)	0,7	1,3	-0,2	-0,8	-0,2	-0,2	-0,5						294,4
		diferenças 3 (termopares e software)	0,3	0,1	0,0	-0,2	0,0	-0,3	-0,1						294,4
23:00:00	TERMOGRAFIA	291.5	291.6	291.1	290.9	291.2	291.5	291.7	0,3	0,4	0,3	291,3			
	TERMOPARES	291,3	292,0	291,1	291,6	291,7	292,0	292,0				291,7			
	diferenças 1 (termografia e termopar)	0,2	-0,4	0,0	-0,7	-0,5	-0,5	-0,3				291,7			
	dados do software	291,4	291,5	291,3	291,6	291,5	292,3	292,2				291,7			
	diferenças 2 (termografia e software)	0,1	0,1	-0,2	-0,7	-0,3	-0,8	-0,5				291,7			
	diferenças 3 (termopares e software)	-0,1	0,5	-0,2	0,0	0,2	-0,3	-0,2				291,7			
02:00:00	TERMOGRAFIA	290.2	290.4	289.6	289.8	290.0	290.6	290.6	0,4	0,3	0,3	290,1			
	TERMOPARES	289,4	290,6	289,5	290,1	290,2	290,6	290,5				290,2			
	diferenças 1 (termografia e termopar)	0,8	-0,2	0,1	-0,3	-0,2	0,0	0,1				290,4			
	dados do software	290,0	290,2	289,9	290,3	290,2	290,9	290,9				290,4			
	diferenças 2 (termografia e software)	0,2	0,2	-0,3	-0,5	-0,2	-0,3	-0,3				290,4			
	diferenças 3 (termopares e software)	-0,6	0,4	-0,4	-0,2	0,0	-0,3	-0,4				290,4			
06:00:00	TERMOGRAFIA	288.6	289.3	288.3	288.8	288.8	289.4	289.3	0,2	0,2	0,3	288,9			
	TERMOPARES	288,9	289,9	288,9	289,6	289,6	290,0	289,8				289,6			
	diferenças 1 (termografia e termopar)	-0,3	-0,6	-0,6	-0,8	-0,8	-0,6	-0,5				289,5			
	dados do software	289,1	289,4	289,1	289,4	289,3	289,9	289,9				289,5			
	diferenças 2 (termografia e software)	-0,5	-0,1	-0,8	-0,6	-0,5	-0,5	-0,6				289,5			
	diferenças 3 (termopares e software)	-0,2	0,5	-0,2	0,2	0,3	0,1	-0,1				289,5			
09:00:00	TERMOGRAFIA	295.0	293.6	294.9	292.4	292.5	292.4	292.5	0,5	1,1	0,6	293,0			
	TERMOPARES	294,8	293,8	295,1	293,4	293,3	293,4	293,3				293,7			
	diferenças 1 (termografia e termopar)	0,2	-0,2	-0,2	-1,0	-0,8	-1,0	-0,8				293,7			
	dados do software	293,9	293,6	294,0	293,6	293,6	293,7	293,8				293,7			
	diferenças 2 (termografia e software)	1,1	0,0	0,9	-1,2	-1,1	-1,3	-1,3				293,7			
	diferenças 3 (termopares e software)	0,9	0,2	1,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,5				293,7			
12:00:00	TERMOGRAFIA	300.2	296.2	299.1	295.6	295.7	294.8	295.4	0,5	2,1	1,7	296,1			
	TERMOPARES	300,6	296,8	299,5	296,8	296,7	296,4	296,5				297,1			
	diferenças 1 (termografia e termopar)	-0,4	-0,6	-0,4	-1,2	-1,0	-1,6	-1,1				297,0			
	dados do software	297,2	297,1	297,0	297,0	297,2	297,1	297,0				297,0			
	diferenças 2 (termografia e software)	3,0	-0,9	2,1	-1,4	-1,5	-2,3	-1,6				297,0			
	diferenças 3 (termopares e software)	3,4	-0,3	2,5	-0,2	-0,5	-0,7	-0,5				297,0			
15:00:00	TERMOGRAFIA	309.7	300.2	304.1	299.6	299.5	299.8	300.2	0,6	3,4	3,0	300,5			
	TERMOPARES	309,4	300,3	304,4	301,0	300,0	300,6	301,3				301,2			
	diferenças 1 (termografia e termopar)	0,3	-0,1	-0,3	-1,4	-0,5	-0,8	-1,1				301,2			
	dados do software	303,0	301,8	302,4	301,7	301,7	302,0	302,0				301,9			
	diferenças 2 (termografia e software)	6,7	-1,6	1,7	-2,1	-2,2	-2,2	-1,8				301,9			
	diferenças 3 (termopares e software)	6,4	-1,5	2,0	-0,7	-1,7	-1,4	-0,7				301,9			
17:00:00	TERMOGRAFIA	307.5	299.6	303.9	298.0	298.4	297.6	297.8	0,6	3,4	3,0	299,2			
	TERMOPARES	307,8	299,9	303,3	298,7	299,5	298,8	298,6				299,8			
	diferenças 1 (termografia e termopar)	-0,3	-0,3	0,6	-0,7	-1,1	-1,2	-0,8				299,8			
	dados do software	302,0	300,9	301,4	300,8	300,8	301,0	300,9				300,9			
	diferenças 2 (termografia e software)	5,5	-1,3	2,5	-2,8	-2,4	-3,4	-3,1				300,9			
	diferenças 3 (termopares e software)	5,8	-1,0	1,9	-2,1	-1,3	-2,2	-2,3				300,9			

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Ao confrontar os valores médios das técnicas, pode-se observar nos gráficos 5.1 e 5.2, que as diferenças entre os valores obtidos com a termografia, com os termopares e com o modelo matemático, por meio do software (C++), são muito próximos.

GRÁFICO 5.1

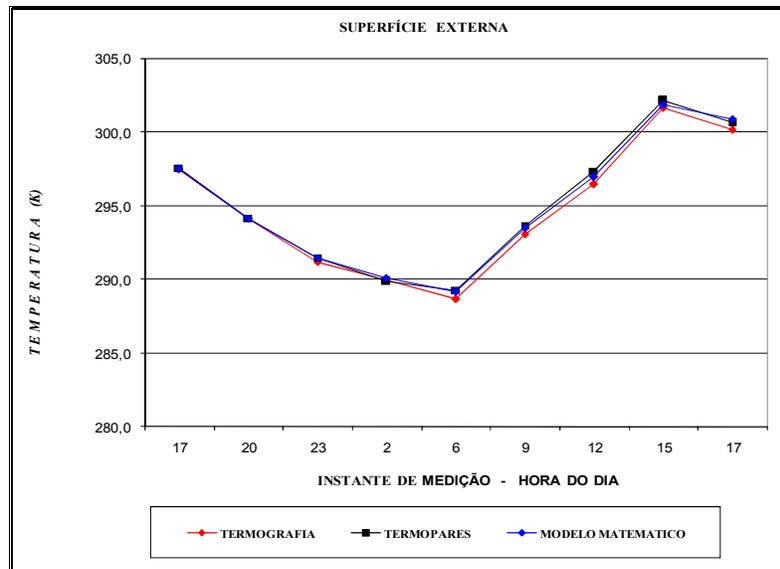
Valores médios da temperatura (termografia, termopares e software), na superfície interna.



FONTE: DO AUTOR, 2007.

GRÁFICO 5.2

Valores médios da temperatura (termografia, termopares e software), na superfície externa.



FONTE: DO AUTOR, 2007.

O modelo matemático, para as superfícies interna e externa, nos períodos de resfriamento e aquecimento, apresentou uma variação típica da situação de campo. A inclinação da curva dos pontos do modelo matemático acompanhou as inclinações das curvas dos pontos da termografia e dos termopares. Pode-se atribuir às pequenas variações encontradas no modelo as seguintes hipóteses:

- Propriedades físicas dos materiais.

As propriedades foram baseadas em dados obtidos de materiais similares aos utilizados para construção da parede: adobe e vigas de madeira. Em se tratando de uma construção muito antiga e tombada pelo Patrimônio, não foi possível uma análise completa que resultasse na *determinação exata destes materiais*. Sua *composição e propriedades foram arbitradas* a partir de dados de materiais similares.

- Absorção da energia solar incidente

A absorção da energia solar incidente se baseou em valores de absortividade usuais para a pintura da parede.

- Cálculo dos processos de transferência de calor.

Os *balanços de energia* e transferência de calor do modelo numérico utilizaram como coeficientes das equações os Números de Fourier e Biot, que foram estabelecidos a partir das propriedades físicas selecionadas e de equações de convecção. O cálculo das convecções foi obtido para o ar quase parado conforme as medidas efetuadas. *Não foi considerado efeito da umidade do ar e da sua variação*.

- Parâmetros das equações de balanço energético.

Como os testes foram efetuados in loco sem possibilidade de medições mais precisas como as que seriam feitas em um laboratório, os valores obtidos para os

parâmetros decorrentes (absortividade solar, e Fourier e Biot) são aproximados e não exatos como seria desejável.

Para ajustar a curva do modelo, promoveram-se alterações sucessivas dos seguintes parâmetros:

a) absortividade da energia solar – depois de algumas tentativas foram estabelecidos os valores da absortividade das colunas verticais (pintura azul fosca) e do resto da parede (pintura branca),

b) condutividade térmica dos materiais: - A madeira apresenta propriedades físicas diferentes do adobe além de sua condutividade térmica, no sentido (longitudinal) das fibras, ser muito mais elevada que no sentido transversal. Este fato exige a partição do painel em volumes de controle diferenciados entre as partes de adobe e de madeira, estes últimos ainda levando em consideração a direção das fibras para cada viga de madeira. As condições de controle nas superfícies limítrofes destes volumes são caracterizadas pela igualdade de fluxos de calor entre os diferentes volumes ao atravessar o contorno,

c) difusividade térmica dos materiais – verificou-se, após várias tentativas, que um aumento de 30% na difusividade e, Fourier melhora sensivelmente o ajuste,

d) Número de Biot – este parâmetro depende da razão entre condutância convectiva e a condutividade térmica do material. Uma variação de 100% em Biot apresentou uma melhoria no ajuste das temperaturas. Com o ar praticamente parado (a velocidade do vento inferior a 1,0 m/s) os valores da convecção são muito baixos e talvez outros fatores como, por exemplo, *as variações da umidade* passem a ser relevantes.

Por fim pode se afirmar que as principais qualidades intrínsecas da metodologia são:

- a) diagnósticos precoce do estado de conservação das edificações,
- b) a identificação da presenças de estruturas e elementos ocultos da edificações.

Não há nenhuma dúvida que as vantagens da metodologia contribuem fortemente para a tomada de decisão nas intervenções em edificações do patrimônio histórico.

## 6. CONCLUSÃO

A conclusão “*mister*” do trabalho pode ser apresentada como a consecução do objetivo principal, ou seja, avaliação e validação do emprego das técnicas de transferência de calor como ferramenta de diagnóstico da presença de estruturas ocultas e da presença de anomalias nas edificações do Patrimônio Histórico Cultural Brasileiro.

O emprego da técnica de termografia digital é uma realidade possível e representa um salto qualitativo na preservação e conservação de edificações históricas e bens móveis do Patrimônio Histórico Nacional.

O resultado é ainda mais significativo quando associada ao emprego do modelo matemático proposto neste trabalho.

O simples exercício visual de identificar diferenças térmicas pode ser aperfeiçoado com o emprego de critérios de análise matemática, aumentando a confiabilidade e a possibilidade de acerto nos diagnósticos ou na estimativa de ocorrências de anomalias físicas.

As variações nas temperaturas das superficiais apresentadas nos termogramas, nos termopares e no modelo matemático conduzem a conclusões sobre a presença de materiais diferentes. Quando aplicado o modelo nestas regiões específicas, os parâmetros físicos dos agentes patológicos e o comportamento das temperaturas superficiais podem reproduzir a variação térmica do termograma. Permitem, assim, uma análise mais rigorosa sobre os fenômenos presentes. No decorrer da pesquisa verificou-se que as hipóteses e premissas estabelecidas inicialmente no trabalho foram constatadas.

