



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

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA
APLICAÇÃO DE ENSAIOS TÉRMICOS NÃO DESTRUTIVOS
NA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE OBRAS DE ARTE

Sinthya Gonçalves Tavares

Belo Horizonte, 23 de Novembro de 2006

Sinthya Gonçalves Tavares

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA
APLICAÇÃO DE ENSAIOS TÉRMICOS NÃO DESTRUTIVOS
NA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE OBRAS DE ARTE**

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. Roberto Márcio de Andrade
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2006

Ao meu querido avô

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que, direta ou indiretamente, tornaram possível a realização deste trabalho:

- a Deus que faz com que a ciência confirme os fatos que o coração já tinha, de alguma forma, descoberto;
- a espiritualidade que sempre se fez presente nos momentos mais difíceis e também nos mais belos. Meu carinho especial à Ana Luiza e seus amigos e à pequena Mariazinha;
- aos meus pais, Santos e Vânia, ao meu irmão Eduardo e à minha avó Edys que acreditaram no que tantos julgavam impossível;
- ad Antonio, per la sua presenza costante, collaborazione nella ricerca, consigli e soprattutto per il suo amore che mi dà forza e fa con che i miei giorni lontano da casa siano più leggeri;
- ao Professor Roberto Márcio de Andrade que acreditou neste projeto e não desistiu nem mesmo quando afrontamos as maiores dificuldades ou nos defrontamos com as negativas;
- al Prof. Enrico Primo Tomasini, per avermi accolto nel suo laboratorio, al Prof. Nicola Paone, per i valorosi consigli ed in speciale al Dr. Enrico Esposito, per l'essenziale collaborazione, suggerimenti tecnici e amicizia;
- ao Professor Geraldo Augusto Campolina França que me guiou nos primeiros passos do caminho da pesquisa científica;
- aos amigos, Ângela, Barbara, Cleide, Ilma, João Bosco, Mara, Marli e Marisa, que de longe ou de perto torceram por mim;
- ai miei cari amici italiani, Daniel, Massimo, Paolo e Francesco. Grazie ragazzi!
- aos amigos, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG;
- a tutti gli amici ed allo staff del Dipartimento di Meccanica dell'Università Politecnica delle Marche per il modo amichevole e umano in cui mi hanno accolto fra loro;
- à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro;
- to Eudald Guillamet and Pierre-Yves Letienne that inside of the projects LASERART and LASERACT had prepared the samples;
- to the colleagues of the INOE that had kindly promoted the execution of the tests *in situ*.

SUMÁRIO

NOTAÇÃO	vii
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xvi
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xix
RIASSUNTO	xx
1 – CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
2 – CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 – DEFEITOS EM OBRAS DE ARTE	9
2.2 – ENSAIOS TÉRMICOS NÃO DESTRUTIVOS	15
2.3 – MÉTODOS DE EXCITAÇÃO TÉRMICA APLICÁVEIS A ENSAIOS TÉRMICOS NÃO DESTRUTIVOS	23
2.3.1 – Termografia ativa e passiva	23
2.3.2 – Termografia pulsada	25
2.3.3 – Termografia modulada	29
2.3.4 – Termografia pulsada por fase	32
2.4 – FONTES DE INCERTEZA NA APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA	33
2.5 – VIBROMETRIA LASER DOPPLER	47
2.6 – CONCLUSÃO	51
3 – CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	54
3.2 – ENSAIOS LABORATORIAIS	55
3.2.1 – Amostras utilizadas – domínio físico	55
3.2.2 – Bancada de testes	62
3.3 – METODOLOGIA PARA DIAGNÓSTICO DE OBRAS DE ARTE ATRAVÉS DE NDTE	66
3.4 – VALIDAÇÃO DOS ENSAIOS TERMOGRÁFICOS	77
3.4.1 – Modelo matemático	77
3.4.2 – Vibrometria laser Doppler	81
3.5 – ENSAIOS <i>IN SITU</i>	82
3.5.1 – Igreja de São Nicolau (Bălinești)	83

3.5.2 – Igreja do Monastério Popăuți (Botoșani)	85
3.5.3 – Igreja da Ressurreição (Monastério de Sucevița)	88
3.6 – CONCLUSÃO	90
4 – CAPÍTULO IV – RESULTADOS	92
4.1 – AFRESCOS	93
4.1.1 – Amostras P0, P1, P2 e P3	93
4.1.2 – Échantillons 1, 4 e 5	113
4.2 – OBRAS EM MADEIRA	123
4.2.1 – Amostras 1/2 e 3/2	123
4.2.2 – Ícone Bizantino	127
4.3 – ESTUDO <i>IN SITU</i>	131
4.3.1 – Igreja de São Nicolau (Bălinești)	131
4.3.2 – Igreja do Monastério Popăuți (Botoșani)	135
4.3.3 – Igreja da Ressurreição (Monastério de Sucevița)	136
4.4 – CONCLUSÃO	139
5 – CAPÍTULO V – CONCLUSÕES	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148
ANEXO I	156
ANEXO II	158

NOTAÇÃO

Caracteres

A	Amplitude	m
a	Variável da equação da discretização	
C	Contraste	
c	Coefficiente de sensibilidade	
C_p	Calor específico do material	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
D	Decaimento temporal da intensidade	
d	Profundidade da falha	m
e	Emissividade	
F	Transformada de Fourier	
f	Frequência	Hz
h_c	Coefficiente convectivo	$W.m^{-2}.K^{-1}$
i	Número imaginário	
I_m	Componente imaginária da transformada de Fourier	
j	Número imaginário	
k	Condutividade térmica	$W.m^{-1}.K^{-1}$
k_n	Número de bits do conversor analógico digital da termocâmara	
L	Dimensão na direção z	m
$L(\lambda,T)$	Função de Planck	$W.m^{-2}.\mu m^{-1}$
N	Número de imagens	
n	Índice da imagem	
Q	Impulso térmico	$J.m^{-2}$
RDRF	Função resistiva da perturbação relativa da termocâmara	
Re	Componente real da transformada de Fourier	
S	Sinal elétrico de saída	V
$sys(\lambda)$	Sensibilidade espectral da termocâmara	
T	Temperatura	$^{\circ}C, K$
t	Tempo	s
u	Incerteza padrão de medição	$^{\circ}C$
u_n	Incremento da frequência	Hz
V_n	Ruído do canal elétrico	V

v	Velocidade	m.s^{-1}
XL	Dimensão da amostra na direção x (comprimento)	m
x, y, z	Sistema cartesiano de coordenadas	
YL	Dimensão da amostra na direção y (largura)	m
ZL	Dimensão da amostra na direção z (espessura)	m

Letras gregas

α	Difusividade térmica	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
Δ	Varição	
ε	Emissividade	
ϕ	Fase	rad
λ	Comprimento de onda	μm
μ	Comprimento da difusão térmica	m
ρ	Massa específica	kg.m^{-3}
τ	Transmissividade do meio	
υ	Graus de liberdade	
ω	Frequência angular	rad.s^{-1}
ζ	Espessura	m

Subscrito

0	Refere a modulação da temperatura inicial
0	Refere a tempo inicial
∞	Refere a temperatura do meio
∞	Refere a tempo infinito
ε	Refere a emissividade
τ	Refere a transmissividade
a	Refere a ambiente do ensaio
B	Refere ao ponto no volume de controle anterior onde a variável é avaliada
b	Refere ao ponto na face anterior onde a variável é avaliada
ba	Refere a ambiente do ensaio
bb	Refere ao corpo negro padrão

D	Refere a Doppler
DTR	Refere a resolução digital da temperatura
E	Refere ao ponto no volume de controle leste onde a variável é avaliada
e	Refere ao ponto na face leste onde a variável é avaliada
eff	Refere a graus de liberdade efetivo
F	Refere ao ponto no volume de controle posterior onde a variável é avaliada
f	Refere ao ponto na face posterior onde a variável é avaliada
i	Refere a um pixel na imagem termográfica sobre uma área com defeito
in	Refere a incerteza intrínseca
m	Refere a medida efetuada
max	Refere a máximo
ME	Refere ao mínimo erro
MU	Refere a uniformidade da medição
N	Refere ao ponto no volume de controle norte onde a variável é avaliada
n	Refere ao ponto na face norte onde a variável é avaliada
NGE	Refere a erro gerado por ruído
ob	Refere a objeto
out	Refere ao sinal fornecido pela termocâmara
P	Refere ao ponto no volume do controle onde as variáveis são calculadas
r	Refere ao ensaio
RE	Refere a repetibilidade
S	Refere ao ponto no volume de controle sul onde a variável é avaliada
s	Refere ao ponto na face sul onde a variável é avaliada
s	Refere a um pixel na imagem termográfica sobre uma área sem defeito
span	Refere a faixa nominal
T	Refere a temperatura do meio
TS	Refere a estabilidade da temperatura
u	Refere ao incremento de frequência
W	Refere ao ponto no volume de controle oeste onde a variável é avaliada
w	Refere ao ponto na face oeste onde a variável é avaliada

Sobrescrito

0 Refere a um tempo presente

Abreviaturas

CCD	Charged couple devise
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
DTR	Resolução digital da temperatura
EDXRF	Energy dispersive X-ray fluorescence
FFT	Fast Fourier Transform
IFOV	Campo de visão instantâneo
INOE	National Institute of Research and Development for Optoelectronics
IR	Resolução da imagem
ITEF	Istituto per le Tecnologia della Construzione
LDV	Vibrometria laser Doppler
MDTD	Mínima diferença de temperatura identificável
ME	Mínimo erro
MG	Minas Gerais
MRTD	Mínima resolução da diferença de temperatura
MSR	Resolução espacial da medição
MT	Termografia modulada
MU	Uniformidade da medição
NDTE	Ensaio térmico não destrutivo
NETD	Sensibilidade térmica
NGE	Erro gerado por ruído
PPT	Termografia modulada por fase
PT	Termografia pulsada
PTB	Physikalisch Technische Bundesanstalt
PZT	Atuador piezoelétrico
RE	Repetibilidade
RMS	Root mean square
SLDV	Scanning laser Doppler vibrometry
SNR	Signal-to-noise ratio
SRF	Resolução espacial
TPM	Total quality management
TQC	Total quality control
TRIR	Step heating thermography time-resolved infrared radiometry

TS Estabilidade da temperatura

Constante

C₂ Constante 14387,86 x 10⁻⁶ m.K

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura típica em afrescos	10
Figura 2.2 – Descolamentos em afrescos	12
Figura 2.3 – Estrutura típica de pintura sobre madeira	13
Figura 2.4 – Perfil de temperatura em amostras com e sem presença de falha	22
Figura 2.5 – Decaimento da temperatura superficial em regiões com e sem defeito de uma amostra	23
Figura 2.6 – Interferômetro Mach-Zender	47
Figura 2.7 – Interferômetro de Michelson	48
Figura 2.8 – Sistemas SLDV	49
Figura 3.1 – Amostra P3	55
Figura 3.2 – Dimensões das amostras P0, P1, P2 e P3	56
Figura 3.3 – Localização das falhas internas nas amostras P1, P2 e P3	57
Figura 3.4 – Échantillons 1, 4 e 5	58
Figura 3.5 – Dimensões das Échantillons 1, 4 e 5	58
Figura 3.6 – Localização das falhas internas nas Échantillons 1, 4 e 5	59
Figura 3.7 – Amostras 1/2 e 3/2	60
Figura 3.8 – Dimensões das amostras em madeira 1/2 e 3/2	60
Figura 3.9 – Localização da falha nas amostras 1/2 e 3/2	61
Figura 3.10 – Amostra – Ícone Bizantino	62
Figura 3.11 – Dimensões da amostra – Ícone Bizantino	62
Figura 3.12 – Esquema da bancada de testes	63
Figura 3.13 – Bancada de testes	63
Figura 3.14 – Sistema de excitação térmica	64
Figura 3.15 – Detalhe da montagem de uma das lâmpadas	64
Figura 3.16 – Sistema de acionamento das lâmpadas	64
Figura 3.17 – Volume de Controle P nos planos xy, xz e yz	79
Figura 3.18 – Igreja de São Nicolau (Bălinești) – visão geral e planta construtiva	83
Figura 3.19 – Igreja de São Nicolau (Bălinești) – portal de entrada e detalhes da decoração externa	84
Figura 3.20 – Igreja de São Nicolau (Bălinești) – painéis externos avaliados utilizando-se termografia	84