No estudo da Capela São Sebastião de Águas Claras, as conclusões principais são:

- A técnica utilizada, termografia passiva, demonstrou-se desempenho satisfatório na identificação de estruturas ocultas e anomalias, mesmo com restrições em alguns períodos,
- A termografia passiva necessita de um estudo e planejamento para a sua utilização no estudo de edificações do patrimônio histórico,

- Os termogramas apresentam o perfil térmico das alvenarias. Há uma nítida variação na temperatura superficial. A diferença térmica encontrada denota a presença de diferentes materiais no interior da alvenaria, devido às propriedades físicas e químicas bastante distintas dos mesmos;
- Os resultados obtidos com os termopares são bastante similares aos resultados da termografia;
- A comparação dos resultados (termopares e termogramas) com as fotos da construção permite perceber a presença das estruturas de madeira e a presença de adobe, validando os resultados;
- A adoção de um modelo matemático conhecido apresentou uma distribuição de temperaturas, ao longo do dia, com uma variação típica da situação analisada. A ocorrência do valor teórico ligeiramente discrepante, no ponto 12hs (superfície externa), em relação aos valores de medição de campo (termopares e termografia) não compromete o modelo, mas reforçam a necessidade de ajuste dos parâmetros físicos dos materiais constituintes da alvenaria.
- A técnica de utilização de bibliografia científica como fonte referencial, para adoção dos parâmetros físicos dos materiais é comum quando do estudo de bens tombados pelo patrimônio histórico e no presente trabalho apresentou bons resultados, mas a pesquisa mais detalhada dos parâmetros físicos possibilitará um modelo mais ajustado a realidade do objeto analisado.

Finalmente, com os resultados obtidos (termopares e termogramas) foi possível identificar as estruturas de madeira e as estruturas de vedação (blocos de adobe) ocultas na Capela de São Sebastião de Águas e, ainda, a presença de algumas anomalias nas alvenarias (infiltração). Os mesmos são plenamente validados pela documentação fotográfica atual e histórica. As possibilidades de emprego dessa tecnologia, termografia digital, em novos sistemas implicarão em novas pesquisas para ajustes no modelo: caracterização dos materiais e do sistema estrutural utilizado, uma vez que ficou fortemente evidenciada, durante a pesquisa, a importância e a influência das linhas de fronteira entre os materiais e da linha de contato entre materiais e o meio ambiente.

Portanto, as potencialidades do modelo remetem à continuidade da pesquisa, no intuito de aumentar sua confiabilidade e sua conformidade assim, se faz necessário:

1. O acompanhamento da Capela de São Sebastião de Águas Claras para monitoramento e controle sistemático das alterações e anomalias presentes e prevenção e conservação da edificação,
2. O emprego da técnica de termografia em outras edificações do patrimônio histórico, possibilitando a geração: primeiro de um sistema de análise do estado físico das edificações e segundo um banco de dados relacionando os vários tipos de sistemas estruturais e materiais e sua conservação,
3. Elaboração de modelos físicos próprios para cada situação, nos quais sejam possíveis a caracterização dos parâmetros físicos reais dos materiais (massa específica, densidade, condutibilidade térmica, emissividade, calor específico, composição e outros);
4. Continuidade do estudo das influências do meio ambiente (vento, umidade relativa do ar, chuva e material em suspensão) e do meio circunvizinho ao alvo (reflexo, sombreamento) na técnica de termografia;
5. Avanço nas pesquisas de apropriação dos valores de incerteza dos processos de transferência de calor, possibilitando estimar o erro na termografia digital e, conseqüentemente, aumentar sua confiabilidade;

Os resultados alcançados no trabalho demonstram qualitativamente e quantitativamente as características da técnica e conformam um ganho substancial na metodologia de diagnóstico das edificações, quando usadas as técnicas de termografia digital.

A termografia digital apresenta um imenso espectro de aplicações, seja no campo do conhecimento científico, seja no campo da técnica de inspeção. Para ambos, as únicas verdades absolutas serão: a permeabilidade entre os dois campos e a interação nas ações no avanço do conhecimento.

## ABSTRACT

The main objective of this work is to research and evaluate the results of the application of heat transfer techniques: radiation (infrared thermograph) and conduction (thermopar sensors) as a tool of diagnosis of the presence of hidden structures and anomalies at edifications which belong to the Brazilian Historical Patrimony. The utilization of a non-destructive method, mainly infrared thermograph, is highly diffused at European Countries, due to their great historical estate. Nevertheless, Brazil's singularity, considering: his tropical position (different climate regime) and both the materials employed in the edifications of the past century and the building techniques, justifies and imposes the assimilation of this technology so as to guarantee and safeguard our worthy Historical Patrimony. The work proposed was the analysis of an edification historic: São Sebastião das Águas Claras Chapel, built in the XVIIth century using sun-dried brick, and placed at São Sebastião das Águas Claras district, at Nova Lima, Minas Gerais. Two techniques of evaluation and identification were employed, in spite of the fact that the parameter was the same: temperature. Those techniques distinguish themselves by the mechanism of observation of the heat transfer phenomena. The results, it was possible to identify hidden wooden and sealing structures (sun-dried brick blocks) at the Chapel's wall, and, moreover, the presence of some anomalies. These results are completely validated by the historic documentation of the interventions which took place at the Chapel over the years. The evaluation method of edifications, using digital thermograph resources, may enable specialists to take any decisions necessary to conservation and preservation. The singularity and relevance of the present work are unquestionably and urgent on account of the major importance of historical of Brazilian Historical Patrimony. Foreseeing its future, it is possible to guarantee that the use of thermograph will be a fundamental technological tool of diagnosis, assisting the process of taking decisions about proceedings and conservation techniques, restoration and preservation, to be used in historical edifications. Therein, this work offers a perspective and a critical vision to the implementation and advance of this research field.

Key Words: *Thermograph, conservation and preservation of Historical Patrimony.*

## RESUMEN

El objetivo *mister* de este trabajo es pesquisar y evaluar los resultados del empleo de las técnicas de transferencia de calor: radiación (termografía) y conducción (termopares), como herramienta de diagnóstico de la presencia de estructuras y de anomalías en las edificaciones del Patrimonio Histórico Brasileño. La utilización del método no destructivo y principalmente de la técnica de termografía infrarroja es bastante difundida en países europeos. Empero, la diferencia y la especificidad de Brasil, debido a su posición tropical (régimen climático diferenciado), los materiales empleados en las edificaciones del siglo pasado y la técnica de producción, justifican e imponen la asimilación de esa tecnología para la garantía y salvaguarda del valioso Patrimonio Histórico y Cultural de nuestro país. En esa línea de conocimiento, el trabajo propuesto fue la evaluación de una edificación del Patrimonio Histórico Brasileño: La Capilla de São Sebastião das Águas Claras, construida en el siglo XVII en adobe e implantada en el distrito de São Sebastião das Águas Claras, en la ciudad de Nova Lima, Minas Gerais. Fueron empleadas dos técnicas de evaluación e identificación, aunque el parámetro de pesquisa sea el mismo: la temperatura. Las técnicas se distinguen en el mecanismo de observación de la transferencia de calor. Con los resultados fue posible identificar las estructuras de madera y las estructuras de sellado (bloques de adobe) ocultas en la Capilla y, además, la presencia de algunas anomalías en las albañilerías. Los mismos resultados son plenamente validados por la documentación histórica de las intervenciones llevadas a cabo al largo de los años. El método de evaluación de las edificaciones, utilizando los recursos de termografía sin contacto, podrá tornar viable decisiones acerca de las intervenciones civiles necesarias para la conservación y preservación. La singularidad y la relevancia de los estudios del presente trabajo son incuestionables y imperiosas, debido a la gran importancia del valor histórico del Patrimonio Cultural Brasileño. En ese sentido, este trabajo ofrece una perspectiva y una visión crítica, para la implementación y avance de esa línea de pesquisa.

Palabras Llaves: *Termografía Infrarroja, Conservación y Preservación del Patrimonio.*

## REFERÊNCIAS

1. AKUTSU, Maria; SATO, Neide Matiko Nakata. Propriedades termofísicas de materiais e componentes de construção. In: TECNOLOGIA de edificações. São Paulo: PINI; IPT, 1988. p. 519 –522.
2. ASSIS, Myriam Lage; ÁLVARES, Lúcia Capanema. A gestão do patrimônio no caso da Pampulha e a necessidade de um planejamento turístico intersetorial e sistêmico. In: FÓRUM BRASILEIRO DO PATRIMÔNIO CULTURAL, 1. ; 2004, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: Escola de Arquitetura da UFMG; Escola de Belas Artes da UFMG, 2004. p. 72 – 73.
3. AVDELIDIS, N.P.; MOROPOULOU, A.; THEOULAKIS, P. Detection of water deposits and movement in porous materials by infrared imaging. *Infrared Physics and Technology*, v. 44, n 3, p. 183-190, June 2003.
4. BALARAS, C. A ; ARGIRIOU, A. A. Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings*, Lausanne, v. 34, n.2, p. 171-183, 2002.
5. BARR, E. S. The Infrared pioneers – III – Samuel Pierpont Langley. *Infrared Physics*, Oxford (GB), v. 3, p. 195-206, 1962.
6. BAUER, L.A. Falcão (Coord.). *Materiais de construção*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979. 529p.
7. BEJAN, Adrian. *Transferência de calor*. Tradução de Euryale de Jesus Zerbini e Ricardo Santilli Ekman Simões. São Paulo: Edgard Blucher, 1996. Original inglês.
8. BLANC, Alan. Maintenance of the building structure and fabric. In: MILLS, Edward. *Building main-tenance and preservation: a guide to design and management*. 2 nd. ed. Oxford: Butterworth. Heine-mann, 1994. Chapter 8, p.88-108.
9. BUSSE, G.;WU, D.; KARPEN, W. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography, *Journal of Applied Physics*, Menasha, v. 71, n. 8, p. 3962-3965, 1992.
10. CAMPOS VELHO, Harold Fraga de. Problemas inversos: conceitos básicos e aplicações. [s.n.t] Disponível em:<[http://www.sbmac.org.br/bol/boletim\\_2002/campos\\_velho\\_4emc.pdf](http://www.sbmac.org.br/bol/boletim_2002/campos_velho_4emc.pdf)> Acesso em 09. Outubro 2007.
11. CARLOMAGNO, G. M.; MEOLA, C. Comparison between thermographic techniques for frescoes NDT. *NDT&E International*, London, v. 35, p. 559-565,

- 2002.
12. CARLOMAGNO, G. M., MEOLA, C. Infrared thermography in the restoration of cultural properties. In: CONFERENCE 4360 THERMOSENSE XXIII, 2001, Orlando (FL). Proceedings of Spie 4360 ... Bellingham, Washington: SPIE -The International Society for Optical Engineering, 2001.
  13. CARRIO, Juan Monjo. Patologia de cerramientos y acabados arquitectónicos. 2ed. Madrid: Munilla- Leria, 1997. (1 ed. 1994).
  14. CARTA de Burra. Austrália, 1980. ICOMOS - Conselho Internacional de Monumentos e Sítios. Disponível em: <[http://www.international.icomos.org/burra1999\\_spa.pdf](http://www.international.icomos.org/burra1999_spa.pdf)>
  15. CARTA de Nova Orleans para a preservação conjunta de estruturas e artefatos históricos. In: SIMPÓSIOS: MUSEU EM EDIFÍCIOS HISTÓRICOS (1990, Montreal, Quebec); (1991, Nova Orleans, Lusiana). APT/AIC, 1992.
  16. CASE, T. W. Notes on the change of resistance of certain substrates in light. Physics Review, v. 9, p. 305-310, 1917.
  17. CINCOTTO, Maria Alba; HELENE, Paulo Roberto do Lago. Patologia de estrutura de concreto armado. In: TECNOLOGIA das edificações. São Paulo: PINI; IPT, 1988. p. 593-596.
  18. CINCOTTO, Maria Alba. Patologia das argamassas de revestimento: análise e recomendações. In: TECNOLOGIA de edificações. São Paulo: PINI; IPT, 1988. p.549-554.
  19. CLARK, M.; McCANN, D. M.; FORDE, M. C. Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. NDT&E International, London, v. 36, p. 265-275, 2003.
  20. CORTEZ, Márcio Fonte-Boa; ANDRADE, Roberto Márcio de. Prática Científica na Engenharia. Método científico na análise de sistemas técnicos. Belo Horizonte: DEMEC/UFMG, 2002. Apostila.
  21. COMPLEXO da construção civil. [Belo Horizonte]: [ SEBRAE ], 2003/2004. 34p. (Estudos Setoriais SEBRAE Minas).
  22. COURTAULD INSTITUTE OF ART; javascript:outroAcervo(")GETTY CONSERVATION INSTITUTE (Org.). The conservation of wall paintings: proceedings of a symposium. London, 1987.
  23. COURTAULD INSTITUTE OF ART; javascript:outroAcervo(")GETTY CONSERVATION INSTITUTE (Org.). The conservation of wall paintings: proceedings of a symposium. Singapoure: Tien Wah, 1991. 148p.

24. DATCU, Stefan et al. Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, Exeter (GB), v.46, p. 451 – 467, 2005.
25. DEL BRENNNA, Giovanna Rosso (Org.). *Arquitetura de terra: uma versão brasileira*. Rio de Janeiro: [Solar Grandjean de Montigny; Centro Cultural Francês], [1982?]. 56p. Catálogo de exposição, 06 a 29 maio 1982, Centro Cultural Francês – Rio de Janeiro.
26. DIANA, Maurizio et al. *L'attivitá dell'enea per i beni culturali*. Luglio: Arti Grafiche “II Torchio”- Firenze, 1995. 237p.
27. DORREGO, J.; LUXÁN, M. P. ; DORREGO, F.. Damage detection and localization of reinforcement elements in historic buildings with infrared thermography. In: *ADVANCES in concrete structure*. Xuzhou Jiangsu (China): ACI – RILEM – NNSF, 2003. p. 1 – 9.
28. ELDRIDGE, H. J. *Construcción defectos comunes*. Barcelona: Gustavo Gili, 1982. 465p.
29. FEILDEN, Bernard M. *Conservation of historic buildings*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1994.
30. FIELD of view diagram (Thermal image). In: NEC catalog ref: 041. Disponível em: <<http://www.necsan-ei.co.jp/osd>>.
31. FLIR SYSTEMS, Manual do equipamento ThermaCAM® E320, 2007
32. FIGUEIREDO, Antônio Marcus Lima. A função turística do patrimônio: questionamentos sobre a idéia de sustentabilidade do turismo cultural. *Caderno Virtual de Turismo*, Rio de Janeiro, p. 43 – 49, dez. 2005
33. GIORLEO, G.; MEOLA, C. Comparison between pulsed and modulated thermography in glass-epoxy laminates. *NDT&E International*, London, v. 35, p. 287-292, 2002 apud TAVARES, Sinthya Gonçalves. *Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte*. 123 f. Exame de Qualificação para Doutorado em Engenharia Mecânica. – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
34. GONÇALVES JR. Armando Albertazzi. *Metrologia: parte 1 – 2002*. Florianópolis: Labmetro/UFSC.[20--]. Apostila
35. GOMES, Abdias Magalhães. *Caracterização de argamassas tradicionais utilizadas nos revestimentos exteriores dos edifícios*. 1995. 269f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

36. GOMES, Fernanda Silva; GOMES, Patrícia Silva. Um olhar sobre Cataguases: arquitetura e valorização cultural: In: *FÓRUM BRASILEIRO DO PATRIMÔNIO CULTURAL*, 1. ; 2004, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: Escola de Arquitetura da UFMG; Escola de Belas Artes da UFMG, 2004. p. 35 – 36.
37. GOMES, Patrícia Silva; GOMES, Fernanda Silva; LÉLIS, Rogério Fuscaldi. Revitalização urbana: inserção cultural e resgate da cidadania. In: *FÓRUM BRASILEIRO DO PATRIMÔNIO CULTURAL*, 1. ; 2004, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: Escola de Arquitetura da UFMG; Escola de Belas Artes da UFMG, 2004. p. 74 – 75.
38. GRINZATO, E.; BISON, P. G.; MARINETTI, S. Monitoring of ancient buildings by thermal method. *Journal of Cultural Heritage*, [S.l.], n. 3, p. 21-29, 2002.
39. GRINZATO, E. et al. Capturing the building history by quantitative IR thermography. In: *INTERNACIONAL CONGRESS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR THE SAFEGUARD OF CULTURAL HERITAGE IN THE MEDITERRANEAN BASIN*, 3rd. , Hâlcâlâ de Henares (Spain), 2001. p.393.
40. GRINZATO, E. et al. Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared. *Infrared Physics & Technology*, Exeter (GB), v. 43, p. 165-169, 2002.
41. GRINZATO, E. et al. NDE of frescoes by infrared thermography and lateral heating. In: *EUROTHERM SEMINAR*, 60. QIRT 98, Lodz (Poland), p.64-67, 1998.
42. GRINZATO, E. et al. Non-destructive testing of wooden painting by IR thermography. In: *ECNDT*, 8th, Barcelona , 2002.
43. GRINZATO, E.; ROSINA, E. Infrared and thermal testing for conservation of historic building. In: MOORE, Patrick O. (Ed.). *Infrared and thermal testing*. 3rd ed. Columbus (OH): American Society for Nondestructive Testing, 2001. Chapter 18, part.5.
44. GRINZATO, E. Stato dell'arte sulle tecniche termografiche per il controllo non distruttivo e principali applicazioni. In: *CONFERENZA NAZIONALE PND-MD*. [S.l.] Associazione Italiana Prove non Distruttive, 1997. v.1
45. GRINZATO, E.; VAVILOV, V.; KAUPPINEN, T. Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings*, Lausanne, v.29, p. 1-9, 1998.
46. HENRIQUES, Fernando M.A. *Humidade em paredes*. [Lisboa]: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994. ( Conservação e Reabilitação). 168p.
47. HOLLANDA, Sérgio Buarque de et al. *História da civilização: área de estudos*

- sociais. São Paulo: Nacional, [19--?]. 289p.
48. HOLMAN, Jack Philip. Transferência de calor. Tradução de Luiz Fernando Milanez. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1983. 460p. Original inglês.
  49. HOLST, Gerald C. Common Sense approach to thermal imaging. Winter Park (FL): JCD Publishing, 2000. 377p.
  50. HOYANO, Akira; ASANO, Kohichi ; KANAMARU, Takehisa. Analysis of the sensible heat flux from the exterior surface of buildings using time sequential thermography. Atmospheric Environment, v.33, p. 3941 – 3951, 1999.
  51. IDMP, [http : // idmp.entepe.fr/index.html](http://idmp.entepe.fr/index.html), junho de 2001
  52. INAGAKI, T.; ISHII, T.; IWAMOTO, T. On the NDT and E for the diagnosis of defects using infrared thermography. NDT&E, London, v. 32, p. 247-257, 1999.
  53. INCROPERA, F. P; DeWITT, D. P. Fundamentals of heat and mass transfer, 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.
  54. IOSHIMOTO, Eduardo. Incidência de manifestações patológicas em edificações habitacionais. In: TECNOLOGIA de edificações. São Paulo: PINI: IPT, 1988. p.545-548.
  55. KERN, Donald Q. Processos de transmissão de calor . Tradução de Adir M. Luiz. Rio de Janeiro: Guanabara, 1980. 618p. Original inglês.
  56. KOSHIBA, Luiz. História: origens, estruturas e processos. São Paulo: Atual , 2000. 495p.
  57. KRAPEZ, J. C. et al. Early detection by stimulated infrared thermography: comparison with ultrasonics and holo/shearography. In: MALDAGUE, X. (Ed.) Advances in signal processing for non destructive evaluation of material. [S.l.]: Kluwer Academic, 1994 p. 303-321. (Nato Science Sires E) apud TAVARES, Sinthya Gonçalves. Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte. 123 f. Exame de Qualificação para Doutorado em Engenharia Mecânica. – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
  58. KREITH, Frank. Princípios da transmissão de calor. São Paulo: Edgard Blucher, 1977. 549p. Original inglês.
  59. LUDWIG, N. et al. Moisture detection in wood and plaster by IR thermography. Infrared Physics & Technology, Exeter (GB), v.46, p. 161 – 166, 2004.
  60. MAIERHOFER, C. et al. Transient thermography for structural investigation of

- concrete and composites in the near surface region. *Infrared Physics & Technology*, Exeter (GB), v. 43, p. 271 – 278, 2002.
61. MALDAGUE, X. Applications of infrared thermography in non destructive evaluation. In: *TRENDS in optical nondestructive testing (invited chapter)*. [S.l.]: Pramod Rastogi, 2000. p. 591-609.
  62. MALDAGUE, X.; LARGOUET, Y.; COUTURIE, J. A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography: modelling, noise, experiments. *Revue Générale de Thermique*, Paris, v. 37, p. 704-717, 1998.
  63. MALDAGUE, X.; MARINETTI, S. Advances in pulse phase infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, Exeter (GB), v. 43, p. 175-181, 2002.
  64. MALDAGUE, X. *Infrared and Thermal testing: Nondestructive testing handbook*. 3th ed, Columbus, OH: Patrick O. Moore, 2001.
  65. MALDAGUE, X.; MARINETTI, S. Pulse phase infrared thermography. *Journal of Applied Physics*, New York, v. 79, p. 2694-2698, 1996.
  66. MASSARI, Giovanni. *Bâtiments humides et insalubres: pratique de leur assainissement*. Paris: Eyrolles, 1971.
  67. MASSARI, Giovanni. *Humidity in monuments*. Rome: International Centre for the Study of the Preservation and the Restoration of Cultural Property, 1977.
  68. MASSARI, Giovanni. *Saneamento de locais humedos*. [S.l.]: Hogar y Arquitectura, 1962. p. 37-38.
  69. MASSARI, Ippolito. *Some aspects of humidity protection in historic buildings*. Roma: ICCROM, [19--?].
  70. MASSARI, Ippolito. *Techniche e strumenti di misura nell'acertamento dei fenomeni di aggressione umida*. Roma: ICCROM, [19--?].
  71. MENEGHETTI, G.; VANZIN, C. Analisi della resistenza a fatica di provini in acciaio inossidabile mediante misure di temperature superficiale. In: *CONVEGNO NAZIONALE*, 31, 2002, Parma. Sessione P Meccanica Sperimentale. Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS).
  72. [MENEZES, Ivo Porto]. *Capela de São Sebastião*. [S. l.]: [Engearp], [1986].
  73. MONCRIEFF, Anne; WEAVER, Graham. *Cleaning*. London: The Conservation Unit of the Museums & Galleries: Routledge, 1992. 136p. v.2 (Science for Conservators)

74. MOORE, Patrick O. (Ed.). Infrared and thermal testing. 3rd ed. Columbus (OH) : American Society for Nondestructive Testing, 2001. 718p. v.3 (Nondestructive testing handbook).
75. NEWAY, Charles et al. Adhesives and coatings. London : The Conservation Unit of the Museums & Galleries Commission: Routledge, 1992. 140p. v.3 (Science for Conservators)
76. OLIVEIRA, Mário Mendonça de. Tecnologia da conservação e da restauração: materiais e estruturas: roteiros de estudo. Salvador: Gráfica Universitária do Centro Editorial e Didático da UFBA, 1995. 310p.
77. OXLEY, T.A.; GOBERT, E.G. Dampness in building: diagnosis, treatment, instruments. 2nd ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 1994.
78. PEREZ, Ary Rodrigo. Manutenção dos edifícios. In: TECNOLOGIA das edificações. São Paulo: PINI; IPT, 1988. p. 611-614.
79. PEREZ, Ary Rodrigo. Umidade nas edificações: recomendações para a prevenção da penetração de água pelas fachadas (1ª parte). In: TECNOLOGIA de edificações. São Paulo: PINI; IPT, 1988. p.571-574.
80. PEREZ, Ary Rodrigo. Umidade nas edificações: recomendações para a prevenção da penetração de água pelas fachadas (2ª parte). In: TECNOLOGIA das edificações. São Paulo: PINI; IPT, 1988. p.575-578.
81. PIRONDI, Zeno. Manual prático da impermeabilização e de isolamento térmica: contribuição a execução do projeto de impermeabilização, conforme norma da ABNT-NBR 9575. 2.ed. São Paulo: IBI; PINI, 1988. 303p.
82. QUEIROZ, Moema Nascimento. Rompendo os tapumes: uma proposta de interação vivenciada através da restauração na comunidade de São Sebastião das Águas Claras/MG. 2003. 262 f. Dissertação (mestrado) – Escola de Belas Artes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
83. RÁZNJEVIC, Kuzman. Handbook Thermal Dynamic Tables and Sharte: London, Hemisphere Publish, 1976
84. REZENDE, Marco Antonio Penido de; FILHO, Raymundo Rodrigues. Estudo sobre a constituição e recuperação de construções antigas em taipa de pilão: in: V Seminário Ibero americano de arquitetura e construção em terra, Mendonza: Cricyt - Argentina, 2006.
85. RODRIGUES, José Carlos. Geologia para engenheiros civis. São Paulo: McGraw –Hill do Brasil, 1976. 206p.
86. ROGALSKI, A. Infrareds detectors. Amsterdam: Gordon and Breach Science,