Figura 3.21 – Igreja de São Nicolau (Bălinești) – afrescos avaliados utilizando-se SLDV	85
Figura 3.22 – Igreja do Monastério de Popăuți (Botoșani) – visão geral e detalhe da decoração externa	86
Figura 3.23 – Igreja do Monastério de Popăuți (Botoșani) – mural de afresco antes (a), durante (b) e após (c) processo de restauro	87
Figura 3.24 – Igreja do Monastério de Popăuți (Botoșani) – bancada de testes vibrométricos (a), afrescos avaliados pela SLDV (b) e estruturas investigadas através da termografia (c)	87
Figura 3.25 – Igreja da Ressurreição (Monastério de Sucevița) – afresco interno e visão externa	88
Figura 3.26 – Igreja da Ressurreição (Monastério de Sucevița) – afrescos internos avaliados pela SLDV (a), afrescos externos avaliados pela SLDV (b), área da parede norte avaliada pela termografia (c), área da parede sul avaliada pela termografia (d)	89
Figura 4.1 – Áreas A1 e A2 analisadas em P0	94
Figura 4.2 – Decaimento de temperatura das áreas A1 e A2 – 0,50 m e 0,66 m	94
Figura 4.3 – Decaimento de temperatura das áreas A1 e A2 – aquecimento horizontal e vertical	95
Figura 4.4 – Decaimento de temperatura de P0 – variação da emissividade	96
Figura 4.5 – Decaimento de temperatura de P0 – efeito das cores	97
Figura 4.6 – Análise em RMS de P0	98
Figura 4.7 – Contraste térmico de P2	98
Figura 4.8 – Imagem térmica de P2 – $C(t)_{\max}$	99
Figura 4.9 – Decaimento de temperatura de P2 – áreas com e sem defeito	100
Figura 4.10 – Decaimento de temperatura de P2 – experimental x teórico ($2,8 \times 10^4$ J)	100
Figura 4.11 – Análise em RMS de P2	101
Figura 4.12 – Mapa de amplitude e fase de vibração de P2 (925 Hz)	101
Figura 4.13 – Decaimento de temperatura de P2 – experimental x teórico ($1,4 \times 10^4$ J)	103
Figura 4.14 – Termografia pulsada – amostra P2 ($2,8 \times 10^4$ J e $d = 0,66$ m)	104
Figura 4.15 – Termografia modulada – amostra P2	105
Figura 4.16 – Decaimento de temperatura de P3 – experimental x teórico ($2,4 \times 10^4$ J)	106
Figura 4.17 – Decaimento de temperatura – P2 x P3 ($2,4 \times 10^4$ J e $1,4 \times 10^4$ J)	106
Figura 4.18 – Termografia pulsada – amostra P3 ($2,4 \times 10^4$ J e $d = 0,50$ m)	107

Figura 4.19 –	Análise em RMS de P3 – excitação com caixa acústica (a) e PZT (b)	108
Figura 4.20 –	Mapa de amplitude e fase de vibração de P3 (900 Hz)	108
Figura 4.21 –	Termografia modulada – amostra P3	109
Figura 4.22 –	Termografia pulsada – amostra P1 ($5,6 \times 10^4$ J e $d = 0,55$ m)	110
Figura 4.23 –	Aquecimento e decaimento de temperatura – P1 ($10,0 \times 10^4$ J e $14,0 \times 10^4$ J)	111
Figura 4.24 –	Termografia modulada – amostra P1	111
Figura 4.25 –	Análise em RMS de P1 – excitação com caixa acústica (a) e PZT (b)	112
Figura 4.26 –	Mapa de amplitude (a) e fase (b) de vibração de P1 (2750 Hz) – excitação com caixa acústica	113
Figura 4.27 –	Mapa de amplitude (a) e fase (b) de vibração de P1 (2750 Hz) excitação com PZT	113
Figura 4.28 –	Decaimento de temperatura da Échantillon 1 – efeito das cores	114
Figura 4.29 –	Contraste térmico da Échantillon 1	114
Figura 4.30 –	Imagem térmica da Échantillon 1 – $C(t)_{\max}$	115
Figura 4.31 –	Decaimento de temperatura da Échantillon 1 – experimental x teórico ...	116
Figura 4.32 –	Análise em RMS da Échantillon 1	116
Figura 4.33 –	Mapa de amplitude (a) e fase (b) de vibração da Échantillon 1	117
Figura 4.34 –	Termografia modulada – Échantillon 1	118
Figura 4.35 –	Decaimento de temperatura da Échantillon 4 – experimental x teórico ...	119
Figura 4.36 –	Termografia modulada – Échantillon 4	119
Figura 4.37 –	Mapa RMS (a) e mapas de amplitude (b) e fase (c) de vibração da Échantillon 4	120
Figura 4.38 –	Decaimento de temperatura da Échantillon 5 – experimental	121
Figura 4.39 –	Termografia pulsada – Échantillon 5	122
Figura 4.40 –	Decaimento de temperatura da Échantillon 5 – teórico	122
Figura 4.41 –	Mapa RMS (a) e mapas de amplitude (b) e de fase (c) de vibração da Échantillon 5	123
Figura 4.42 –	Decaimento de temperatura da amostra 1/2 – emissividade média	124
Figura 4.43 –	Decaimento de temperatura da amostra 1/2 – emissividade local	125
Figura 4.44 –	Decaimento de temperatura da amostra 3/2 – experimental x teórico	126
Figura 4.45 –	Termografia modulada – amostra 3/2	126
Figura 4.46 –	Mapa RMS – amostras 1/2 e 3/2	127
Figura 4.47 –	Mapa de amplitude (a) e fase (b) de vibração da amostra 1/2	127

Figura 4.48 –	Decaimento de temperatura – ícone Bizantino	128
Figura 4.49 –	Decaimento de temperatura – ícone Bizantino (experimental x teórico) .	129
Figura 4.50 –	Decaimento de temperatura – ícone Bizantino com defeitos simulados ($3,0 \times 10^4$ J)	130
Figura 4.51 –	Decaimento de temperatura – ícone Bizantino com defeitos simulados ($1,8 \times 10^4$ J)	130
Figura 4.52 –	Igreja de São Nicolau (Bălinești) – portal de entrada (setor leste superior)	131
Figura 4.53 –	Igreja de São Nicolau (Bălinești) – portal de entrada (setor leste inferior)	132
Figura 4.54 –	Igreja de São Nicolau (Bălinești) – portal de entrada (setor oeste superior)	133
Figura 4.55 –	Igreja de São Nicolau (Bălinești) – painéis (setor sul)	133
Figura 4.56 –	Igreja de São Nicolau (Bălinești) – afrescos (parede leste)	134
Figura 4.57 –	Igreja de São Nicolau (Bălinești) – afrescos (paredes norte e oeste)	134
Figura 4.58 –	Igreja do Monastério de Popăuți (Botoșani) – arco do nártex	135
Figura 4.59 –	Igreja do Monastério de Popăuți (Botoșani) – antiga entrada do nártex ..	135
Figura 4.60 –	Igreja do Monastério de Popăuți (Botoșani) – afrescos do nártex	136
Figura 4.61 –	Igreja da Ressurreição (Mosteiro de Sucevița) – afresco da parede norte avaliado pela termografia	137
Figura 4.62 –	Igreja da Ressurreição (Mosteiro de Sucevița) – parede sul avaliada pela termografia	137
Figura 4.63 –	Igreja da Ressurreição (Mosteiro de Sucevița) – afrescos da parede sul avaliados pela SLDV	138
Figura 4.64 –	Igreja da Ressurreição (Mosteiro de Sucevița) – afrescos internos (câmara mortuária) avaliados pela SLDV	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	–	Propriedades das amostras P0, P1, P2 e P3	57
Tabela 3.2	–	Propriedades das Échantillons 1, 4 e 5	59
Tabela 3.3	–	Propriedades das amostras 1/2 e 3/2	61
Tabela 3.4	–	Propriedades da amostra de Ícone Bizantino	62
Tabela 3.5	–	Características da termocâmara FLIR ThermaCAM TM S40	65
Tabela 3.6	–	Características da termocâmara Nippon Neo Thermo TVS-600 Series	90
Tabela 4.1	–	Relação sinal-ruído para as diversas cores da amostra P2	102
Tabela 4.2	–	Localização dos defeitos da Échantillon 5 fornecidos pela MT	122
Tabela A.II.1	–	Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P0 (d _{termoc._amostra} = 0,50 m)	159
Tabela A.II.2	–	Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P0 (d _{termoc._amostra} = 0,66 m)	159
Tabela A.II.3	–	Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P0 (Q = 1,4 x 10 ⁴ J; d _{termoc._amostra} = 0,50)	160
Tabela A.II.4	–	Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P0 (variação da emissividade; Q = 2,8 x 10 ⁴ J; d _{termoc._amostra} = 0,50 m)	160
Tabela A.II.5	–	Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P0 (efeito das cores; Q = 2,8 x 10 ⁴ J; d _{termoc._amostra} = 0,50 m)	161
Tabela A.II.6	–	Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P2 (Q = 2,8 x 10 ⁴ J; d _{termoc._amostra} = 0,50 m)	161
Tabela A.II.7	–	Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P2 (Q = 1,4 x 10 ⁴ J)	162
Tabela A.II.8	–	Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P2 (Q = 2,8 x 10 ⁴ J; d _{termoc._amostra} = 0,66 m)	162
Tabela A.II.9	–	Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P2 (termografia modulada)	163
Tabela A.II.10	–	Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P3 (Q = 2,4 x 10 ⁴ J; d _{termoc._amostra} = 0,50 m)	163
Tabela A.II.11	–	Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P1 (Q = 5,6 x 10 ⁴ J; d _{termoc._amostra} = 0,55 m)	164

Tabela A.II.12 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P1 (termografia modulada)	164
Tabela A.II.13 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Échantillon 1 (efeito das cores; $Q = 2,8 \times 10^4$ J; $d_{\text{termoc. amostra}} = 1,00$ m)	165
Tabela A.II.14 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Échantillon 1 ($Q = 2,8 \times 10^4$ J; $d_{\text{termoc. amostra}} = 1,00$ m)	165
Tabela A.II.15 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Échantillon 1 (termografia modulada)	166
Tabela A.II.16 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Échantillon 4 ($Q = 1,7 \times 10^4$ J; $d_{\text{termoc. amostra}} = 1,00$ m)	166
Tabela A.II.17 – Planilha para cálculo da incerteza de medição IM – Échantillon 4 (termografia modulada)	167
Tabela A.II.18 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Échantillon 5 ($Q = 4,2 \times 10^4$ J; $d_{\text{termoc. amostra}} = 1,00$ m)	167
Tabela A.II.19 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra 1/2 (emissividade média; $Q = 3,2 \times 10^4$ J; $d_{\text{termoc. amostra}} = 0,60$ m)	168
Tabela A.II.20 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra 3/2 ($Q = 4,8 \times 10^4$ J; $d_{\text{termoc. amostra}} = 0,60$ m)	168
Tabela A.II.21 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Ícone Bizantino ($Q = 3,0 \times 10^4$ J; $d_{\text{termoc. amostra}} = 0,70$ m)	169

RESUMO

O reconhecimento da importância da pesquisa científica e de suas aplicações na determinação do estado de conservação de obras de arte tem tido um grande crescimento com o passar dos anos, permitindo que, nos dias atuais, diversas metodologias de diagnóstico estejam disponíveis. A capacidade de identificar elementos não visíveis em estruturas, umidade não aparente, presença de falhas internas e descolamentos das camadas que compõem afrescos e pinturas sobre madeira e destacamentos das pastilhas de mosaicos, aliada ao baixo custo de implementação em relação a outras técnicas já consagradas no setor, como a vibrometria laser Doppler, têm colocado a termografia como uma opção viável ao diagnóstico de bens culturais. Porém, a inexistência de um procedimento padrão para a aplicação da técnica tem gerado freqüentes falsos alarmes de irregularidades. Adicionalmente, pouca atenção tem sido dada às possíveis fontes de incerteza, o que coloca em dúvida sua confiabilidade metrológica. Neste trabalho, é proposta uma metodologia para a aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte onde são levados em consideração mecanismos de avaliação e redução de incertezas. Os ensaios laboratoriais foram realizados no *Laboratorio di Misure Meccaniche e Termiche* do *Dipartimento di Meccanica* da *Università Politecnica delle Marche* – Itália. Os conjuntos de amostras utilizados foram confeccionados por especialistas em restauração e reproduzem a estrutura e composição dos materiais empregados na confecção de afrescos e obras sobre madeira. Falhas internas foram simuladas de forma a reproduzir reais descolamentos entre as camadas. Os resultados experimentais foram comparados com os obtidos através da solução numérica do modelo matemático desenvolvido em ambiente FORTRAN[®] e com as respostas fornecidas pela implementação da vibrometria laser Doppler. Provas *in situ*, utilizando a termografia e a vibrometria, foram realizadas no norte da Romênia, tendo como objetivo identificar presença de umidade, estruturas não visíveis, inclusões não aparentes, materiais de origens diversas, destacamentos das camadas superficiais e características da alvenaria que constitui a Igreja de São Nicolau em Bălinești, a Igreja do Monastério Popăuți em Botoșani e a Igreja da Ressurreição localizada no interno dos muros do Monastério de Sucevița. A utilização da metodologia proposta esclareceu as possibilidades e limitações da termografia. O modelo matemático validou os dados experimentais. A comparação com a vibrometria permitiu identificar as vantagens da utilização de uma e outra técnica situando o poder limítrofe de cada uma quando aplicadas ao diagnóstico de obras de arte.