- 2000.
87. ROGALSKI, A. Infrared detectors: an overview. *Infrared Physics & Technology*, Exeter (GB), n.43, p. 187-210, 2002.
  88. ROGALSKI, A. New trends in infrared detector technology. *Infrared Physics & Technology*, Exeter (GB), v. 35, n. 1, p. 1-21, 1994.
  89. ROGALSKI, A.; ADAMIEC, K.; RUTKOWSKI, J. *Narrow-gap semiconductor photodiodes*. Bellingham: SPIE Press, 2000.
  90. ROSINA, E.; GRINZATO, E. Infrared and thermal testing for conservation of historic buildings. *American Society for Nondestructive Testing Journal*, v. 59, n. 8, 2001.
  91. ROSINA, E.; LUDWIG, N. Optimal thermographic procedures for moisture analysis in buildings materials. [s.n.t.]. Disponível em: <<http://www.brera.unimi.it/istituto/archeo/publicazioni/termografia>> Acesso: mar. 2006.
  92. RUIZ, João Álvaro. *Metodologia científica: guia para eficiência nos estudos*. São Paulo: Atlas, 1980. 168p.
  93. SAKAGAMI, T.; KUBO, S. Applications of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative nondestructive evaluations. *Infrared Physics & Technology*, Exeter (GB), v. 43, p. 211-218, 2002 apud TAVARES, Sinthya Gonçalves. *Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte*. 123 f. Exame de Qualificação para Doutorado em Engenharia Mecânica. – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
  94. SATO, Neide Matiko Nakata. Modelo para cálculo de temperaturas e fluxos de calor em coberturas. In: *TECNOLOGIA de edificações*. São Paulo: PINI; IPT, 1988. p.477-480.
  95. SHEPPARD, Norman; BONE, Sylvester. Thermal standards, methods and problems. In: MILLS, Edward. *Building, maintenance and preservation: a guide to design and management*. 2nd ed. Oxford: Reed Educational, 1994. Chapter 4, p.41-48.
  96. SOUZA, Luiz A. C. *El edificio como envolvente: clima interior y exterior*. [s.n.t.] (Nota técnica 1) Mimeografado.
  97. SOUZA, Luiz A. C.; DINIZ, Wivian (Org.) . *Manual de conservação preventiva do patrimônio cultural*. Belo Horizonte: Escola de Belas Artes da UFMG; IEPHA, 2002. 62p.

98. SOUZA, Roberta Viera Gonçalves de. Desenvolvimento de modelos matemáticos empíricos para descrição dos fenômenos de iluminação natural externa e interna. 2004. 292 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
99. TAVARES, Sinthya Gonçalves. Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte. 123 f. Exame de Qualificação para Doutorado em Engenharia Mecânica. – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
100. THOMAZ, Ercio. Trincas em edificações: causas e mecanismos de formação. In: TECNOLOGIA de edificações. São Paulo: PINI: IPT, 1988. p.555-560.
101. THOMAZ, Ercio. Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação. São Paulo: PINI, 1989. 194p.
102. TITMAN, D. J. Applications of thermography in non-destructive testing of structures.
103. NDT&E Internacional, London, v. 34, p. 149-154, 2001.
104. TORRACA, Giorgio. Porous materials building: materials science for architectural conservation . 3rd ed. Rome: ICCROM, 1988. 149p.
105. UEMOTO, Kai Loh. Patologia: danos causados por eflorescência. In: TECNOLOGIA de edificações. São Paulo: PINI: IPT, 1988. p.561-564.
106. UEMOTO, Kai Loh. A pintura na manutenção de edifícios. In: TECNOLOGIA das edificações. São Paulo: PINI: IPT, 1988. p. 615- 618.
107. USBERCO, João; SALVADOR, Edgard. Química: volume único. 5ed. São Paulo: Saraiva, 2002. 672p.
108. VALLERAND, S.; MALDAGUE, X. Defect characterization in pulsed thermography: a statistical method compared with kohonen and perceptron neural networks. NDT&E Internacional, London, v. 33, p. 307-315, 2000.
109. VARGAS, Milton. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978. 509p.
110. VAVILOV, V. P. A termografia na Rússia. Nova Manutenção y Qualidade, Rio de Janeiro, v. 9 , n. 42, 2002.
111. VERATTI, Atílio Bruno. Termografia: princípios, aplicações e qualidade. São Paulo: ICON Tecnologia, 1992.

112. VERÇOSA, Ênio José. Patologia das edificações. Porto Alegre: Sagra, 1991.173p.
113. WEAVER, Graham et al. An introduction to materials. London: The Conservation Unit of the Museums & Galleries Commission; Routledge, 1992. 120p. v.1 (Science for conservators; Conservation science teaching series).
114. WIGGENHAUSER, H. Active IR-applications in civil engineering. Infrared Physics & Technology, Exeter (GB), n. 43, p. 233-238, 2002.
115. WILLIAMS, J. H. Jr.; MASOURI, S. H.; LEE, S. S. One-dimensional analysis of thermal nondestructive detection of delamination and inclusion flaws. British Journal of Non-Destructive Testing, Leigh-On-Sea (GB), v. 22, may 1980 apud TAVARES, Sinthya Gonçalves. Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte. 123 f. Exame de Qualificação para Doutorado em Engenharia Mecânica. – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
116. WOLFE, N. L.; ZISSIS, G. The infrared handbook. [S.l.] Office of Naval Research, Department of Navy, 1978.

## APÊNDICE A – TERMOGRAMAS E RESULTADOS

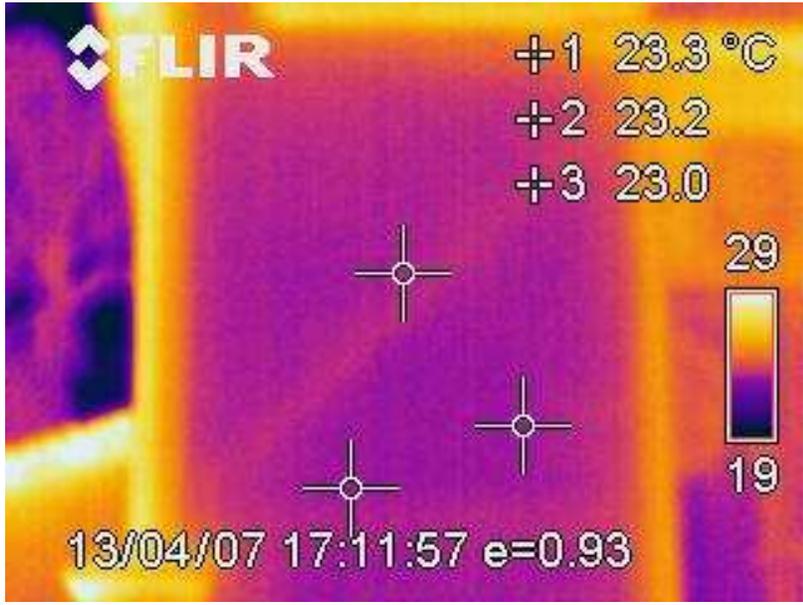
Dia	Posição	Termograma
13/04/2007	interno	 <p> <b>FLIR</b>            +1 22.5 °C            +2 22.5            +3 22.4            26            22            13/04/07 17:10:45 e=0.93         </p>
	externo	 <p> <b>FLIR</b>            +1 23.3 °C            +2 23.2            +3 23.0            29            19            13/04/07 17:11:57 e=0.93         </p>

FIGURA A.1 – Termograma dia 13/04/07 – 17 hs.

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
13/04/2007	interno	<p>                     +1 22.5 °C                      +2 22.4                      +3 22.2                      26                      21                      13/04/07 17:51:40 e=0.93                 </p>
	externo	<p>                     +1 21.6 °C                      +2 21.9                      +3 21.5                      27                      15                      13/04/07 17:53:40 e=0.93                 </p>

FIGURA A.2 – Termograma dia 13/04/07 – 18 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

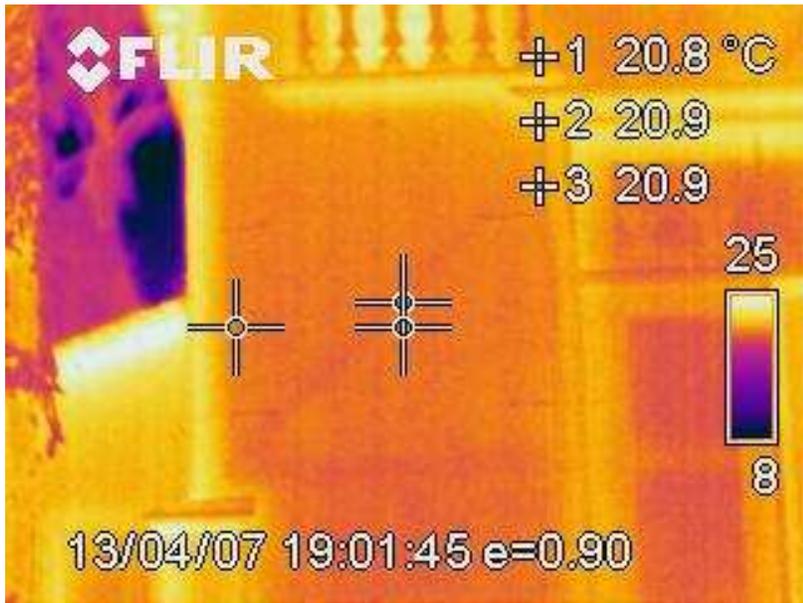
Dia	Posição	Termograma
13/04/2007	interno	 <p>                     +1 22.3 °C                      +2 22.7                      +3 22.4                      25                      21                      13/04/07 19:00:53 e=0.90                 </p>
	externo	 <p>                     +1 20.8 °C                      +2 20.9                      +3 20.9                      25                      8                      13/04/07 19:01:45 e=0.90                 </p>

FIGURA A.3 – Termograma dia 13/04/07 – 19 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

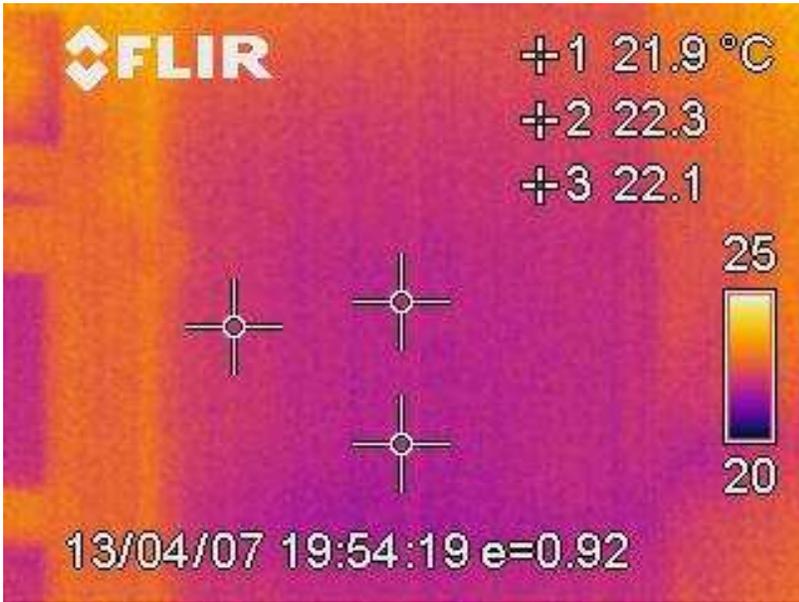
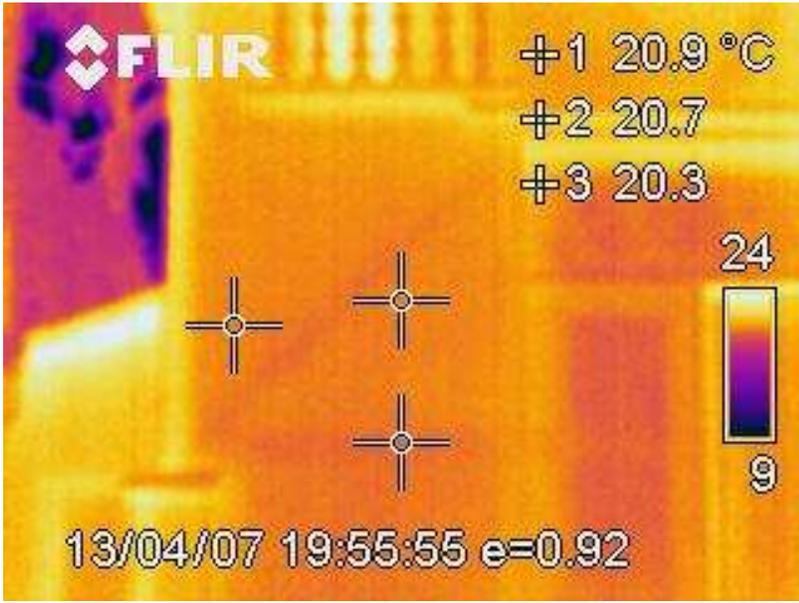
Dia	Posição	Termograma
13/04/2007	interno	
	externo	