ABSTRACT

The acknowledgement of the scientific research importance and its applications in the determination of the works of art conservation state has had a great increase with passing of the years, allowing that, in the current days, diverse diagnostics methodologies be available. The capacity in identifying non visible elements in structures, non apparent humidity, presence of internal imperfections and detachments of the layers that compose frescoes and paintings on wood and detachments of the tablets in mosaics, associated to the low cost of implementation in relation to others techniques consecrated in the sector, as the laser Doppler vibrometry, has placed the thermography as a viable option to the cultural goods diagnostic. However, the inexistence of a standard procedure for the technique application has generated frequent false alarms of irregularities. Additionally, little attention has been given to the possible sources of uncertainty, what it places in doubt the metrological trustworthiness of the technique. In this work is proposal a methodology for the non destructive thermal testing application in the evaluation of works of art integrity which taken in consideration mechanisms of uncertainties evaluation and reduction. The laboratorial tests had been carried out in the Mechanical and Thermal Measurement Laboratory of the *Università Politecnica delle Marche* Mechanical Department. The sets of samples used had been prepared for specialists in restoration and reproduce the structure and composition of the materials used in frescoes and works on wood. Internal imperfections had been simulated in way to reproduce real detachments between the layers. The experimental results are compared with the gotten ones through the numerical solution of the mathematical model developed in environment FORTRAN® and with the answers supplied for the implementation of the laser Doppler vibrometry. Tests *in situ*, using the thermography and the vibrometry, had been carried out in the north of the Romania, having as objective to identify presence of humidity, non visible structures, non apparent inclusions, material of diverse origins, detachments of the superficial layers and characteristic of the masonry that constitutes the Church of San Nicholas in Bălinești, the Church of the Popăuți Monastery in Botoșani and the Church of the Resurrection located in the intern of the Sucevița Monastery walls. The use of the proposal methodology clarified the possibilities and limitations of the thermography. The mathematical model validated the experimental data. The comparison with the vibrometry allowed identifying the advantages of both techniques pointing out the bordering power of each one when applied to works of art diagnostic.

RIASSUNTO

Il riconoscimento dell'importanza della ricerca scientifica e delle sue applicazioni nella determinazione dello stato di conservazione delle opere d'arte ha avuto un grande sviluppo negli ultimi anni, premettendo che attualmente, sono disponibili diverse metodologie di diagnostica. La capacità nell'identificare gli elementi non visibili nelle strutture, l'umidità non apparente, la presenza delle imperfezioni interne, i distaccamenti degli strati negli affreschi, i distacchi delle tessere che compongono i mosaici, e relativamente alla peculiarità del basso costo d'implementazione rispetto ad altre tecniche già consacrate nel settore, come la vibrometria laser Doppler, ha posto la termografia come una valida alternativa alla diagnostica dei beni culturali. Tuttavia, l'inesistenza di una procedura standard per l'applicazione della tecnica ha generato frequenti falsi allarmi d'irregolarità. È da aggiungere ulteriormente, la poca attenzione alle possibili fonti di incertezza di misura, che scaturisce dubbi sulla confidenza metrologica. In questo lavoro è proposta una metodologia per l'applicazione di prove non distruttive termiche nella valutazione dell'integrità delle opere d'arte nella quale sono presi in considerazione i meccanismi di valutazione e riduzione delle incertezze di misura. Le prove in laboratorio sono state realizzate nel Laboratorio di Misure Meccaniche e Termiche del Dipartimento di Meccanica dell'Università Politecnica delle Marche – Italia. I campioni usati sono stati confezionati per esperti in restauro e riproducano la struttura e la composizione dei materiali utilizzati nella produzione degli affreschi e opere su legno. All'interno dei campioni sono state simulate delle imperfezioni che riproducono i distacchi reali fra gli strati. I risultati sperimentali sono stati confrontati e relazionati con quelli ottenuti attraverso la soluzione numerica del modello matematico sviluppato nell'ambiente FORTRAN[®] e con le risposte fornite dall'esecuzione della vibrometria laser Doppler. Sono state condotte prove *in situ*, impiegando la termografia e la vibrometria, su alcune chiese nel nord della Romania, avendo come obiettivo quello di identificare la presenza di umidità, di strutture non visibili, di inclusioni non apparenti, di materiale di origini varie, di distaccamenti degli strati superficiali degli intonaci e la valutazione della tipologia muraria della chiesa di San Nicola a Bălinești, della chiesa del Monastero di Popăuți a Botoșani e della chiesa della Resurrezione situata all'interno del Monastero di Sucevița. L'uso della metodologia proposta ha chiarito le possibilità e le limitazioni della termografia. Il modello matematico ha convalidato i dati sperimentali. Il confronto con la vibrometria ha permesso di valutare i vantaggi dell'uso di una o dell'altra tecnica ed il potenziale operativo di entrambi le tecniche quando applicate in modo integrato alla diagnostica di opere d'arte.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem crescido bastante o interesse na utilização de técnicas não destrutivas e não intrusivas no diagnóstico de sistemas dos mais diversos tipos e origens.

Seguindo esta vertente, fatores como o amplo espectro aplicativo, com utilizações que vão desde uma simples operação de detecção da presença de objetos em ambientes não iluminados até o diagnóstico de algumas doenças, passando pela identificação de defeitos e inclusões não aparentes em estruturas de concreto e obras de arte, tem agregado, cada vez mais, valor aos ensaios térmicos não destrutivos, ou *Non Destructive Thermal Evaluation* – NDTE (Dowling *et al.*, 1998; Titman, 2001). Por sua vez, a utilização de sistemas térmicos sem contato tem ganhado força devido às vantagens expressivas sobre os sistemas com contato, como a facilidade de operação, a alta velocidade da medição e obtenção de respostas, a relativa facilidade na interpretação de resultados e a possibilidade de utilização sobre objetos em movimento (Chrzanowski, 2001a; Maldague, 2000; Titman, 2001).

No campo da engenharia, a plena comercialização dos sistemas infravermelhos, aliada à necessidade de implementação de ensaios de caráter não intrusivo, ampliou a utilização de pirômetros, termo-scanners e termocâmeras nos mais diversos segmentos industriais em todo o mundo (Chrzanowski, 2001a; Balaras e Argiriou, 2002). Neste caso, especial destaque pode ser dado à termografia, tratada na maioria da literatura, e neste trabalho, como sinônimo de NDTE.

Com base na análise do campo de temperatura, a termografia é capaz de identificar anomalias no funcionamento de equipamentos sem que seja necessária a interrupção do processo produtivo, assim como revelar a existência, quantificar e qualificar defeitos internos em materiais, quando a estrutura vem submetida a uma excitação térmica (Krapez *et al.*, 1994; Clark, McCann e Forde, 2003). Isto porque o processo de difusão térmica, afetado pela presença de falhas, inclusões, umidade, dentre outras ocorrências, gera uma alteração do campo de temperatura superficial da estrutura em comparação ao campo de temperatura gerado por uma estrutura íntegra (Tavares, Cunha e Andrade, 2005b).

Do ponto de vista da estimulação térmica, a termografia pode ser classificada em ativa e passiva (Maldague, 2000). Na termografia passiva, condições de contorno naturais são consideradas uma vez que meios artificiais para o estímulo térmico não são empregados. Neste caso, deve existir uma diferença natural de temperatura entre o objeto sob estudo e o meio onde ele está inserido (Maldague, 2000; Tavares, Cunha e Andrade, 2005a). O problema da utilização da termografia passiva está associado às características qualitativas do resultado

obtido, o que leva os avaliadores, em situações onde se deseja obter resultados com características mais quantitativas, a considerar os métodos ativos.

Na termografia ativa, várias metodologias de excitação térmica podem ser empregadas, porém a escolha do tipo de estímulo térmico a ser utilizado está atrelada não só às características da superfície a ser testada, mas também ao tipo de informação requerida (Maldague, 2000; Carlomagno e Meola, 2002). As técnicas mais comumente empregadas são a termografia pulsada (*Pulsed Thermography*), a termografia modulada (*Modulated* ou *Lock-in Thermography*) e a termografia pulsada por fase (*Pulsed Phase Thermography*).

As vantagens e características fizeram com que, com o objetivo de identificar falhas no isolamento térmico em edifícios não residenciais, a técnica fosse incluída, a partir de Abril de 2002, nas normas britânicas de construção civil, *Building Regulations* (Clark, McCann e Forde, 2003).

Trabalhos no setor médico têm também utilizado a termografia como ferramenta na obtenção de dados, como, por exemplo, em Adams *et al.* (1998) onde a técnica foi empregada na identificação de perdas de calor em incubadoras. No Brasil, as aplicações médicas da técnica têm sido apresentadas em algumas publicações como Vieira (2005). Destaca-se ainda, a sua utilização no controle de qualidade de semicondutores (Talwar, Jogai e Loehr, 1998), na indústria de tintas com o objetivo de determinar o tempo de secagem (Can, 1998), na avaliação de fadiga em materiais (Luong, 1995), na identificação de vazamento em canais (Engelbert, Hotchkiss e Kelly, 1997), no controle de processo e qualidade do produto na indústria cerâmica (Andrade, 1999), dentre outras aplicações.

Tem-se notado, ainda, a inclusão da termografia em programas de manutenção preventiva e preditiva. Utilizada na avaliação da integridade estrutural das aeronaves (Ciliberto, Cavaccini e Salvetti, 2002) e seus componentes (Zweschper *et al.*, 2002), as vantagens da aplicação da termografia durante as manutenções periódicas, indispensáveis ao setor, eram já destacadas por Sampath (1991). Segundo ele, 80% do custo dos testes efetuados nestas ocasiões decorrem do tempo requerido de imobilização do equipamento, que gira em torno de dez dias. A redução deste tempo, obtida pela substituição dos testes tradicionais, tipo ponto a ponto, pela termografia, de característica mais global e que fornece respostas em tempo real, refletiu diretamente nos custos operacionais, sem prejuízo aos fatores de segurança ou desempenho das aeronaves. Estudos posteriores, como o publicado na *Maintenance Technology Magazine*, em sua edição de julho de 2001, indicam que, apesar da necessidade de um investimento

inicial para a aquisição do equipamento relativamente alto, existe uma relação custo/benefício da ordem de 1:4 no uso da termografia em programas de manutenção preditiva, podendo chegar a 1:20 se forem consideradas as perdas de produção decorrentes de paradas no processo (Sanor, 2001).

Também no Brasil, o emprego de NDTE nos mais diversos setores da indústria tem aumentado bastante. Um exemplo é sua ampla utilização em plantas geradoras e distribuidoras de energia elétrica como ferramenta de monitoramento e detecção prematura de falhas em componentes eletro-mecânicos e térmicos (Minelli e Veratti, 2004; Silva *et al.*, 2005).

Ultrapassando os limites da simples avaliação da estanqueidade térmica em edificações, a capacidade de identificar descolamentos, presença de umidade, falhas internas e elementos não visíveis em estruturas, levou a termografia a ser empregada no monitoramento de obras de arte. Inicialmente, porém, criou-se a opinião comum de que os resultados obtidos apresentavam baixa confiabilidade; idéia alimentada, parte pela euforia dos setores ligados à preservação de bens culturais com as respostas oriundas de outras técnicas não destrutivas, parte pela inexistência de um procedimento padrão para a aplicação da termografia, o que levava aos freqüentes alarmes falsos de irregularidades (Grinzato, Bison e Marinetti, 2002; Tavares e Andrade, 2004).

Por outro lado, a termografia tem a seu favor fatores de ordem econômica. Para aquisição da infra-estrutura necessária à implementação da vibrometria laser Doppler – LDV, uma das técnicas consagradas no setor de diagnóstico de obras de arte, os custos giram em torno de 180 mil dólares americanos. No caso da termografia, existem disponíveis no mercado desde equipamentos da ordem de 10 mil dólares, para utilização em campo e em pesquisas de menor responsabilidade, até equipamentos mais sofisticados, da ordem de 80 mil dólares, para aplicações mais específicas.

Vencer a incredulidade do setor na capacidade da termografia em diagnosticar e localizar corretamente defeitos em obras de arte passa, necessariamente, pelo conhecimento das limitações impostas pela própria técnica. Estas dificuldades não se encontram restritas, como a princípio se poderia imaginar, ao conhecimento das características térmicas do material sob investigação ou, ainda, aos problemas ligados à grande dispersão das ondas térmicas nos meios sólidos. Ao contrário, torna-se importante o conhecimento e/ou controle das condições ambientais presentes durante o ensaio (Titman, 2001), a perfeita manipulação do equipamento

e o tratamento e correta interpretação da imagem obtida. Além disto, existe a dificuldade em se depositar, de maneira uniforme, em relativo curto período de tempo, uma grande quantidade de energia sobre a superfície do objeto, a interferência das perdas de calor sobre o contraste das imagens e os problemas associados à determinação da emissividade superficial. Encontra-se também presente a limitação no que diz respeito à detecção de defeitos em regiões mais profundas (Maldague, 2000), e a possibilidade de danos à superfície da obra devido à necessidade da excitação térmica, problemas que podem ser eliminados com a escolha correta do método termográfico e controle do processo de aquecimento (Carlomagno e Meola, 2001).

Obviamente, uma análise consistente de incerteza que identificasse a interferência dos fatores externos ou relacionados aos elementos ópticos da termocâmara sobre o resultado obtido, aliada a uma metodologia de aplicação coerente com as limitações da técnica, credenciária, de forma definitiva, a termografia como ferramenta em pesquisas que visem à preservação de bens culturais.

Porém, pouca atenção tem sido dada a estes problemas e limites, tratados de forma discreta nos manuais dos sensores, que apresentam apenas noções básicas sobre incerteza, e nos livros correlacionados, mais preocupados com a descrição da técnica. Além disto, os manuais de fabricantes de termocâmeras apresentam fatores erroneamente tratados como indicadores de incerteza, sem descrever a metodologia empregada na sua determinação, o que dificulta ainda mais a análise. Adicionalmente, os poucos trabalhos científicos tratando do assunto apresentam ainda resultados inconsistentes e pouco abrangentes (Chrzanowski, 2001b). Apesar disto, a termografia tem comprovado sua eficácia em diversos estudos, como na identificação de falhas em pontes medievais no interior da Inglaterra (Clark, McCann e Forde, 2003) ou em processos de restauração de afrescos e mosaicos na Itália (Grinzato *et al.*, 2002a; Carlomagno e Meola, 2001).

Encontrando motivação nestes estudos e, sobretudo, na realidade do estado de Minas Gerais que, conforme relatado informalmente por especialistas, detém cerca de 75% de todo o acervo barroco brasileiro, além de valioso conjunto arquitetônico do período colonial e marcos da arquitetura moderna, propõe-se o presente trabalho que tem como objetivo geral o *“desenvolvimento de uma metodologia para a aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte”*.

Com o intuito de melhor direcionar o estudo, dividiu-se o objetivo geral em dois outros

específicos:

- identificar as fontes de erro, decorrentes de fatores internos ou inerentes ao próprio processo de medição, utilizadas na avaliação da incerteza;
- propor uma metodologia de ensaio experimental para a utilização da termografia na avaliação da integridade de obras de arte que vise a real identificação e caracterização de defeitos, com base em um procedimento com confiabilidade metrológica elevada, baseado em mecanismos de avaliação e redução das incertezas.

Para o cumprimento destes objetivos e validação dos resultados, propõe-se o seguinte procedimento:

- implementação, em laboratório da metodologia proposta utilizando-se termografia ativa, em dois tipos de excitações térmicas possíveis: pulsada (*pulsed thermography*) e modulada ou *lock-in (modulated thermography)*;
- análise comparativa dos resultados obtidos em laboratório com aqueles obtidos através da implementação da vibrometria laser Doppler (LDV);
- modelagem matemática do processo de difusão térmica para análise comparativa dos resultados obtidos em laboratório;
- análise comparativa dos resultados obtidos em laboratório com aqueles obtidos através de modelagem matemática;
- implementação *in situ* da metodologia proposta, onde é utilizada a termografia passiva e realizada análise qualitativa dos resultados.

Visando o cumprimento dos objetivos propostos, este trabalho apresenta, em seu Capítulo II, uma revisão bibliográfica, onde são descritos os conceitos teóricos do NDTE, sua aplicação no setor de preservação de bens culturais, os equacionamentos pertinentes à estimativa da incerteza de medição em sistemas termográficos e princípios básicos da LDV.

No Capítulo III, a metodologia proposta é apresentada e a sua implementação no estudo *in situ* e em laboratório é descrita. É, também, neste capítulo que são apresentadas as características das amostras e a infra-estrutura utilizada para a implementação dos ensaios em laboratório e *in situ*. Apresentam-se, ainda, neste capítulo o modelo matemático utilizado na

validação dos resultados e a metodologia utilizada para a aplicação da LDV na avaliação da integridade de obras de arte.

No Capítulo IV os resultados experimentais são apresentados, analisados e discutidos. Um confronto entre os resultados experimentais obtidos com o emprego da termografia com aqueles obtidos através da implementação do modelo matemático e da LDV é realizado.

No Capítulo V são apresentadas as conclusões do trabalho e os desdobramentos passíveis de serem realizados em estudos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – DEFEITOS EM OBRAS DE ARTE

2.2 – ENSAIOS TÉRMICOS NÃO DESTRUTIVOS

2.3 – MÉTODOS DE EXCITAÇÃO TÉRMICA APLICÁVEIS
A ENSAIOS TÉRMICOS NÃO DESTRUTIVOS

2.3.1 – Termografia ativa e passiva

2.3.2 – Termografia pulsada

2.3.3 – Termografia modulada

2.3.4 – Termografia pulsada por fase

2.4 – FONTES DE INCERTEZA NA APLICAÇÃO DA
TERMOGRAFIA

2.5 – VIBROMETRIA LASER DOPPLER

2.6 – CONCLUSÃO

2.1 – DEFEITOS EM OBRAS DE ARTE

O acervo cultural de um país é a maior testemunha do passado do seu povo e representa forte elemento de identidade cultural, servindo de fonte de inspiração e criatividade para a presente e as futuras gerações (Meola, Carlomagno e Giorleo, 2004). Isto justifica a procura, cada vez maior, por métodos de monitoramento e detecção prematura de defeitos que permitam realizar um efetivo e essencial plano de restauração baseado na relação causa-efeito do dano.

De forma geral, os principais fatores de deterioração em obras de arte podem ser divididos em físicos, químicos e biológicos e a sua incidência depende, sobretudo, do ambiente no qual a obra está inserida.

As causas físicas são representadas pelos parâmetros ambientais, cuja ação se manifesta na forma de deterioramentos de caráter mecânico. Em obras localizadas em ambiente aberto, o aumento do volume de água na estrutura, causado pela excessiva exposição às chuvas, pode resultar no surgimento de forças internas de compressão e tração que, se não suportadas pela peça, levam a rachaduras. Infiltrações graduais de água, causadas pela elevação da umidade relativa do ar, levam à formação de mofo e ao progressivo descolamento das camadas superficiais. Processos de dilatação e contração, causados pela mudança de temperatura, submetem a obra a diferentes solicitações mecânicas internas, uma vez que são compostas por materiais de origens diversas; as tensões de cisalhamento podem ser tais que levam à fissura e, em casos extremos, à ruptura total. A migração de sais solúveis através dos poros e fissuras leva à formação de depósitos superficiais, difíceis de serem removidos sem o risco da ocorrência de danos permanentes. Radiações luminosas, além de, por si só, serem fonte de degradação, contribuem para o aumento da temperatura da peça. O vento, por sua vez, exerce uma ação abrasiva sobre a superfície da obra, além de colaborar com o transporte dos sólidos em suspensão contidos no ar que se acumulam na superfície (Esposito, 2002).

As alterações químicas ou mineralógicas têm, atualmente, como principal fonte a poluição atmosférica causada pela emissão de gases veiculares e industriais, que levam à deterioração da superfície dos monumentos. Um exemplo da ação poluidora pode ser visto nos Profetas de Aleijadinho, contidos no adro do Santuário Bom Jesus de Matosinhos em Congonhas.

Problemas ainda podem ocorrer devido ao ataque de microorganismos, contato com excrementos de animais e ação do homem através da depredação voluntária (Carlomagno e Meola, 2002). Atos de vandalismo vêm ocorrendo também em países como a Itália onde, em

agosto de 2005, uma das mais visitadas obras do país, a Fontana di Nettuno situada na Piazza della Signoria em Firenze, foi atacada, tendo a mão direita arrancada.

Vale salientar que o conceito de manutenção da integridade dos bens culturais nasceu apenas nas últimas gerações. Durante o século XVII, era comum adequar antigas esculturas greco-romanas ao estilo clássico do período. Seguindo esta mesma filosofia, alguns afrescos sofreram intervenções, tendo sido encobertos com tinta ou argamassa (Esposito, 2002).

Os fatores de deterioração atuam de forma mais ou menos análoga sobre afrescos, pinturas sobre madeira, mosaicos e painéis de azulejo. As principais ocorrências são representadas por delaminações, descolamentos entre as camadas e defeitos superficiais, sendo favorecidas pela estrutura laminar com a qual tais obras são concebidas (Castellini, Paone e Tomasini, 1997).

Os dois primeiros conjuntos de amostras tratadas neste trabalho apresentam a estrutura típica de afrescos. Do ponto de vista histórico, embora a presença de afrescos possa já ser registrada no antigo Egito, em pinturas etruscas e em Pompéia, a plena padronização da técnica ocorreu somente no final do século XIII, com as obras de Cavallini, Cimabue e Giotto e com a publicação, no século XIV, da obra de Cennino Cennini, *Il Libro dell'Arte*, que descreve a estrutura e técnica de criação dos chamados *buon fresco*. Giorgio Vasari também descreve detalhadamente a técnica de produção de afrescos no livro *Le vite de' più eccellenti pittori, scultori et architettori*, publicado em 1550, na cidade de Firenze (Feligiotti, 2004). Parte do texto, na qual Vasari se refere à execução das obras, encontra-se no Anexo I deste trabalho.

Embora a maior ocorrência dos *buon fresco* date dos séculos XIII e XIV, e se encontrarem na Europa, sua estrutura serve de base para todas as variações ocorridas posteriormente, tanto na Europa como na América (Castellini *et al.*, 1998). A Figura 2.1 apresenta uma estrutura típica de afrescos, onde se manteve, para algumas camadas, a terminologia original utilizada por Cennini.

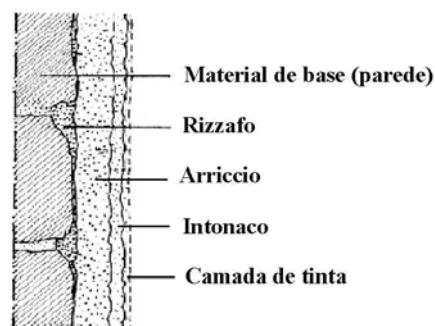


Figura 2.1 – Estruturas típicas em afresco

Constituídas de gesso calcinado, as camadas de *arriccio* e *intonaco* são colocadas sobre o material de base e diferem entre si somente devido à granulometria e espessura das camadas: no *arriccio*, para cada parte de cal eram empregadas duas ou três partes de areia de maior granulometria e no *intonaco* a mistura era constituída de partes iguais de cal, areia fina e mármore. A camada de *rinzafo*, também constituída de argamassa, era utilizada para preencher a superfície da parede, caso esta fosse muito rugosa, para a correta aplicação do *arriccio* (Castellini, Paone e Tomasini, 1997; Castellini *et al.*, 1998).

Sobre o *arriccio*, o pintor traçava as primeiras linhas do desenho. Para uma definição mais particular das imagens, o artista utilizava-se de moldes feitos em papel, que eram transferidos para o *arriccio*, ainda molhado, através de dois métodos: à *incisione*, onde se comprimia a folha de papel sobre a superfície, de forma a gravar o desenho na forma de pequenos sulcos, e à *spolvero*, onde pulverizava-se pó de carbono sobre a folha, previamente furada em pontos coincidentes com os traços do desenho (Feligiotti, 2004).

A camada de *intonaco* servia ao acabamento da superfície que iria receber o verdadeiro afresco, constituído este de pigmentos diluídos em água. Esta camada era assentada imediatamente antes do artista iniciar o seu trabalho (daí o nome afresco) e somente de acordo com o poder efetuar durante o dia de trabalho (*giornate*). Introduzida por Giotto, a *giornata* permite, hoje, que se identifique claramente o processo de criação da obra. Sobre o afresco propriamente dito, formava-se uma fina crosta transparente, resultado da carbonatação da argamassa de hidróxido de cálcio que, ao carbonatar, produz um invólucro protetor, fixando definitivamente os pigmentos.

No Brasil, grande parte dos afrescos utiliza a técnica a seco onde, normalmente, empregam-se tintas a óleo, o que torna a obra muito menos estável do ponto de vista físico e químico.

Além de provocarem danos visualmente perceptíveis (descascamento), a ação da poluição atmosférica, as variações da umidade e temperatura ambiente e, em um grau mais acentuado, a absorção de vapor provocam descolamentos e delaminações não aparentes de caráter bastante sério no que diz respeito à manutenção da integridade da obra (Meola, Carlomagno e Giorleo, 2004). Além das mudanças climáticas, estas cavidades podem, ainda, ser causadas por tensões impostas pela estrutura de base localizando-se, normalmente, na interface parede/*arriccio* e na interface *arriccio/intonaco*, conforme apresentado na Figura 2.2 (Castellini *et al.*, 1998).