FIGURA A.4 – Termograma dia 13/04/07 – 20 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
13/04/2007	interno	
	externo	

FIGURA A.5 – Termograma dia 13/04/07 – 21 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
13/04/2007	interno	<p>                     +1 22.7 °C                      +2 22.8                      +3 22.5                      25                      21                      13/04/07 21:58:22 e=0.92                 </p>
	externo	<p>                     +1 18.9 °C                      +2 18.9                      +3 19.0                      23                      6                      13/04/07 21:59:15 e=0.92                 </p>

FIGURA A.6 – Termograma dia 13/04/07 – 22 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
13/04/2007	interno	
	externo	

FIGURA A.7 – Termograma dia 13/04/07 – 23 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
13/04/2007	interno	 <p>FLIR +1 21.2 °C +2 21.5 +3 21.3 24 19 14/04/07 00:01:04 e=0.92</p>
	externo	 <p>FLIR +1 17.3 °C +2 17.4 +3 17.5 22 11 14/04/07 00:02:09 e=0.92</p>

FIGURA A.8 – Termograma dia 14/04/07 – 00 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	
	externo	

FIGURA A.9 – Termograma dia 14/04/07 – 01 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	
	externo	

FIGURA A.10 – Termograma dia 14/04/07 – 02 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	<p>FLIR</p> <p>+1 20.4 °C +2 20.5 +3 20.3</p> <p>23 19</p> <p>14/04/07 02:56:43 e=0.92</p>
	externo	<p>FLIR</p> <p>+1 15.0 °C +2 15.7 +3 15.5</p> <p>21 4</p> <p>14/04/07 02:59:55 e=0.92</p>

FIGURA A.11 – Termograma dia 14/04/07 – 03 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

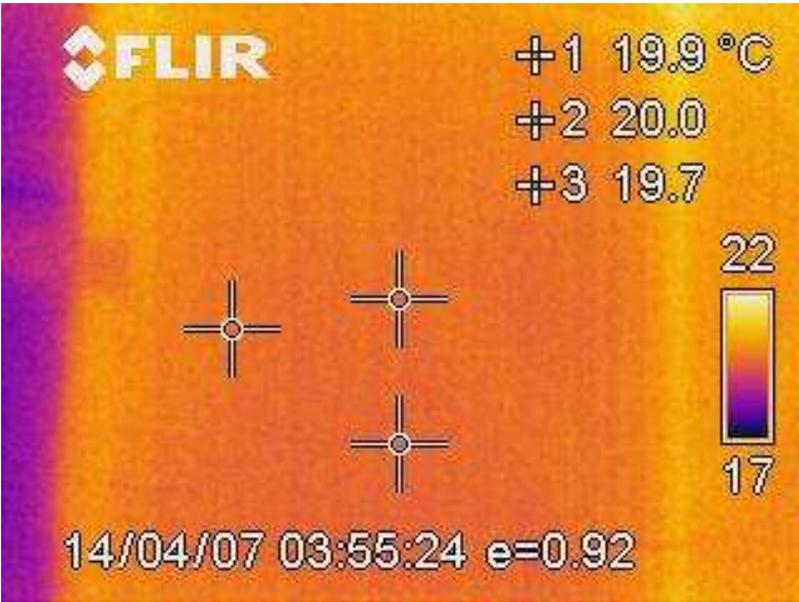
Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	
	externo	

FIGURA A.12 – Termograma dia 14/04/07 – 04 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

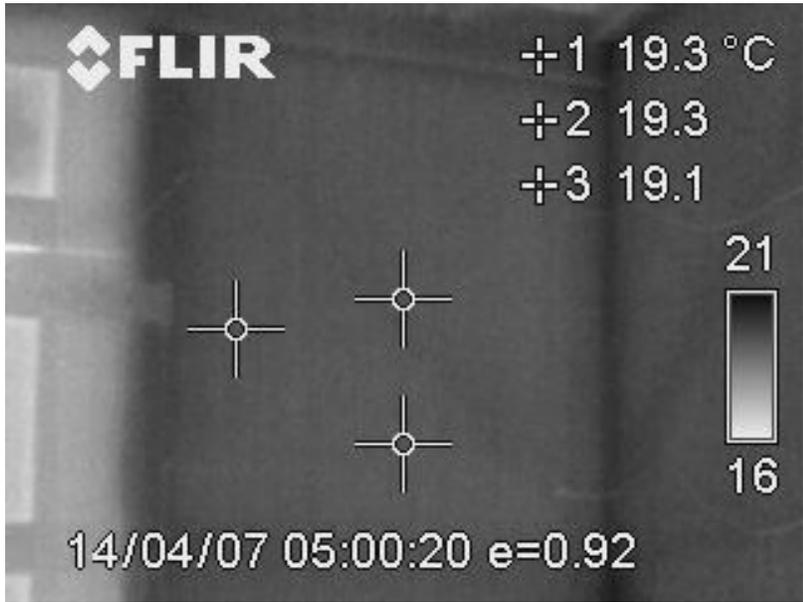
Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	 <p>FLIR</p> <p>+1 19.3 °C +2 19.3 +3 19.1</p> <p>21 16</p> <p>14/04/07 05:00:20 e=0.92</p>
	externo	 <p>FLIR</p> <p>+1 15.8 °C +2 16.3 +3 16.4</p> <p>20 11</p> <p>14/04/07 05:05:45 e=0.92</p>

FIGURA A.13 – Termograma dia 14/04/07 – 05 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	
	externo	

FIGURA A.14 – Termograma dia 14/04/07 – 06 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	
	externo	

FIGURA A.15 – Termograma dia 14/04/07 – 07 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	<p>                     +1 19.1 °C                      +2 19.2                      +3 19.0                      21                      17                      14/04/07 07:52:53 e=0.92                 </p>
	externo	<p>                     +1 17.7 °C                      +2 17.7                      +3 17.2                      21                      15                      14/04/07 07:53:50 e=0.92                 </p>

FIGURA A.16 – Termograma dia 14/04/07 – 08 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	<p>                     +1 19.4 °C                      +2 19.1                      +3 19.0                      22                      18                      14/04/07 08:54:52 e=0.92                 </p>
	externo	<p>                     +1 18.7 °C                      +2 19.5                      +3 18.9                      24                      10                      14/04/07 08:57:08 e=0.92                 </p>

FIGURA A.17 – Termograma dia 14/04/07 – 09 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

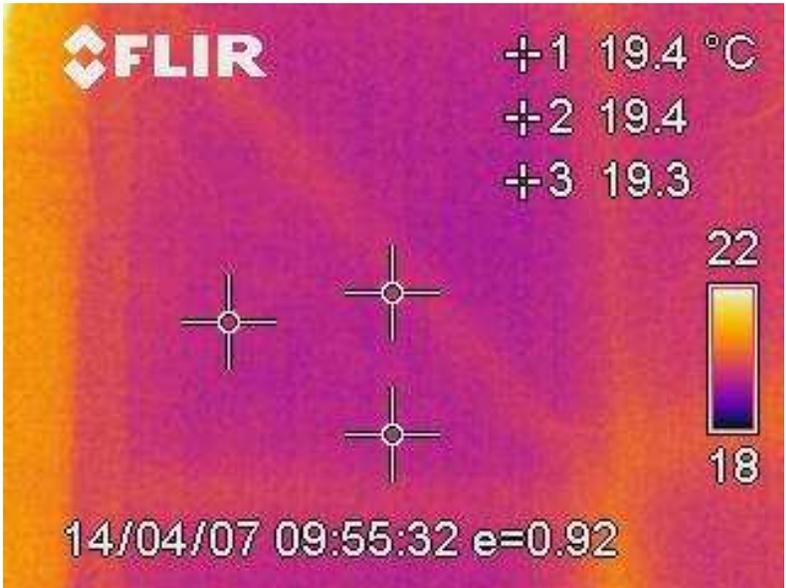
Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	
14/04/2007	externo	

FIGURA A.18 – Termograma dia 14/04/07 – 10 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	
14/04/2007	externo	

FIGURA A.19 – Termograma dia 14/04/07 – 11 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	
	externo	

FIGURA A.20 – Termograma dia 14/04/07 – 12 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	 <p>                     +1 +21.1 °C                      +2 +21.5                      +3 +20.8                      25                      20                      14/04/07 12:58:03 e=0.92                 </p>
14/04/2007	externo	 <p>                     +1 23.1 °C                      +2 23.3                      +3 23.3                      40                      10                      14/04/07 13:00:02 e=0.92                 </p>

FIGURA A.21 – Termograma dia 14/04/07 – 13 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	
14/04/2007	externo	

FIGURA A.22 – Termograma dia 14/04/07 – 14 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	
14/04/2007	externo	

FIGURA A.23 – Termograma dia 14/04/07 – 15 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	
	externo	

FIGURA A.24 – Termograma dia 14/04/07 – 16 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	
	externo	

FIGURA A.25 – Termograma dia 14/04/07 – 17 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

Dia	Posição	Termograma
14/04/2007	interno	
14/04/2007	externo	

FIGURA A.26 – Termograma dia 14/04/07 – 18 hs

FONTE: DO AUTOR, 2007.

## APÊNDICE B – VALORES DA VELOCIDADE DO VENTO

QUADRO B.1

Valores da velocidade do ar – externo.

MEDIÇÃO VELOCIDADE DO AR - EXTERNO (m/s)											
DATA 13.04.2007				DATA 14.04.2007							
Nº MEDIÇÃO	HORA	VELOCIDADE	MÉDIA	Nº MEDIÇÃO	HORA	VELOCIDADE	MÉDIA	Nº MEDIÇÃO	HORA	VELOCIDADE	MÉDIA
1	17:00	0,34		8	0:00	0,14		17	09:00	0,04	
		0,36				0,1				0,03	
		0,24	0,34			0,13	0,116			0,02	0,04
		0,3				0,1				0,05	
		0,44				0,11				0,04	
2	18:00	0,28		9	01:00	0,23		18	10:00	0,14	
		0,27				0,24				0,16	
		0,18	0,24			0,26	0,23			0,37	0,23
		0,25				0,18				0,27	
		0,23				0,24				0,23	
3	19:00	0,26		10	02:00	0,19		19	11:00	0,37	
		0,25				0,18				0,72	
		0,28	0,29			0,13	0,172			0,34	0,36
		0,31				0,19				0,23	
		0,34				0,17				0,13	
4	20:00	0,22		11	03:00	0,13		20	12:00	0,13	
		0,2				0,13				0,03	
		0,17	0,2			0,26	0,158			0,13	0,09
		0,22				0,15				0,08	
		0,2				0,12				0,07	
5	21:00	0,13		12	04:00	0,17		21	13:00	0,14	
		0,17				0,2				0,12	
		0,2	0,19			0,19	0,174			0,18	0,42
		0,21				0,17				0,79	
		0,23				0,14				0,86	
6	22:00	0,22		13	05:00	0,12		22	14:00	0,16	
		0,2				0,1				0,16	
		0,18	0,19			0,13	0,118			0,15	0,45
		0,16				0,14				0,89	
		0,19				0,1				0,91	
7	23:00	0,09		14	06:00	0,17		23	15:00	0,99	
		0,07				0,22				0,6	
		0,1	0,1			0,13	0,158			0,4	0,46
		0,16				0,13				0,16	
		0,1				0,14				0,15	
15	07:00	0,09		15	07:00	0,04		24	16:00	0,24	
		0,04				0,1	0,104			0,19	0,22
		0,16				0,16				0,19	
		0,13				0,13				0,12	
		0,13				0,13				0,21	
16	08:00	0,14		16	08:00	0,14		25	17:00	0,02	
		0,08	0,094			0,08	0,094			0,11	0,13
		0,06				0,06				0,07	
		0,06				0,06				0,25	
		0,06				0,06					

FONTE: DO AUTOR, 2007.

## ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DA TERMOCAMERA

### Desempenho de obtenção de imagem

Campo de visão/distância focal mínima Intercambiável; 23° x 17° (padrão), 14° x 10°  
Sensibilidade térmica <0,10°C a 25°C

Tipo de detector Microbolômetro (FPA) não-resfriado, 320 x 240 pixels

Faixa do espectro 7,5 a 13 µm

Zoom digital 1 x, 2 x, 4 x

Resolução óptica (com lente de 14°) 500:1

### Apresentação de imagens

Apresentação Visor LCD colorido de 2,5", 320 x 240 pixels em imagem IV- Infravermelho. Controles de imagem Palhetas (ferro, arco-íris, arco-íris HC, B/P, B/P inv), nível, faixa, auto-ajuste (contínuo/manual) e semi-automático.

### Medições

Faixas de temperatura -20°C a +250°C (-4° F a +482°F) e 0°C a +500°C

Precisão ±2°C (ou ±3,6°F) ou ±2% da temperatura absoluta em °C

### Armazenamento de imagens

Funções de armazenamento digital Congelar, Armazenar, Imagens JPEG com calibragem padrão. Capacidade de armazenamento de imagens de 80 (JPEG)

### Classificação Classe 2

Tipo Laser diodo semiconductor AlGaInP: 1 mW/635 nm (vermelho)

### Condições ambientais

Faixa de temperatura de operação -15°C a +50°C (5°F a 122°F)

Faixa de temperatura de armazenagem -40°C a +70°C (-40°F a 158°F)

Umidade Operação e armazenagem 20% a 80%, sem condensação, IEC 359.

FONTE: Manual do equipamento ThermaCAM® E320, FLIR SYSTEMS, 2007.

# ANEXO B – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE TERMOGRAFIA

Form No. 1-038-137 Rev. A

## Calibration Certificate

*Model*    ThermaCAM™ E320

*Serial No.*    30100753

*Calibration Site*    FLIR Systems AB, Sweden

*Calibration Date*    October 24, 2006

This is to certify that the calibration of the camera identified above is carried out using radiation sources that are traceable to National Standards at the *Swedish National Testing and Research Institute* (Sweden) or to *NIST, National Institute of Standards and Technology* (USA).

  
\_\_\_\_\_  
QUALITY CONTROL



FLIR SYSTEMS AB • P.O. BOX 1 • SE-182 11 DANLERYD • SWEDEN • TELEPHONE +46 8 753 25 00 • TELEFAX +46 8 753 25 64

Form No. 1-038-137 Rev. A

FONTE: Flir Systems, 2007.

## ANEXO C - FOTOS DATALOG E RELATÓRIO DE VERIFICAÇÃO DOS TERMOPARES E PIRANÔMETROS

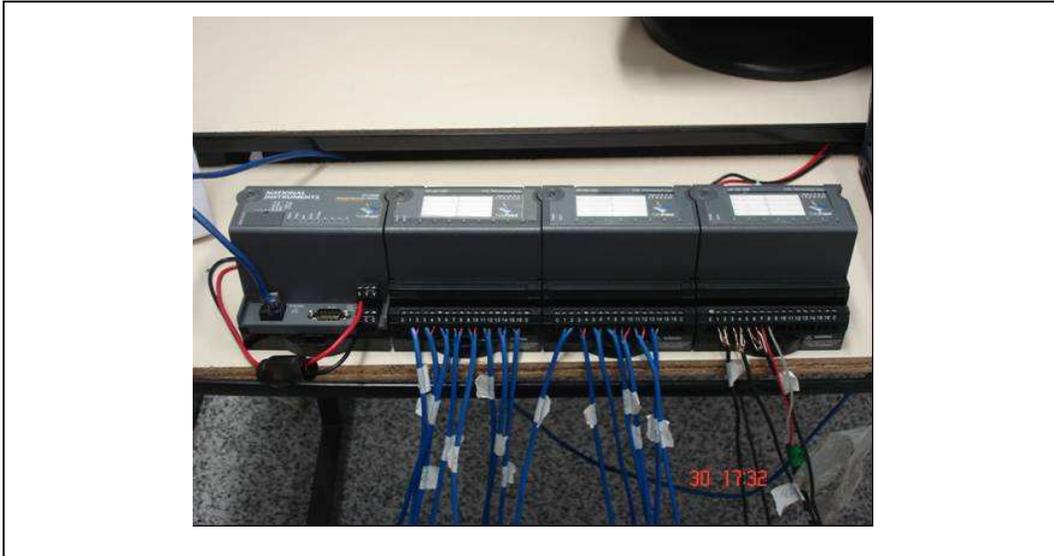


FIGURA C.1 - Sistema de medição. O conjunto de termopares e equipamento registrador - Datalog

FONTE: LABORATÓRIO GREEN SOLAR, 2007



FIGURA C.2 - Sistema de calibração. A calibração do conjunto de termopares

FONTE: LABORATÓRIO GREEN SOLAR, 2007




**Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais**  
 Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico  
 Fone: (31)3319-4144 - Fax: (31)3319-4225  
 CEP 30535-610 - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil  
 GREEN - LABORATÓRIO DE ENSAIOS DE EQUIPAMENTOS SOLARES  
 Fone/Fax: (31) 3319-4387 - Internet: www.green.pucminas.br

---

## Relatório de Verificação de Piranômetro

30/04/2007

---

**Natureza do Trabalho**  
Verificação de piranômetros de campo

---

**Descrição**  
O procedimento consistiu na medição da irradiação solar no plano horizontal durante o período de aproximadamente uma hora por três piranômetros utilizados em trabalho de campo e também em um piranômetro utilizado nas medições em laboratório.  
O objetivo é verificar se as medições fornecidas pelos piranômetros de campo são coerentes.

---

**Identificação do Cliente**  
 Nome..... Eduardo Cabaleiro Cortizo  
 Endereço..... Rua Paraíba, 697 – Sala 312 - Belo Horizonte, MG  
 Telefone..... 31 3289-1823

---

**Objeto do Ensaio**  
 Objeto do Ensaio..... Piranômetro  
 Marca..... Li-Cor  
 Modelos..... LI-200SA  
 Números de Série..... PY52022, PY52183 e PY52021

---

**1. Referência(s) Utilizada(s)**

**1.1. Piranômetro de Referência**  
 Marca..... Eppley  
 Modelo..... PSP  
 Número de Série..... 34034F3  
 Código GREEN..... IN146MR  
 Constante de calibração.....  $9,30 \times 10^{-8}$  V/Wm<sup>2</sup>  
 Certificado de calibração..... 34034F3, 23/08/2004  
 Laboratório de calibração..... The Eppley Laboratory, INC. (EPLAB)

**1.2. Sistema de aquisição de dados**  
 Marca..... National Instruments  
 Modelo..... FP-2000/TC-120  
 Número de Série..... 1211603/123CE9E, 12410F8 e 11FD254

---

**2. Resultados**

Tabela 1: Dados obtidos

	Irradiância média (W/m <sup>2</sup> )	Erro (W/m <sup>2</sup> )	Erro (%)
P1 (PY52021)	725,1	66,1	10,03
P2 (PY52183)	718,9	59,9	9,09
P3 (PY52022)	715,4	56,3	8,55
Padrão	659,0	-	-



---

Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam somente à amostra ensaiada.  
O documento só poderá ser reproduzido integralmente, sem nenhuma alteração.

Página 1 de 2

FIGURA C.3 – Relatório de Verificação de Piranômetro – Folha 01/02

FONTE: LABORATÓRIO GREEN SOLAR, 2007

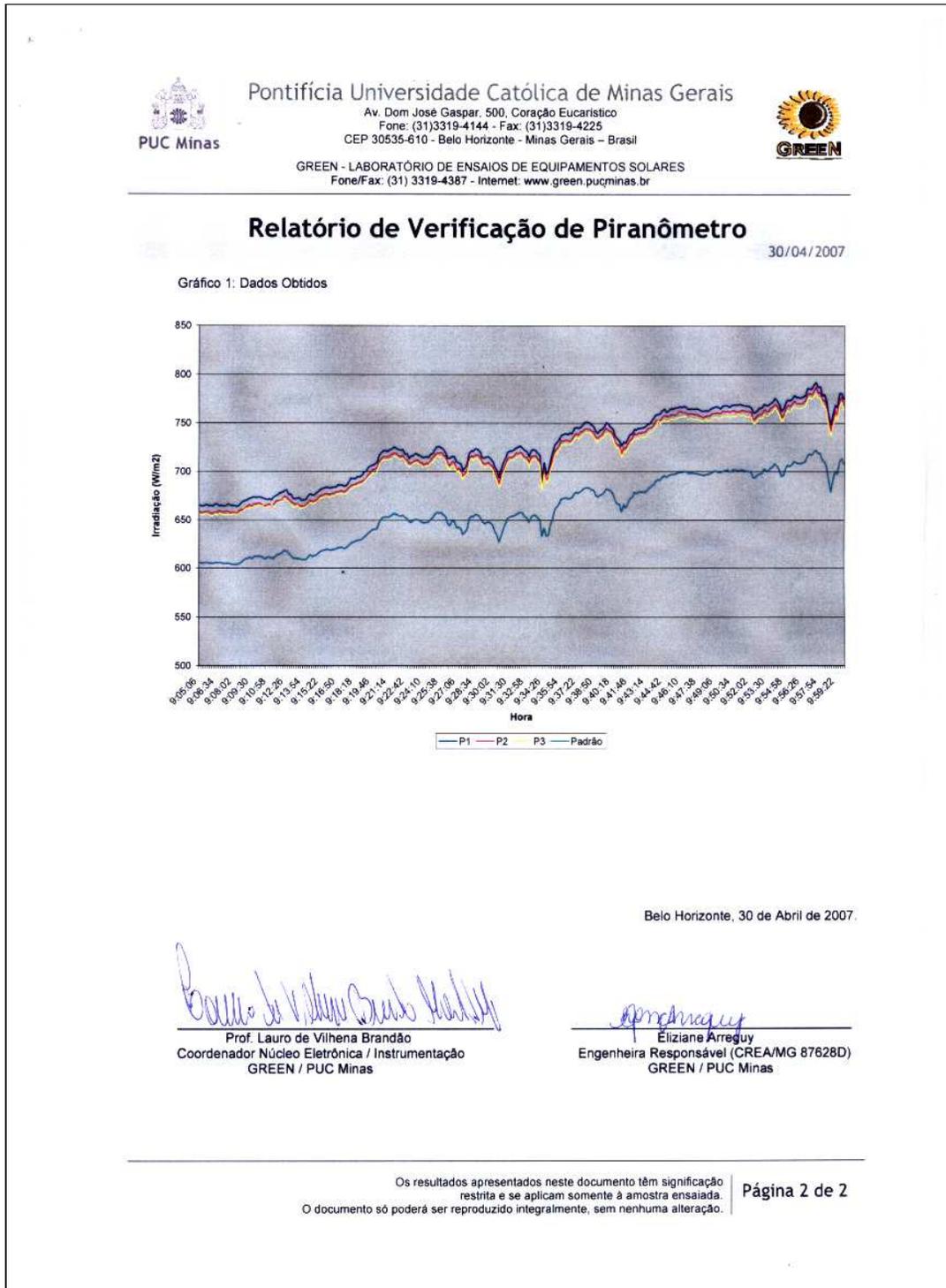


FIGURA C.4 – Relatório de Verificação de Piranômetro – Folha 02/02

FONTE: LABORATÓRIO GREEN SOLAR, 2007






**Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais**  
 Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico  
 Fone: (31)3319-4144 - Fax: (31)3319-4225  
 CEP 30535-610 - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil

GREEN - LABORATÓRIO DE ENSAIOS DE EQUIPAMENTOS SOLARES  
 Fone/Fax: (31) 3319-4387 - Internet: www.green.pucminas.br

---

### Relatório de Verificação de Termopares

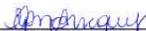
30/04/2007

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
T1	0,87	24,16	93,48
T2	0,95	24,19	92,64
T3	0,90	24,26	93,45
T4	1,03	24,32	93,66
T5	1,09	24,33	93,80
T6	0,96	24,29	93,76
T7	0,97	24,27	93,54
T8	0,88	24,20	93,30
T9	0,82	24,15	93,69
T10	0,91	24,13	93,61
T11	0,91	24,15	93,57
T12	0,91	24,16	92,32
T13	0,98	24,16	93,61
T14	0,84	24,13	93,34
T15	0,77	24,10	93,58
<b>Menor Valor (°C)</b>	<b>0,77</b>	<b>24,10</b>	<b>92,32</b>
<b>Maior Valor (°C)</b>	<b>1,09</b>	<b>24,33</b>	<b>93,80</b>
<b>Diferença máxima (°C)</b>	<b>0,32</b>	<b>0,23</b>	<b>1,48</b>

Belo Horizonte, 30 de Abril de 2007.



Prof. Lauro de Vilhena Brandão  
 Coordenador Núcleo Eletrônica / Instrumentação  
 GREEN / PUC Minas



Engenheira Responsável (CREA/MG 87628D)  
 GREEN / PUC Minas

---

Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam somente à amostra ensaiada. O documento só poderá ser reproduzido integralmente, sem nenhuma alteração.

Página 2 de 2

FIGURA C.6 – Relatório de Verificação de Termopares – Folha 02/02

FONTE: LABORATÓRIO GREEN SOLAR, 2007

## ANEXO D - PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DA TERMOGRAFIA

A termografia basicamente é a percepção da temperatura superficial de um corpo pelo mecanismo de transferência de calor (radiação), uma vez que todo corpo com temperatura acima do Zero Absoluto emite radiação térmica.

A termografia persegue a análise da radiação emitida, logo a energia refletida é uma variável não desejada, caracterizada como uma incerteza no processo de captura da imagem (FIGURA D.1).

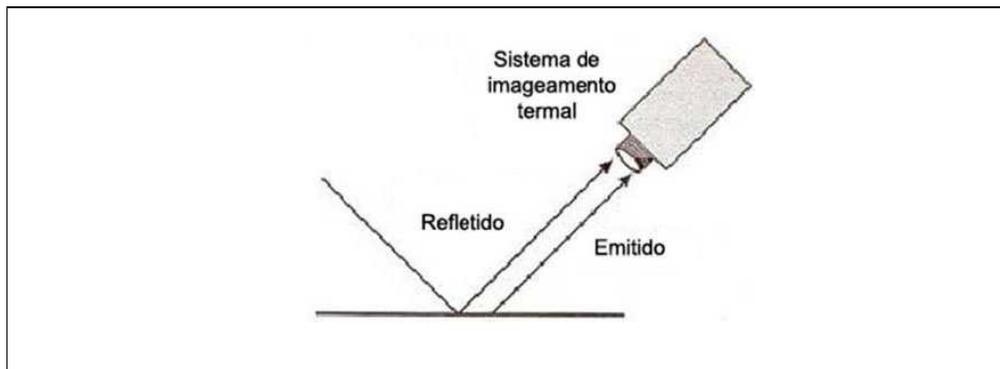


FIGURA D.1 - Um sistema de imageamento térmico pode medir apenas radiação. O sistema não pode separar a radiação emitida da radiação refletida

FONTE: HOLST, 2000, p. 64

### D.1 Sistema de imageamento térmico infravermelho

Os equipamentos de imageamento térmico infravermelho geram imagens que são os termogramas. Para a análise dos termogramas é necessário ter conhecimentos básicos e fundamentais de temperatura, transferência de calor, de radiatividade infravermelha do corpo e o programa de obtenção e tratamento da imagem térmica.

### D.1.1 Produção da imagem

A determinação de parâmetros para execução e compreensão dos procedimentos visa à uniformização e a universalização dos resultados.

Para o estudo óptico, os principais fatores a serem analisados são segundo Veratti e Maldague (2001):

- Campo de visão total, dado em graus e definido como sendo a porção angular sensorizada pelo sistema (depende não só da parte ótica como também do mecanismo de varredura) denominado TFOV (Total Field of View).
- Campo de visão instantâneo, dado em miliradianos e definido como sendo o ângulo sólido determinado pela projeção do detector na área em um dado instante. A área delimitada por essa projeção é chamada célula de resolução de pixel (IFOV – Instantaneous Field of View).
- Resolução geométrica. A célula de resolução, pixel, estabelece a capacidade do sistema em discernir entre dois pontos a uma dada distância. Esse parâmetro é determinado pelo IFOV, que é a área observada pelo detector em um determinado instante.
- Distância focal ( $f$ ), dada pela distância entre o centro da lente e o seu ponto focal.
- Diâmetro efetivo ( $D$ ), definido como o diâmetro realmente utilizado para a deflexão, o qual pode ser alterado pelo emprego de um diafragma.

A abertura ( $f/n^\circ$ ), segundo VERATTI (1992), é dada pela relação entre a distância focal e o diâmetro efetivo, segundo a equação:

$$f/n^\circ = \frac{f}{D} \quad (\text{VERATTI, 1992, cap. 2-p. 5}) \quad (\text{D.1})$$

Esquemáticamente, Maldague (2001) apresenta os fatores TFOV e IFOV no processo de imageamento termográfico (FIGURA D.2).

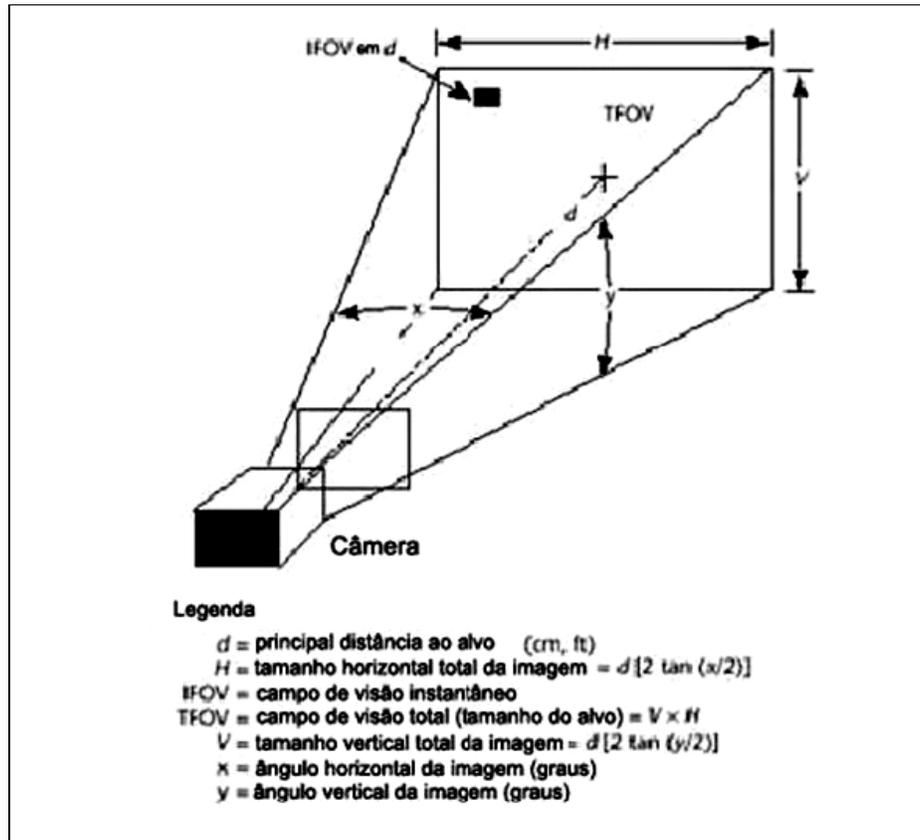


FIGURA D.2 - Determinação do campo total de visão para imageamento infravermelho

FONTE: MALDAGUE, 2001, p. 281

Pelo diagrama, pode-se determinar:

$$TFOV = V \times H \quad (D.2)$$

Onde:

$$V = d \left[ z \cdot \tan g \frac{y}{2} \right] \quad (D.3)$$

$$H = d \left[ z \cdot \tan g \frac{x}{2} \right] \quad (D.4)$$

Portanto, a distância da câmera termográfica está diretamente relacionada com o tamanho do alvo:

$$TFOV = d^2 \left[ z - \tan g \frac{y}{2} \right] \times \left[ z - \tan g \frac{x}{2} \right] \quad (D.5)$$

$$\sqrt{\frac{TFOV}{\left[ z - \tan g \frac{y}{2} \right] \times \left[ z - \tan g \frac{x}{2} \right]}} = d \quad (D.6)$$

#### D.1.2 Formação da imagem

O imageamento é a forma de apresentação térmica que permite a observação direta da distribuição de calor na superfície dos alvos estudados. O equipamento infravermelho só irá distinguir um objeto contra um plano de fundo se houver contraste suficiente entre ambos.

Maldague (2001), continua afirmando que o contraste é definido como a diferença entre a intensidade de radiação proveniente do objeto e do plano de fundo. Portanto, a capacidade do equipamento em distinguir entre dois pontos na imagem é chamada de Resolução Geométrica ou Resolução Óptica do sistema. Para a garantia de uma imagem de boa qualidade deve-se garantir:

- Contraste térmico;
- Boa resolução geométrica;

- Alta frequência de varredura;
- Sensibilidade;
- Boa resolução térmica.

Os parâmetros, a serem analisados na comparação, disponíveis são:

- MRTD (Minimum Resolvable Temperature of Difference);
- Sensibilidade térmica – Thermal Sensitivity (NETD);
- SNR – Ruído do Sinal;
- NEP – Força do Ruído;
- Detectividade específica –  $D^*$ ;
- Tamanho Mínimo Detectável;
- Campo de Temperatura;
- Precisão Absoluta.

#### D.1.2.1      Contraste térmico

Para Host (2000), a escolha da energia (tipo e potência) depende das propriedades do corpo e do problema a ser pesquisado. Portanto, a energia necessária para um contraste térmico será:

$$C = \frac{T_{\text{defeito}}(t) - T_{\text{defeito}}(t_0)}{T_{\text{sem defeito}}(t) - T_{\text{sem defeito}}(t_0)}$$

(D.7)

$$C = \frac{\Delta T_{\text{defeito}}}{\Delta T_{\text{sem defeito}}}$$

O valor máximo para um contraste térmico será uma função:

$$C = f(\text{energia(tipo / potência), tempo, profundidade}) \quad (\text{D.8})$$

O valor mínimo é aquele no qual é possível a percepção da existência da diferença térmica ( $\Delta T$  defeito). Abaixo desse valor não será possível a percepção e o corpo poderá ser considerado sem defeitos ( $\Delta T$  defeito = 0).

#### D.1.2.2      Mínima Resolução de Diferença de Temperatura – MRTD

O MRTD ou MRT pode ser definido como a menor diferença de temperatura do alvo, equivalente ao corpo negro que pode ser observado, sem ruídos de sistema, no termograma, segundo MALDAGUE (2001).

Para Veratti (1992), “O MRTD permite estabelecer a resolução térmica do equipamento. É obtido a partir da observação de uma sucessão de corpos negros de referência. O valor do MRTD, dado em graus centígrados...”.

Holst (2000) escreve que MRT e MDT não são valores absolutos, mas sim a percepção do diferencial de temperatura relativa para um dado corpo negro.

#### D.1.2.3      Sensibilidade Térmica – Thermal Sensitivity

De acordo com Holst (2000), a sensibilidade térmica refere-se à pequena diferença de temperatura que pode ser detectada pelo sistema. Depende muito de todas as propriedades “luminóticas” do sistema ótico, da resposta dos detectores e do ruído do sistema. Entenda-se ruído como um conjunto de incertezas presentes em todo o sistema. Afirma, ainda, que a sensibilidade térmica independe da resolução espacial.

Maldague (2001) define sensibilidade de temperatura como: “A sensibilidade de temperatura é a menor variação de temperatura do alvo que o instrumento detectará. É

também chamada de resolução térmica ou *noise equivalent temperature difference* (NETD)”. Maldague (2001) e Holst (2000) apresentam a fórmula para cálculo de NETD:

$$NETD = \frac{\Delta T}{SNR} \quad (D.9)$$

Onde:  $\Delta T$  → diferença de temperatura do alvo com a temperatura do corpo negro

$$\Delta T = T_{al} - T_{cn} \quad (D.10)$$

#### D.1.2.4 Taxa de Ruído do Sinal – SNR (*Signal-to Noise Ratio*)

O SNR é definido, segundo Maldague (2001), como sendo a razão da energia do sinal (alvo) pela energia do ruído (incertezas) do sistema.

E pode ser avaliada pela equação:

$$SNR = \frac{\eta q \Phi_{q.ms}}{\sqrt{\eta q^2 \Phi_q \Delta f}} \quad (D.11)$$

Onde:  $\eta$  → quantidade de eficiência (quantum efficiency);

$q$  → carga eletrônica de um elétron em unidade Coulomb;

$\Phi_{q.ms}$  → raiz quadrada do valor de flutuação.

$$\Phi_{q.ms} = \sqrt{\frac{1}{\tau}} \int_0^{\tau} \Phi q^2(t) dt \quad (D.12)$$

Onde:  $\Phi q$  → fluxo de fótons em “pacotes” por segundo que incidem no detector;

$\tau$  → constante do detector;

$\Delta f$  → medida da banda.