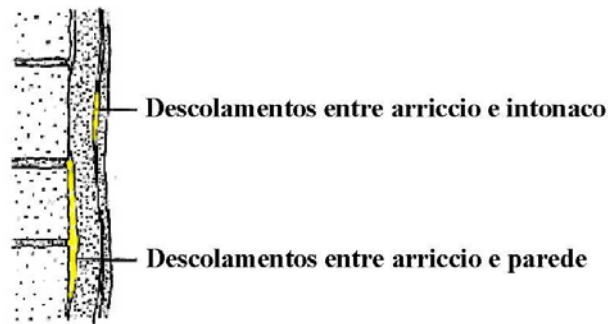


Figura 2.2 – Descolamentos em afrescos

Devido ao trabalho e conhecimento técnico exigido, poucos foram os pintores afresquistas no Brasil, porém suas obras estão entre as mais importantes do acervo nacional. No Brasil, podem-se encontrar afrescos a seco de Cândido Portinari, Burle Marx, Victor Brecheret e Theodoro de Bona e afrescos úmidos (*buon fresco*) realizados por Fúlvio Pennacchi e por Sérgio Prata. A qualidade de Portinari como afresquista pode ser vista em seus trabalhos com temas bíblicos realizados para a Rádio Difusora de São Paulo (1943), nos afrescos de São Francisco (1945) e da Via Sacra (1945) presentes na Igreja da Pampulha (Belo Horizonte) e na série de afrescos que retratam os ciclos econômicos do Brasil, realizados entre 1936 e 1944, no antigo edifício do Ministério da Educação e Saúde (Rio de Janeiro). Neste último trabalho, Portinari foi assistido por Burle Marx. O talento de Portinari encontrou respaldo também no exterior, quando, em 1942, foi convidado a realizar afrescos na Biblioteca do Congresso em Washington. Dentre os trabalhos de Victor Brecheret destacam-se os afrescos Três Graças e São Francisco (acervo pessoal), e os afrescos da Capela Pararanga em Atibaia (São Paulo). Também em São Paulo, são de grande beleza e valor artístico os afrescos de Fúlvio Pennacchi presentes em diversas igrejas e residências particulares. No Paraná, Theodoro de Bona executou alguns pequenos afrescos que podem ser apreciados no Museu que leva seu nome. Sérgio Prata executou os maiores afrescos no Castello Trevizzo em Curitiba.

Para pinturas sobre madeira (constituídas, sobretudo, de pinturas sacras – ícones – oriundas do período Bizantino do século XIII e XIV, e, no caso brasileiro, imagens sacras, altares e pinturas em de tetos de igrejas do período barroco) os painéis empregados eram feitos de uma ou mais placas, normalmente de dimensões diferentes, unidas por cravos. Para as bordas, os artistas preferiam peças secas e de maior resistência, sem nódulos, cavidades, sinais de rachadura, ataques por insetos ou outras falhas. Tais condições eram essenciais para a boa preservação da obra, uma vez que, tendo as bordas talhadas e secas corretamente, prevenia-se

o empenamento da peça. Em muitos casos, armações de madeira eram fixadas sobre a parte traseira do painel (ou no interno das esculturas) de maneira a aumentar sua resistência, dureza e durabilidade, assim como reduzir sua tendência ao empenamento, curvatura ou ruptura (Castellini *et al.*, 1998).

Pinturas sobre madeira são, normalmente, constituídas de quatro camadas: painel de madeira, tela, camada de gesso, pintura (incluindo o douramento) e, finalmente, uma camada de verniz (Castellini *et al.*, 1998). A tela, não presente em obras executadas no Brasil, vinha, nos ícones bizantinos, fabricada em linho e colocada entre o painel de madeira e a preparação de gesso. Tinha como função suportar futuros movimentos (contração/extensão) da peça. Cola animal era utilizada para fixá-la ao painel. A pintura era executada diretamente sobre a camada de gesso. Para dar mais brilho às cores e proteger a pintura contra umidade, sujeira e radiações luminosas o artista aplicava sobre a pintura ou camada de douramento (quando existente), uma camada de verniz constituída de uma resina natural dissolvida (Castellini *et al.*, 1998). A Figura 2.3 apresenta a estrutura típica de pintura sobre madeira.

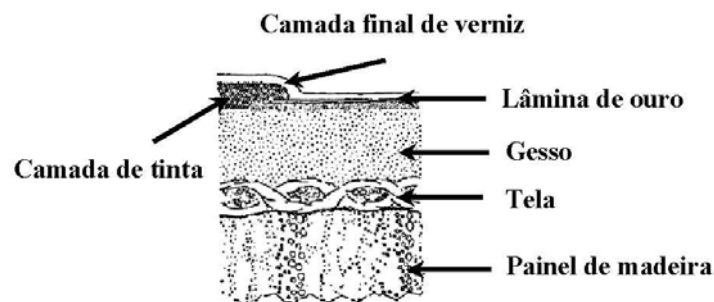


Figura 2.3 – Estrutura típica de pintura sobre madeira

No que concerne à caracterização de defeitos, assim como nos afrescos, a maior incidência de delaminações e descolamentos ocorre entre as camadas, principalmente na interface painel de madeira/tela e tela/gesso. Porém, neste caso, tem-se uma estrutura mais complicada, formada por diversas camadas, materiais muito diferentes e, algumas vezes, obras com pequenas dimensões, como no caso de ícones. Apesar disto, estudos têm demonstrado a capacidade da termografia na detecção de falhas de dimensões bastante reduzidas nestas obras, como pode ser visto no trabalho de Grinzato *et al.* (2002b).

Nos mosaicos e em painéis de azulejo, o caso mais comum é o descolamento das pastilhas e defeitos internos decorrentes do processo de fabricação. Quando identificável em uma mera inspeção visual, o problema adquiriu já um caráter crítico, com descolamento total da

pastilha, levando a descaracterização da obra. Foi justamente o descolamento das peças o principal problema encontrado pelos restauradores nos azulejos de Cândido Portinari, instalados na parte externa da Igreja da Pampulha. Recentemente, a obra passou por um processo de recuperação.

Os painéis de azulejo, por sua vez, constituem herança colonial de enorme importância cultural e estão presentes em diversas igrejas, conventos e casas particulares, sobretudo no nordeste do Brasil. Apesar da sua importância histórica, tais obras tiveram menor sorte que a obra moderna de Portinari; a grande maioria encontra-se em processo de total degradação, não só pela ação do tempo ou descaso das autoridades, mas, sobretudo, pelo diagnóstico tardio e ineficiente dos problemas, o que aumenta, consideravelmente, os custos da recuperação. Na Europa, Carlomagno e Meola (2001) apresentaram um trabalho onde a termografia foi utilizada para a identificação de descolamento nas pastilhas do mosaico contido na parede frontal da Escola de Engenharia de Nápoles e nos mosaicos provenientes de Pompéia e Ruvo, de propriedade do Museu de Nápoles. Em ambos os casos, a técnica confirmou as informações obtidas por restauradores especializados. Outro exemplo da eficácia da utilização da técnica no diagnóstico deste tipo de obra, pode ser visto no trabalho de del Conte *et al.* (2006) onde os ensaios foram realizados sobre o piso da Basilica della Salute em Veneza.

A técnica mais tradicional de avaliação de danos em obras de arte utiliza, basicamente, inspeções manuais e visuais, sempre sujeitas ao julgamento do avaliador: para a detecção de falhas e descolamentos, o restaurador efetua pequenas batidas sobre a superfície da obra e o seu julgamento baseia-se no som emitido. As principais limitações desta técnica são a natureza não objetiva, a pouca reprodutibilidade e o alto custo do avaliador. A substituição por outras técnicas não intrusivas e não destrutivas, em especial a termografia, produz resultados mais confiáveis, obtidos com procedimentos de medições reprodutíveis, que possibilitam a identificação precoce de defeitos e o armazenamento dos dados, permitindo o acompanhamento da evolução do problema. No Brasil, porém, ainda predominam as inspeções visuais e, em alguns casos específicos, utiliza-se o raio-X, considerada uma técnica intrusiva.

Em afrescos, a principal vantagem da aplicação da termografia sobre as técnicas antigas é justamente o seu caráter menos subjetivo. Uma das dificuldades da aplicação da técnica, porém, está na mudança nas cores originais da obra devido ao depósito de sais e poeira, o que modifica a refletância e emissividade da superfície, causando o registro de uma temperatura,

aparentemente, mais baixa nestas regiões. Adicionalmente, a ocorrência de eventos de restauração anteriores, pressupõe a utilização de aditivos químicos que acabam por impor variações locais da emissividade e, conseqüentemente, da temperatura registrada pela termocâmara. Tal situação pode levar aos falsos alarmes de irregularidade (Carlomagno e Meola, 2002; Grinzato *et al.*, 2001; Grinzato e Rosina, 2001).

Já para pintura sobre madeira, se por um lado a camada final de verniz uniformiza a emissividade superficial, por outro confere características brilhantes à superfície, o que resulta em maiores valores para a emissividade e menor relação sinal-ruído (Carlomagno e Meola, 2002; Grinzato *et al.*, 2001; Grinzato e Rosina, 2001). Por outro lado, a utilização da termografia em pinturas sobre madeira é motivada pela necessidade de diagnóstico e monitoramento, sobretudo para efeito de certificação e seguro, em caso de reclamações por danos ocorridos durante exposições e transporte.

A utilização de NDTE sobre mosaicos e painéis de azulejo produz um diagnóstico precoce do problema, antecipando a ação do restaurador e evitando danos permanentes à obra. Porém, dentro do diagnóstico em obras de arte, a situação mais crítica talvez seja justamente a avaliação de mosaicos. Isto se deve aos diferentes materiais empregados na fabricação das pastilhas e ao efeito cromático desejável à obra. Enquanto pode-se dizer que existem valores típicos de emissividade para afrescos, da ordem de 0,92 a 0,97, no caso de mosaicos, esta variação é bem maior, podendo ir de 0,6, para superfícies mais brilhantes, até 0,95, para aquelas mais opacas, o que dificulta a avaliação dos resultados (Carlomagno e Meola, 2002; Grinzato *et al.*, 2001; Grinzato e Rosina, 2001). Esta situação, por outro lado, é facilmente contornável pelo correto uso de programas de tratamento de imagem.

Para que a termografia ratifique, definitivamente, sua importância na avaliação da integridade de obras de arte, além de ser necessário ampliar os conhecimentos sobre a técnica, suas limitações e incertezas inerentes ao processo de medição, torna-se necessário uma análise sobre as possibilidades de implementação da metodologia, sobretudo do ponto de vista da excitação térmica, mesmo porque existe a possibilidade de danos à superfície da obra quando da escolha inadequada do método termográfico.

2.2 – ENSAIOS TÉRMICOS NÃO DESTRUTIVOS

Nos últimos anos, não representa surpresa encontrar nas plantas industriais e obras civis profissionais trabalhando no diagnóstico de defeitos em peças ou na identificação de

anomalias de funcionamento em equipamentos e de falhas estruturais utilizando técnicas como o raio X, raios ultravioletas, ondas ultrasônicas e vibrometria laser Doppler. Entretanto, alguns destes ensaios podem trazer prejuízos ao objeto sobre estudo por não serem absolutamete não intrusivos. Em contrapartida, por seu caráter totalmente não invasivo nestes casos, o diagnóstico utilizando a tecnologia infravermelha é absolutamente inofensiva, seja a sistemas vivos, seja a equipamentos e estruturas (Inagaki, Ishii e Iwamoto, 1999).

Historicamente, embora as primeiras referências à radiação infravermelha remontem a, aproximadamente, 200 anos quando William Herschel (1800) publicou os resultados dos seus experimentos, a descoberta das novas tecnologias e materiais de detecção da radiação infravermelha ocorreu apenas durante a Segunda Guerra Mundial e anos subseqüentes. Na verdade, pode-se dizer que a moderna tecnologia de medição de radiação infravermelha esteja relacionada à evolução dos chamados semicondutores, os quais estão incluídos na classe dos fotonetectores (Rogalski, 2002), ocorridas, justamente, durante e a partir da quarta década do século XX.

Subdivididos pela bibliografia em fotonetectores intrínsecos, extrínsecos, fóton emissivos e quânticos (Rogalski, 2002), o comportamento destes elementos, assim como dos termodetectores, foram amplamente estudados nos últimos anos, a exemplo dos trabalhos de Cushman (1959), Kruse, McGlauchlin e McQuistan (1962), Haller (1994), Rogalski (1994), Kozłowski *et al.* (1997), Rogalski (2000), dentre outros. Tais trabalhos levantaram as limitações, aplicações, vantagens e desvantagens da utilização de cada um destes dispositivos.