#### D.1.2.5 Força do Ruído – Noise Equivalent Power (NEP)

Para Maldague (2001), o *Noise Equivalent Power* (NEP) pode ser definido como:

*A capacidade para detectar pequenas quantidades de energia radiante é restringida pelo ruído no processo de detecção. Porque o ruído produz uma flutuação randômica na saída da radiação do detector, pode assim produzir uma máscara para o fraco sinal ótico. O ruído então delimita o fluxo espectral mínimo de entrada que pode ser detectado sob dadas condições. Uma descrição conveniente para este sinal mínimo detectável é o noise equivalent power (NEP), definido como o fluxo de radiação necessário para um dado sinal de saída igual ao ruído do detector. (MALDAGUE, 2001, p. 163).*

A quantificação do NEP apresentada por Maldague (2001) é:

$$NEP = \frac{\Phi_{signal}}{SNR} \quad (D.13)$$

Onde:  $\Phi_{sinal}$  → raiz quadrada do valor do fluxo do sinal =  $\sqrt{\phi q}$

O desempenho do detector foi criado, segundo Holst (2000), para classificar os semicondutores fotocondutivos. Existe um esforço constante para reduzir o ruído

(NEP). Assim criou-se a detectividade, ou seja:

$$D = \frac{1}{NEP} \quad (D.14)$$

Portanto, quanto maior o NEP (ruído) menor será a detectividade, ou seja, menor será a performance do detector. Devido à dependência direta do ruído, e do desempenho do material ao mecanismo do detector, normalizou-se uma detectividade específica  $D^*$ .

#### D.1.2.6 Detectividade específica

É a normalização do indicador de detectividade dos detectores e pode ser expresso, segundo Maldague (2001), Holst (2000) e Veratti (1992) como sendo:

$$D^* = \frac{\sqrt{A_{dec}} \Delta f}{NEP} \quad (D.15)$$

Onde:  $A_{dec}$  → área ativa do detector

$\Delta f$  → electronic bandwidth

#### D.1.2.7 Tamanho mínimo detectável

Maldague (2001) apresenta um diagrama esquemático do sistema ótico, FIGURA D.3 :

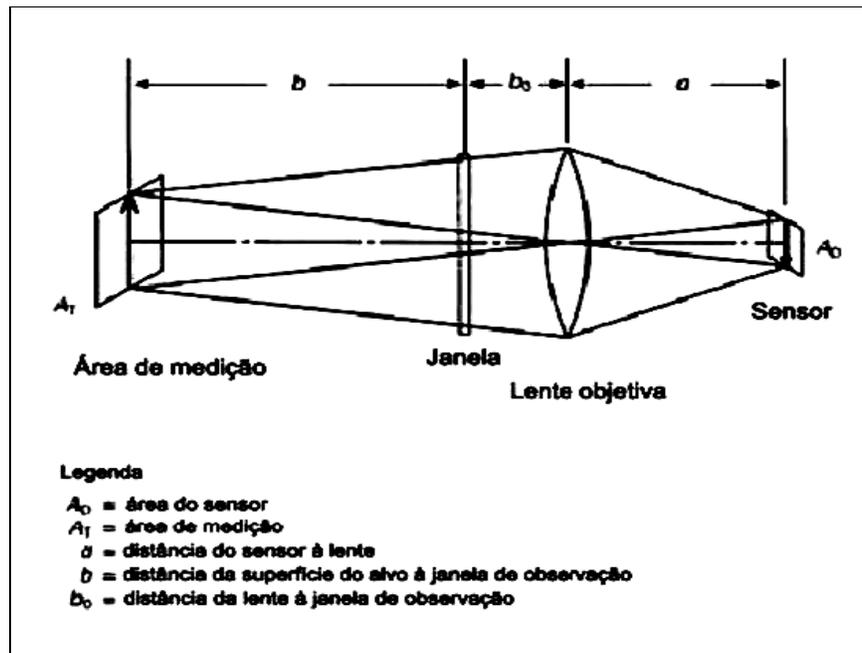


FIGURA D.3- Modelo óptico

FONTE: MALDAGUE, 2001, p. 134

A partir da FIGURA D.3, o autor apresenta a fórmula:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b + b_0} = \frac{1}{f} \quad (D.16)$$

Onde:  $f$  → comprimento focal da lente;

$a$  → separação entre o sensor infravermelho e a lente;

$b + b_0$  → distância da lente até a superfície do alvo.

E pode-se relacionar:

$$A_T = \left( \frac{b + b_o}{a} \right)^2 \cdot A_D \quad (\text{D.17})$$

A partir da relação, Maldague conclui que:

*O menor tamanho detectável, teoricamente, correspondente a uma imagem real da superfície do alvo projetada no sensor infravermelho, será medido pelas inserções de valores práticos pertinentes ao sistema de termografia infravermelho. Ao entrarmos com as equações anteriores,  $M_o = (A_r)^{0,5}$  pode ser deduzido para toda distância focal  $B = b + b_o$ . Quando o tamanho do alvo a ser medido é muito maior do que  $M_o$  a radiação da temperatura  $T_{rs}$  da superfície do alvo poderá ser determinada. Mas se o tamanho do alvo é muito menor que  $M_o$ , mesmo quando utilizar um equipamento ideal, com lente sem distorção, os dados obtidos não serão somente energia emitida da superfície do alvo, mas também a energia emitida do meio ao redor. O meio ao redor afeta o sinal e, portanto, a determinação na quantidade (valor) da temperatura. (MALDAGUE, 2001, p. 134)*

#### D.1.2.8      Faixas de temperatura

As faixas de temperatura representam a definição dos limites inferiores e superiores sobre os quais a temperatura do alvo pode ser medida pelo instrumento (MALDAGUE, 2001).

#### D.1.2.9 Precisão absoluta – Absolute accuracy

Segundo Maldague (2001) a precisão absoluta é:

*A precisão da temperatura, definida pelo Instituto Nacional de Padronização e Tecnologia Padronizada (National Institute of Standards and Technology Standard – NIST), entende o erro máximo, sobre todo o campo que a medida terá, quando*

*comparada com referência ao corpo negro padrão.” (MALDAGUE, 2001, p. 277-278).*

#### D.1.2.10      Resolução espacial

A resolução espacial fornece informação com respeito ao “último” detalhe que pode ser reconhecido (MALDAGUE, 2001). Para o autor, o atrativo para usar a resolução espacial é: “O atrativo da resolução espacial é que ela nos permite estimar o reconhecimento de pequenos detalhes do alvo”.

$$\text{Tamanho do alvo} = \theta_{\text{resolução}} \cdot R \quad (\text{D.18})$$

Onde:  $R \rightarrow$  distância máxima que o alvo pode ser reconhecido

$\theta_{\text{resolução}} \rightarrow$  resolução angular da câmera

Maldague (2001) afirma que: quando o tamanho do alvo é conhecido, a distância máxima que o alvo pode ser reconhecido é determinada:

$$R = \frac{\text{Tamanho alvo}}{\theta_{\text{resolução}}} \quad (\text{D.19})$$

Maldague (2001) apresenta uma síntese, QUADRO D.1, das técnicas termográficas, comparando suas aplicações nos controles dos processos, na detecção de descontinuidades e na caracterização dos materiais.

## QUADRO D.1

## Aplicações das técnicas da termografia infravermelha.

Técnica	Controle do processo	Detecção da descontinuidade	Caracterização do material
Termografia passiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiência do sistema de freios de automóveis, identificação do processo de reciclagem.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Paredes, avaliação de umidade, telhados, redes de encanamento, instalações elétricas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espessura do polimento em cerâmicas.</li> </ul>
Termografia com tempo modulado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inspeção de componentes estruturais de aeronaves,</li> <li>• Inspeção de encanamentos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificação de rachaduras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Força de adesão, avaliação de umidade.</li> </ul>
Termografia com pulso	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inspeção de componentes estruturais de aeronaves,</li> <li>• Armazenamento de água em edificações e delaminação de afrescos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrosão de metal, detecção de rachaduras, caracterização de defeitos em superfície (profundidade, tamanho)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propriedades termofísicas, umidade.</li> </ul>
Termografia com passo de calor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradação de chips de memória.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Defeitos em adesivos e em pontos de solda.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medição da espessura de coberturas.</li> </ul>

FONTE: MALDAGUE 2001, p.44.

Por fim, Maldague (2001) desenvolve uma comparação direta entre as técnicas de termografia passiva e ativa, apresentando vantagens e desvantagens de cada uma das técnicas, QUADRO D.2.:

## QUADRO D.2

Vantagens e limitações das técnicas de termografia infravermelha.

Técnica	Vantagens	Desvantagens
<u>Todas</u> as técnicas de termografia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapidez, inspeção de superfícies.</li> <li>• Facilidade de desenvolvimento</li> <li>• Segurança (sem radiações prejudiciais).</li> <li>• Facilidade de modelagem térmica numérica.</li> <li>• Facilidade de interpretação dos termogramas.</li> <li>• Grande versatilidade de aplicações</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissividade variável.</li> <li>• Perdas por resfriamento (convecção / radiação causam contrastes perturbadores).</li> <li>• Absorção de sinais infravermelhos pela atmosfera.</li> <li>• Dificuldade de obtenção de aquecimento uniforme.</li> <li>• Transições naturais de contrastes térmicos requerem câmeras infravermelhas de gravação rápida.</li> <li>• Necessidade de um corredor de visão linear entre a câmera infravermelha e o alvo.</li> <li>• Contrastes e sinais limitados ao ruído do sinal causando alarmes falsos.</li> </ul>
Termografia <u>passiva</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sem contato físico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Funciona apenas se o contraste térmico estiver presente naturalmente.</li> </ul>
Termografia <u>ativa</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sem contato físico.</li> <li>• Disponibilidade de modulação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requer observação por no mínimo um ciclo de modulação (observação mais longa em relação à termografia de pulso).</li> <li>• Requer aparato para induzir a perturbação do pulso térmico.</li> <li>• Computação de contrastes termais requer a priori conhecimento de zona sem defeito no campo de visão.</li> <li>• Inspeção de grandes superfícies simultaneamente.</li> <li>• Risco de superaquecimento do material.</li> </ul>

FONTE: Adaptado de MALDAGUE 2001, p.46.

## ANEXO E - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS

Utilizou-se como fonte referencial para obtenção dos índices e das propriedades físicas dos materiais, QUADRO E.1 e QUADRO E.2, a bibliografia científica. (INCROPERA 2003 e RÁZNJEVIC 1976).

QUADRO E.1

Unidades e nomenclatura.

Unidades e nomenclatura		
Condutividade térmica	W/(m.K)	<b>k</b>
Calor específico	J/ (kg.K)	<b>c</b>
Densidade	kg/m <sup>3</sup>	<b>ρ</b>
Difusividade térmica	m <sup>2</sup> /s	<b>α = k/(ρ.c)</b>

FONTE: DO AUTOR, 2007.

QUADRO E.2

Propriedades físicas dos materiais.

Material	T (°C)	K	c	ρ	α
Argila	0 a 20°C		1,089		
argila seca	25°C	0,930		1500/ 1600	0,000551
argila w= 0,447vol	23°C	1,675		1495	
argila w=0,487 vol	23°C	1,256		1545	
terra/ argila w = 28%	20°C	2,229		2000	
terra/ argila: sêca	20°C	1,512		1500	
Gesso	0 a 20°C		1,089		
plaster (embôço, rebôco)	20°C	0,628		1600	
	20°C	0,814		1800	
	20°C	1,012		2000	
	20°C	1,279		2200	
plaster inside (reboco interno)	20°C	0,698/ 0,930		1600/ 1800	
plaster outside	20°C	0,930/ 1,163		1600/ 1800	
<b>Madeira:</b>					
mogno ≠ fibras	25°C	0,151		700	8,59E-05
mogno = fibras	25°C	0,314		700	
Madeira	0 a 20°C		2,512		
carvalho ≠ fibras	0 a 20°C		2,386		
<b>Água (líquida)</b>	<b>T( °C)</b>	<b>K</b>	<b>c</b>	<b>ρ</b>	<b>α</b>
	20°C	0,598	4,183	1000	1,43E-04

FONTE: DO AUTOR, 2007