A evolução da termografia caminha paralelamente ao descobrimento dos novos detectores e, da mesma forma, teve os maiores avanços durante a Segunda Guerra Mundial e no pós-guerra (Wolfe e Zissis, 1978; Vavilov, 2002), com destaque para a década de 1990, que foi marcada pelo surgimento dos detectores denominados CCD – *Charged Couple Devise*. Tais dispositivos possuem alta sensibilidade e resolução e, embora utilizem sistema de resfriamento mecânico com ciclo de gás, eliminam toda a parte mecânica destinada à formação da imagem (Rogalski, 2002).

No início do terceiro milênio nota-se a tendência, por parte dos fabricantes de termocâmeras, à adoção dos microbolômetros nos sistemas de aquisição da imagem térmica. Descritos detalhadamente em Rogalski (2002), a grande vantagem deste tipo de detector é que dispensa a utilização de dispositivos de resfriamento. A perspectiva de barateamento dos sistemas infravermelhos e a crescente necessidade de melhores controles em programas de manutenção

preventiva e preditiva, bem como em linhas de produção que empregam princípios de TQC – *Total Quality Control* e TPM – *Total Quality Management*, permite prever que haverá, nos próximos anos, uma ampliação do número de aplicações da termografia (Veratti, 2003).

Definida por Clark, McCann e Forde (2003) como sendo uma técnica para converter a radiação térmica infravermelha, invisível ao olho humano, em imagem, para Williams, Masouri e Lee (1980), a termografia pode ser descrita como sendo um ensaio térmico não destrutivo utilizado na obtenção do perfil de temperatura superficial em estruturas e subsequente correlação da informação obtida com algumas imperfeições internas. Conceito semelhante foi fornecido por Krapez *et al.* (1994) e Meinlschmidt *et al.* (1998) que definiram o ensaio térmico não destrutivo como uma técnica de diagnóstico que avalia o comportamento temporal do campo de temperatura superficial de uma estrutura excitada termicamente. Já para Giorleo e Meola (2002), a termografia é uma técnica não destrutiva utilizada na medição do campo de temperatura da superfície de todos os tipos de materiais.

Apesar das diversas definições disponíveis na literatura, nenhuma se contrapõe e todos são unânimes em afirmar a eficácia da técnica em diversos campos aplicativos.

Prova disto, é a afirmação de Boras e Svaic (1998) de que a termografia tem aberto novas possibilidades à detecção e caracterização de defeitos internos em materiais. Compartilhando desta opinião, Sakagami e Kubo (2002) afirmam que a termografia é uma das mais poderosas técnicas de medição de temperatura sem contato, o que a leva a ser utilizada frequentemente, e com sucesso, por diversos pesquisadores nesta área. O mesmo afirma Grinzato, Bison e Marinetti (2002) com relação ao monitoramento e inspeção de obras de arte.

Adicionalmente, Clark, McCann e Forde (2003) destacam a possibilidade de monitoramento remoto, a portabilidade e a facilidade na manipulação dos dados como sendo as principais vantagens da utilização da termografia em relação a outras técnicas não destrutivas. Na verdade, nenhum contato entre a termocâmera e o objeto sob observação é realmente necessário, podendo a separação entre eles variar de apenas alguns milímetros até quilômetros. Além disto, nenhuma iluminação é necessária, permitindo a operação durante o dia ou à noite. Entretanto, entre os cuidados que devem ser tomados durante a realização dos ensaios destaca-se a escolha da distância entre o objeto e termocâmera, que deve ser feita de forma a minimizar as interferências externas sobre o resultado obtido, e o período do dia, estipulado de maneira a evitar a presença de sombra e reflexos sobre a superfície analisada. Outra vantagem da técnica está na sua capacidade de monitorar uma grande área

simultaneamente, com uma faixa de temperaturas que pode ir de -20 a 1600°C . A alteração das lentes e a utilização de filtros, por sua vez, alteram a resposta do equipamento à radiação térmica, influenciando, ainda, sua sensibilidade. A rapidez de resposta permite avaliar rápidas flutuações da temperatura superficial do objeto, representando uma das maiores vantagens da técnica (Clark, McCann e Forde, 2003).

No campo de preservação de bens culturais, trabalhos científicos relatando a utilização da termografia surgiram nos últimos anos da década de 1970, a maioria deles oriundos de pesquisas realizadas na Itália (Rosina e Ginzato, 2001). Tal interesse é reflexo da grande concentração de monumentos artísticos naquele país (estima-se que 70% do acervo cultural mundial encontram-se na Itália), da sua importância histórica e cultural e da inegável participação da indústria do turismo na economia italiana.

Porém, as pesquisas iniciais apresentavam resultados qualitativos, baseados na comparação entre a área sob observação e a sua vizinhança (Rosina e Grinzato, 2001). Com este panorama, em 1979 um grande projeto de restauração, financiado pelo *Istituto Centrale per il Restauro* do *Ministero per i Beni e Attività Culturali*, utilizou-se de dados termográficos e de medidas meteorológicas para estabelecer as condições microclimáticas no interior de igrejas históricas em Roma, decidindo por um efetivo programa de conservação e preservação de afrescos (Carlomagno e Meola, 2001). Embora os resultados destas primeiras pesquisas fossem satisfatórios, não foram suficientes para vencer a desconfiança dos setores ligados à preservação de bens culturais na capacidade dos ensaios térmicos não destrutivos em diagnosticar defeitos e estruturas não aparentes em obras de arte.

De fato, conforme indica Casadio e Toniolo (2001), a maioria dos trabalhos utilizando tecnologia infravermelha no setor artístico destinou-se não à avaliação da integridade da obra através da termografia, mas sim ao estudo espectrofotométrico dos materiais que a compõe. A espectroscopia infravermelha consiste na medição do comprimento de onda e intensidade da absorção de luz infravermelha de uma amostra. O comprimento de onda dos feixes de absorção infravermelha é típico de ligações químicas específicas, o que possibilita a identificação de moléculas orgânicas e organometálicas presentes no material de base assim como nos pigmentos utilizados pelos artistas. Neste caso, são utilizados, basicamente, quatro tipos de instrumentos para medições de absorção infravermelha: espectrofotômetros dispersivos para medições qualitativas, fotômetros não dispersivos para determinação quantitativa de espécies orgânicas na atmosfera, fotômetros de refletância para análise de

sólidos e outros instrumentos que se utilizam da transformada de Fourier no tratamento de dados em medições qualitativas e quantitativas.

Por outro lado, os aprimoramentos introduzidos na parte óptica, nos detectores e nas termocâmeras e a interligação do sistema de aquisição de imagens a microcomputadores, juntamente com melhoramentos no tratamento de sinal e a possibilidade da utilização de modelos teóricos para a validação dos resultados, têm viabilizado a realização de análises mais completas da informação térmica obtida através da termografia. Os resultados qualitativos dos estudos iniciais começaram, então, a tomar um caráter mais quantitativo, incentivando a utilização da termografia nas diversas fases do processo de restauração de monumentos artísticos; seja na avaliação inicial, durante a intervenção, na inspeção final ou após o encerramento dos trabalhos de campo, constituindo ferramenta do plano de manutenção pós-intervenção (Grinzato, 1997).

Com isto, e dando seqüência aos trabalhos pioneiros, onde NDTE foram utilizados no diagnóstico de obras de arte, muitos outros surgiram. Porém, a ausência de uma metodologia padrão para a utilização da termografia *in situ* e o desconhecimento das suas limitações e das incertezas do processo de medição ainda se fazem presentes.

De qualquer forma, diversos exemplos do sucesso da aplicação da termografia no campo de diagnóstico em obras de arte podem ser encontrados na literatura, como nos trabalhos de Grinzato e Rosina (2001), Grinzato *et al.* (2001), Grinzato, Bison e Marinetti (2002) e Grinzato *et al.* (2002a). Os dois primeiros descrevem os resultados obtidos no *Cultural Heritage Project*, financiado pelo *Consiglio Nazionale delle Ricerche* italiano. O terceiro apresenta os resultados obtidos quando testada termicamente a fachada do Palazzo di Cremona e o último descreve a aplicação da técnica em afrescos de Giotto contidos na Capela Scrovegni em Padova. De fato, a maior fonte de dados sobre o emprego da termografia em projetos de preservação de obras de arte é oriunda da equipe do CNR-ITEF (*Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per le Tecnologia della Construzione*), a qual tem como coordenador Grinzato e cuja sede encontra-se em Padova (Itália).

A Capela Scrovegni, pela presença dos afrescos de Giotto, foi um dos mais importantes monumentos monitorados através da termografia em projeto financiado pelo *Istituto Centrale del Restauro* italiano. Os ensaios visavam monitorar as condições estruturais e microclimáticas da obra, assim como procuravam identificar o impacto da visitação sobre as condições de conservação dos afrescos. A utilização de hardware e software adequados e o

conhecimento técnico do avaliador fizeram com que uma hora fosse suficiente para adquirir os dados necessários à avaliação da integridade dos afrescos, confirmando a alta velocidade da medição e obtenção de respostas próprias da técnica. Posteriormente, as respostas obtidas pela equipe do CNR-ITEF através da aplicação da termografia, concordaram com as obtidas por Cesareo (2003) e Cesareo *et al.* (2004) quando da aplicação de EDXRF (*energy dispersive X-ray fluorescence*). Os estudos proporcionaram um diagnóstico poderoso das condições do monumento e um maior conhecimento de suas estruturas internas. Resultados bastante positivos também foram obtidos por Carlomagno e Meola (2001) quando da aplicação da termografia sobre os afrescos contidos no Duomo de Sarno e na Cripta SS. Stefani di Vaste em Lecce.

Dentro ainda do *Cultural Heritage Project* utilizou-se a termografia, em conjunto com outras técnicas e modelamento matemático, para mapear a umidade, medir a difusividade térmica das pedras e emboço e identificar estruturas internas nas paredes do Arsenale di Venezia, prédios históricos que possuem datas de construção variando entre os séculos XI e XVII. Os resultados comparativos, mais uma vez, validaram a capacidade da técnica nesta área, colaborando para o maior conhecimento da estrutura do edifício e seu status de conservação (Grinzato, Bison e Marinetti, 2002).

Já em castelo construído entre os séculos XIV e XVI na cidade de Malpaga (província de Bergamo), foi possível identificar a presença de estruturas não aparentes e materiais de origem bastante diversa, tendo sido possível avaliar as diversas etapas de construção. A fim de minimizar os ruídos de medição provenientes da presença de sombra, os ensaios foram realizados aproveitando-se períodos em que as paredes encontravam-se totalmente expostas ao sol e após o poente (Grinzato, Bison e Marinetti, 2002).

Também através de NDTE, Grinzato *et al.* (2001) agregaram informações à análise histórica e documental que permitiu o melhor conhecimento da estrutura do Palazzo Pallavicino di Cremona, cidade localizada na região da Lombardia (Itália). Tendo sua construção original datada do século XV, a edificação foi utilizada, ao longo dos anos, para diversas funções. As maiores modificações, porém, ocorreram a partir de 1835, quando o Palazzo foi utilizado como mosteiro. Procurando atender às necessidades das freiras que ali habitavam, o uso das salas internas e, mais especificamente, a posição de muitas janelas foi mudada. Posteriormente, em 1880, novas reformas foram feitas quando o prédio foi utilizado como abrigo para a população carente da cidade. O arquiteto da época mandou remover paredes

internas e de sustentação e recobrir certos vãos originais sem que fosse feito um projeto detalhado. Isto provocou danos à estrutura e incontáveis prejuízos históricos ao edifício. O uso da termografia permitiu localizar estruturas escondidas pelas reformas e diagnosticar a necessidade de intervenção em diversos pontos.

Já em del Conte *et al.* (2006), a aplicação da termografia sobre alguns setores do pavimento da Basilica della Salute em Veneza possibilitou identificar a presença dos materiais, de origem diversa do material de base, utilizados durante o processo de restauro.

Um dos trabalhos que mais chamou a atenção sobre a termografia foi o projeto de restauração da fachada da Catedral de São Pedro (Roma) por ocasião do Jubileu em 2000. A técnica foi empregada na avaliação do estado de preservação do edifício no período pré-intervenção, no controle das técnicas e materiais utilizados durante a execução dos trabalhos, na análise dos elementos arquitetônicos que compõem a obra e no acompanhamento do processo bioquímico, utilizado para o clareamento das pedras (Meola, Carlomagno e Giorleo, 2004).

Segundo Avdelidis e Meropoulou (2004), a termografia tem sido usada, com sucesso, em trabalhos semelhantes na Grécia e Turquia. Empregada como ferramenta auxiliar no processo de restauração do prédio histórico do Banco da Grécia em Atenas, na fortificação que cerca o Estádio Nacional de Heraklion em Creta e sobre mosaicos da Hagia Sophia em Istambul, conseguiu diagnosticar, em todos os casos, problemas internos como descolamentos e presença de umidade, não identificáveis por técnicas tradicionais de restauração. Além disto, ajudou na caracterização dos materiais presentes e respectivo estado de degradação. Tavukçuoğlu *et al.* (2005) puderam, também através da termografia, identificar o aumento da umidade em conjunto arquitetônico do século XIII, localizado em Ağzikarkarahan, província de Aksaray, na Turquia. O diagnóstico prévio do problema ajudou no processo de preservação da obra.

Quando da avaliação térmica de obras de arte, espera-se obter uma distribuição de temperatura uniforme na presença de materiais homogêneos, com ausência de inclusões e/ou defeitos. A presença de falhas, por sua vez, devido à variação das propriedades no ponto onde estão presentes, influencia o processo de difusão de calor no interior da estrutura e, normalmente, representa uma barreira ao fluxo normal de calor e ao decaimento da temperatura. A Figura 2.4 apresenta o perfil de temperatura superficial esperado em amostras com e sem presença de falha.

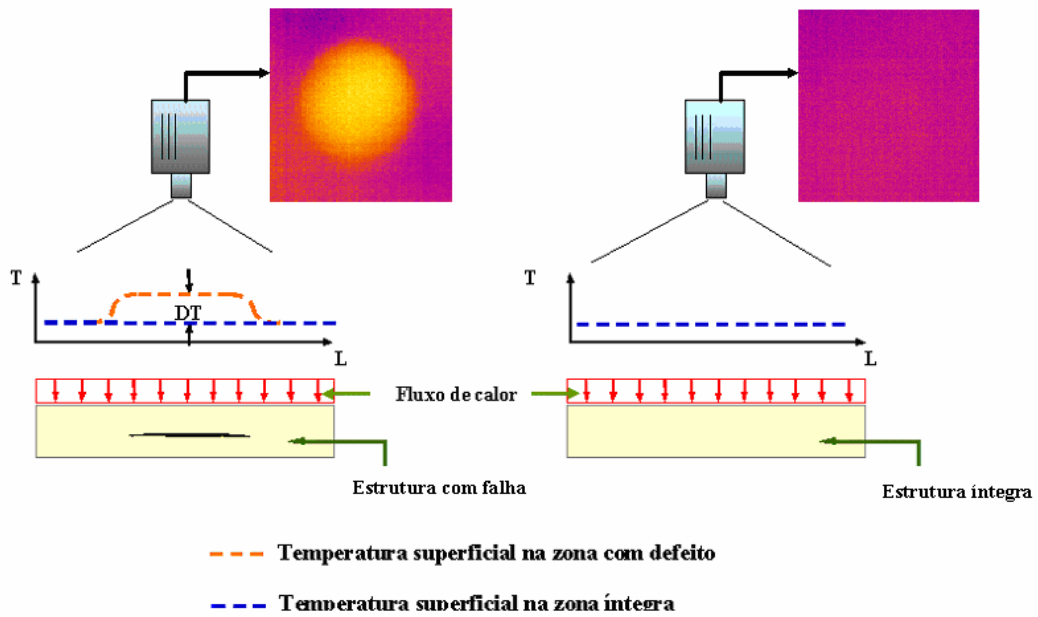


Figura 2.4 – Perfil de temperatura em amostras com e sem presença de falha

Fonte: Andrade (2000)

Teoricamente, o modelo difusivo envolvido no problema é bastante simples e utiliza a formulação proposta por Fourier, em 1826, para condições de regime transiente com condições de contorno de convecção e radiação. As hipóteses normalmente empregadas são: amostra de espessura finita, com propriedades isotrópicas; emissividade da superfície perfeitamente conhecida; espessura da amostra pequena em relação ao seu comprimento e largura (o que leva à consideração de difusão unidimensional, na direção da espessura da amostra, z); a energia recebida (estímulo térmico) não é caracterizada por um pulso de Dirac, mas sim um pulso de duração finita; as condições de contorno radiantes e convectivas são iguais para as duas superfícies da amostra (Maldague, Largouët e Couturie, 1998). Como condição inicial, considera-se que:

$$T(z,0) = T_{\infty} \quad \text{para } 0 \leq z \leq ZL \quad (2.1)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} T(z,t) = T_{\infty} \quad \text{para } 0 \leq z \leq ZL \quad (2.2)$$

onde T é a temperatura da amostra, T_{∞} é a temperatura do meio, t é o tempo e ZL a espessura da amostra.

Aplicando-se as condições de contorno e condição inicial para a região íntegra e com presença de falha, obtém-se o diferencial de temperatura entre estas duas áreas, o que

caracteriza a presença de irregularidades. O mesmo pode ser feito analisando-se o decaimento da temperatura superficial de seções com e sem defeitos internos de uma amostra, conforme pode ser visto na Figura 2.5, apresentada em Tavares, Cunha e Andrade (2005a).

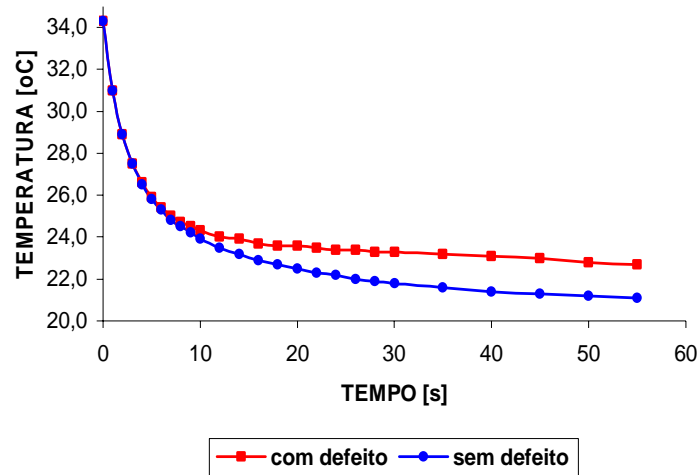


Figura 2.5 – Decaimento da temperatura superficial em regiões com e sem defeito de uma amostra

Fonte: Tavares, Cunha e Andrade (2005a)

2.3 – MÉTODOS DE EXCITAÇÃO TÉRMICA APLICÁVEIS A ENSAIOS TÉRMICOS NÃO DESTRUTIVOS

2.3.1 – Termografia ativa e passiva

Do ponto de vista da estimulação térmica, a termografia pode ser classificada em ativa e passiva (Maldague, 2000).

Na termografia passiva, condições de contorno naturais são utilizadas na análise, uma vez que nenhuma estimulação térmica artificial é utilizada. Neste caso, deve existir uma diferença natural de temperatura entre o objeto sob estudo e o meio onde ele está inserido (Maldague, 2000; Tavares e Andrade, 2003).

O problema deste tipo de esquema está associado às características qualitativas do resultado obtido, o que acaba por submetê-lo ao conhecimento do avaliador. Isto é possível, por exemplo, em programas de manutenção preventiva e preditiva, em avaliação de processos e componentes industriais e redes de distribuição elétrica onde o acompanhamento periódico das condições normais de operação fornece condições ao usuário de identificar a presença de anomalias. O mesmo ocorre em aplicações médicas da termografia, onde o método passivo é

o único empregado. Por outro lado, nestas situações existe já um diferencial de temperatura, maior que a resolução da termocâmara, entre o ambiente e o objeto sobre análise. Segundo Maldague (2000), quando da aplicação da termografia passiva, um diferencial de temperatura da ordem de 1 a 2°C entre o ponto quente e a sua vizinhança pode indicar problemas, porém, somente diferenças acima de 4°C podem realmente evidenciar uma anomalia.

Na avaliação de edificações, a termografia passiva talvez seja a mais utilizada. Titman (2001) emprega esta metodologia não só na localização de perdas de calor pontuais na estrutura (provocada, por exemplo, por defeitos em juntas), mas, também, na identificação de tubulações de água quente, tubulações de ar condicionado, dentre outras. No caso de avaliações prediais utilizando-se termografia passiva, a análise pode ser feita tanto no período de aquecimento (do início da manhã até o horário de maior incidência solar), quanto do resfriamento (do horário de maior incidência solar até o anoitecer). O interesse pelo monitoramento de perdas de calor em prédios comerciais torna-se importante, sobretudo, em países frios, já que tais perdas inferem em maiores gastos com aquecimento. Titman (2001) salienta ainda a importância destes ensaios na identificação de pontos quentes na fiação elétrica, que, normalmente, indicam potencial risco de incêndio. Em edificações com valor histórico, a identificação precoce deste problema toma maior importância e evita a perda do patrimônio.

Em alguns casos, porém, onde se deseja obter resultados com características mais quantitativas que meramente qualitativas, prefere-se, como no trabalho de Wiggenhauser (2002), utilizar a termografia ativa. O autor empregou a termografia ativa na identificação de estruturas ocultas, falhas não visíveis e umidade presente em amostras que simulam estruturas civis típicas, comprovando o maior potencial do método na identificação e qualificação dos defeitos. Resultados semelhantes foram obtidos em Tavares, Cunha e Andrade (2005a).

No caso de obras de arte, embora seja desejável a utilização da termografia passiva, os resultados obtidos com esta técnica nem sempre são satisfatórios, o que leva a escolha do método ativo (Tavares *et al.*, 2004; Tavares *et al.*, 2006).

Na termografia ativa, várias metodologias de estimulação térmica podem ser empregadas, cada qual com características e limitações próprias (Maldague, 2000; Carlomagno e Meola, 2001). A escolha do tipo de estímulo térmico depende não só das características da superfície a ser testada, mas, essencialmente, do tipo de informação requerida. No caso de obras de arte, especial atenção deve ser dada a este aspecto: submeter determinados monumentos a um

maior gradiente de temperatura pode acarretar danos irreparáveis a sua superfície e estrutura (Carlomagno e Meola, 2001; Tavares e Andrade, 2004; Tavares *et al.*, 2006).

As técnicas mais usuais de estímulo térmico são a termografia pulsada, PT, (*Pulsed Thermography*), termografia modulada, MT, (*Modulated* ou “*Lock-in*” *Thermography*) e a termografia pulsada por fase, PPT (*Pulsed Phase Thermography*).

2.3.2 – Termografia pulsada

A termografia pulsada, ou *Pulsed Thermography* (PT), é o mais tradicional método de excitação térmica e consiste, basicamente, na simples estimulação do material através de pulsos de energia onde, normalmente, se analisa a curva de decaimento da temperatura, ou seja, a análise é feita durante o resfriamento da amostra (Maldague, 2000; Carlomagno e Meola, 2002).

Esta estimulação pode ser quente ou fria, de acordo com a necessidade de geração do diferencial de temperatura entre o objeto testado e o ambiente no qual está inserido (Maldague e Marinetti, 1996; Maldague, 2000). No primeiro caso, que representa o mais comum deles, o pulso de energia é conseguido através de flashes de luz, raios de laser ou, ainda, jatos de ar quente. No segundo caso, somente jatos de ar frio são utilizados (Maldague e Marinetti, 1996; Carlomagno e Meola, 2002). Se a temperatura da parte sob inspeção já é maior que a temperatura ambiente, como, por exemplo, em processos fabris, é conveniente utilizar a estimulação fria através de jatos de ar. Obviamente, a frente térmica propaga-se da mesma maneira utilizando-se estimulação quente ou fria: o importante é manter o diferencial térmico entre a fonte e a amostra. No método frio, porém, a análise é feita durante o período de aquecimento da amostra, ou seja, no período em que ela tende a retornar à sua temperatura inicial. Uma vantagem da estimulação a frio é a diminuição das reflexões, captadas pela termocâmera, quando do uso da estimulação a quente (Maldague e Marinetti, 1996). Em obras de arte a utilização de jatos de ar quentes ou frios deve ser restrita a situações em que não se ofereça risco à integridade da superfície do monumento (Carlomagno e Meola, 2002).

No caso da estimulação utilizando flashes de luz ou laser, a energia térmica é fornecida ao material em forma de um pulso quadrado. A energia transferida se propaga, através de ondas de calor, a partir da superfície do material para o seu interior, obedecendo à equação de difusão de Fourier (Maldague e Marinetti, 1996). A difusão de calor no material, juntamente com as perdas por radiação e convecção, provocam a rápida mudança da temperatura da

superfície que é captada e registrada pela termocâmara (Dowling *et al.*, 1998; Maldague e Marinetti, 1996). A evolução do fenômeno pode ser observada através da aquisição de seqüências de imagens onde o sinal obtido pela termocâmara é processado, fornecendo informações sobre dimensões, profundidade e resistência térmica dos defeitos que, por ventura, existam no interior do material (Carlomagno e Meola, 2002).

Independente, porém, do tipo de estimulação utilizada ser quente ou fria, a duração do pulso de energia é controlada por obturadores operados eletronicamente e depende da espessura do material e das suas propriedades termofísicas, em especial da condutividade térmica (Maldague e Marinetti, 1996; Meinlschmidt *et al.*, 1998; Krapez *et al.*, 1994). De fato, conforme pode ser observado na Equação (2.3), o tempo de observação, t , ou seja, o tempo necessário para que o sinal de temperatura seja registrado, é função do quadrado da espessura da amostra e inversamente proporcional à sua difusividade térmica, α , o que justifica, ainda, a necessidade de sincronismo entre o pulso de energia e o funcionamento da termocâmara, com especial atenção ao seu transiente.

$$t \sim \frac{ZL^2}{\alpha} \quad (2.3)$$

Ainda do ponto de vista da técnica, a termografia oferece dois modos de operação que, conseqüentemente, conduzirão à geração de diferentes imagens termográficas. O primeiro deles, chamado método reflectivo, consiste em aplicar o pulso de calor do lado da amostra que estará exposto à câmara infravermelha. As falhas representarão, neste caso, um isolante térmico que não permitirá a propagação de calor, gerando zonas superaquecidas, coincidentes com a localização da falha. Maiores sinais de temperaturas registrados nestas zonas indicam uma maior dificuldade de propagação de calor e, conseqüentemente, maior dimensão transversal da falha (Giorleo e Meola, 2002; Meinlschmidt *et al.*, 1998).

A segunda maneira de operação, ou método transmissivo, consiste em aplicar o pulso de calor na face da amostra contrária àquela exposta à câmara termográfica. Mais uma vez, a falha representará um obstáculo à propagação de calor, gerando zonas de temperatura mais baixa na face onde será medido o campo de temperaturas. Analogamente ao primeiro caso, menores temperaturas representarão maiores dimensões transversais da falha (Giorleo e Meola, 2002; Meinlschmidt *et al.*, 1998).

Embora o método transmissivo seja, algumas vezes, utilizado na avaliação de obras de arte,

no caso de análise de obras arquitetônicas, o método reflectivo é o mais empregado. Esta predileção vem não só da facilidade de implementação, mas, também, da queda no sinal de temperatura, provocado pelas grandes espessuras das paredes de igrejas e prédios antigos, quando se analisa a superfície oposta àquela sujeita à fonte de calor (Tavares, Cunha e Andrade, 2005b). Independente, porém, do método empregado, não só a dimensão longitudinal do defeito como também a sua profundidade podem, à princípio, ser identificadas através da análise do sinal de temperatura obtido (Carlomagno e Meola, 2002).

Um ponto crucial na análise da PT é representado pela definição do contraste térmico, $C(t)$, uma vez que é através dele que se determina a profundidade da falha. Avaliado através de comparações entre a temperatura nas regiões com e sem defeito, assume-se que a perda do contraste na imagem termográfica é inversamente proporcional ao cubo da profundidade da falha, d , (Maldague e Marinetti, 1996), ou seja:

$$C(t) \propto \frac{1}{d^3} \quad (2.4)$$

Das Equações (2.3) e (2.4), Maldague (2002) afirma que, para materiais homogêneos isotrópicos, pode-se considerar a lei empírica que diz que o raio do menor defeito detectável deve ter dimensão, pelo menos, duas vezes maior que a sua profundidade a partir da superfície. Meola e Carlomagno (2004a) analisaram os limites para a identificação de defeitos em compósitos e concluíram que, mesmo com pequenas espessuras, defeitos de grandes dimensões logitudinais são identificáveis a partir da aplicação da termografia.

Porém, a definição fornecida por Maldague, Largouët e Couturie (1998) para o contraste térmico, e apresentada na Equação (2.5), é melhor fundamentada do ponto de vista físico e matemático.

$$C(t) = \frac{T_i(t) - T_i(t_0)}{T_s(t) - T_s(t_0)} \quad (2.5)$$

Na Equação (2.5), T_i e T_s referem-se, respectivamente, à temperatura medida em um ponto sobre uma área com e sem defeito. Estes pontos representam um pixel na imagem e $C(t)$ é computado com respeito à distribuição da temperatura em um instante, (t_0) , com relação à temperatura em um instante subsequente, (t) , e normalizado para a condição da área sem defeito. O resultado adimensional será relativo ao contraste da área não afetada pela falha. Obviamente, $C(t)$ varia com o tempo e para análises quantitativas o maior interesse é sobre o

valor máximo do contraste, C_{\max} , computado em um tempo, t_{\max} (Maldague, Largouët e Couturie, 1998).

Maldague (2000) ainda apresenta a *step heating thermography* ou *time-resolved infrared radiometry*, TRIR, como uma variação da PT. Segundo ele, ao contrário da PT tradicional, na TRIR analisa-se não o decaimento da temperatura da amostra, mas o seu incremento. Isto significa dizer que se analisa o comportamento temporal da amostra durante o seu aquecimento, neste caso, feita por um pulso de longa duração. Empiricamente, pode-se dizer que na TRIR o tempo de observação é dado pela Equação (2.6).

$$t = \frac{0,36 (ZL)^2}{\alpha} \quad (2.6)$$

A análise é feita, normalmente, através de gráfico, onde se apresenta a temperatura versus a raiz quadrada do tempo de observação.

A maior dificuldade da PT, porém, encontra-se, justamente, na avaliação do contraste térmico, que requer conhecimentos prévios de análise, tratamento de imagem, além do processamento de sinal, muitas vezes sendo necessário o emprego de técnicas de apoio (Maldague e Marinetti, 1996). Trabalhos como os de Santey e Almond (1997), Vallerand e Maldague (2000) e Darabi e Maldague (2002) demonstram algumas ferramentas aplicadas à análise de imagens termográficas.

Problemas no contraste térmico acabam por limitar a utilização da PT aos casos mais simples, onde a profundidade da falha não é o fator mais importante (Carlomagno e Meola, 2001), uma vez que, para defeitos mais profundos, o contraste térmico é fraco. Outro problema apresentado por Carlomagno e Meola (2001) é quanto ao fato de que a termografia pulsada ser afetada pelo aquecimento não uniforme da superfície, o que pode também dificultar a visualização do defeito. Para evitar este problema, Grinzato *et al.* (1998) adotaram um movimento linear, em velocidade constante, da fonte de calor sobre a amostra, coletando uma seqüência de imagens onde foi considerado o tempo apropriado de decaimento da temperatura após a passagem da fonte térmica. A imagem térmica final foi composta de todas as linhas correspondentes ao máximo aquecimento. O mesmo procedimento foi adotado por Carlomagno e Meola (2002).

A PT tem apresentado resultados satisfatórios no diagnóstico de obras de arte, em situações onde não existam restrições com respeito à excitação térmica ou, ainda, quando seja possível

um controle da mesma. Trabalhos como os de Carlomagno e Meola (2001) demonstraram a capacidade da PT de apontar problemas de descolamento das pastilhas em mosaicos, posteriormente comprovados pela equipe de restauradores. Falhas e presença de umidade também foram identificáveis em afrescos (Carlomagno e Meola, 2001; Carlomagno e Meola, 2002) o que favorece do ponto de vista da prevenção de infiltrações e ataques de fungos. A facilidade de implementação e do desenvolvimento do campo de temperatura e a rapidez de resposta agregam, ainda, valor à PT.

2.3.3 – Termografia modulada

A termografia modulada (MT), também conhecida como *Lock-in*, é baseada em ondas térmicas geradas em regime permanente no interior da amostra em estudo (Busse, Wu e Karpen, 1992; Busse, 1994). Neste caso, ao invés de pulsos, a superfície da amostra fica sujeita a uma estimulação periódica de ondas de calor em uma determinada frequência (Wiggenhauser, 2002; Giorleo e Meola, 2002; Maldague e Marinetti, 1996).

Para tanto, o sistema termográfico é acoplado a um gerador de ondas térmicas, o qual trabalha de forma a resultar modulações senoidais de temperatura (Sakagami e Kubo, 2002). A modulação, por sua vez, é gerada por um sinal elétrico não linear produzido em um módulo *lock-in*, sendo que a fonte de calor deve ser calibrada de forma a garantir que o formato da onda gerada seja realmente senoidal (Carlomagno e Meola, 2002). O módulo *lock-in* garante também o controle da exata dependência no tempo entre a temperatura registrada no sinal de saída e o sinal de referência, ou de entrada (Maldague e Marinetti, 1996).

A resposta da amostra a esta estimulação é também senoidal, cuja amplitude e fase dependem, justamente, da frequência de entrada (Maldague e Marinetti, 1996). O resultado prático é a oscilação do campo de temperatura em regime permanente, registrado pela termocâmara devido à emissão térmica infravermelha da superfície. A mudança da temperatura superficial da amostra ocorre, portanto, na mesma frequência que a da fonte de calor aplicada (Sakagami e Kubo, 2002).

Durante a aplicação da MT, o sistema coleta uma série de imagens e compara as temperaturas, extrai o ruído das ondas senoidais em cada ponto da imagem, e gera, por fim, o termograma (Carlomagno e Meola, 2002; Giorleo e Meola, 2002; Wu e Busse, 1998). Para obter a magnitude e a fase da modulação da temperatura, utiliza-se análise de Fourier em cada pixel da imagem. Atualmente, a utilização de softwares adequados permite a análise de até 10^5

pixels em um tempo bastante reduzido (Wu e Busse, 1998). De fato, conforme apresentado por Wu e Busse (1998), apenas poucos dados por ciclo são necessários se a função de referência e o sinal de saída têm características senoidais. A magnitude é proporcional às características da superfície da amostra (Maldague e Marinetti, 1996) e a fase é relacionada ao tempo de decaimento da temperatura, sendo independente das características ópticas e infravermelhas.

A parte real e a imaginária do número complexo que descreve a onda térmica são dadas pelo inverso do comprimento da difusão térmica, μ , definido por:

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (2.7)$$

onde f é a frequência da onda térmica e ω é a frequência angular da mesma onda térmica. A Equação (2.7) sugere uma forte dependência entre o comprimento de difusão, ou seja, o comprimento de penetração das ondas térmicas, e as propriedades do material (calor específico, condutividade térmica e massa específica). Depende, ainda, do ciclo da onda, ou seja, quanto menor for a frequência utilizada na excitação, mais profunda será a penetração da onda térmica. Desta maneira, a onda térmica deve ser atenuada de forma a penetrar até certa profundidade, o que prediz a necessidade do controle sobre a frequência a ser utilizada de acordo com o objetivo da medição (Maldague e Marinetti, 1996; Carlomagno e Meola, 2001).

A velocidade de penetração das ondas, v , é dada por:

$$v = \sqrt{2\omega\alpha} \quad (2.8)$$

O sinal de saída da oscilação da temperatura é obtido na MT com o sinal de entrada, considerado como de referência, característica da amostra e estímulo térmico utilizado:

$$T(t, z) = T_0 \exp^{-z/\mu} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}\right) \quad (2.9)$$

onde o comprimento de onda, λ , é dado por:

$$\lambda = 2\pi\mu \quad (2.10)$$

A Equação (2.9) pode então ser reescrita como:

$$T(t, z) = T_0 \exp^{-z/\mu} \exp i \left(\omega t - \frac{z}{\mu} \right) = A(z) \exp i [\omega t - \phi(z)] \quad (2.11)$$

onde $A(z)$ é a amplitude térmica e $\phi(z)$ é a mudança na fase da onda térmica que atravessa o material.

Em relação a PT, a MT apresenta diferenças no que diz respeito ao procedimento de observação que é feito em regime permanente e transiente, levando ao aumento da relação sinal-ruído. Por outro lado, é possível corrigir não só a amplitude como também a fase da temperatura de resposta. Além disto, graças à análise individual das frequências, existe um sincronismo que permite a inspeção do material a uma dada profundidade, a qual depende, basicamente, da frequência utilizada.

De uma forma geral, iniciam-se os ensaios com valores de frequência mais elevados a fim de se investigar a camada superficial da amostra. Posteriormente, tais valores são gradativamente reduzidos até que toda a espessura da amostra seja estudada ou até que sejam alcançados os menores valores de frequência passíveis de serem ajustados no sistema de medição.

O contraste na imagem pode ser definido em função da diferença do ângulo de fase obtido para a seção íntegra, ϕ_s , e com defeito, ϕ_i , normalizada para o ângulo de fase da seção íntegra (Meola e Carlomagno, 2004b), ou seja:

$$C(\phi) = \frac{\phi_s - \phi_i}{\phi_s} = \frac{\Delta\phi_s}{\phi_s} \quad (2.12)$$

No caso de avaliação de obras de arte, a grande vantagem de aplicação da MT é que ela requer baixíssimos diferenciais de temperatura, o que minimiza a possibilidade de danos (Carlomagno e Meola, 2001). Outra vantagem da MT é a sua baixa sensibilidade ao aquecimento uniforme além da possibilidade de inspeção de áreas mais amplas, de até de 2m² aproximadamente, e a detecção de defeitos de menores proporções que os identificáveis na PT (Maldague e Marinetti, 1996). Bons resultados da aplicação da MT na identificação de falhas causadas por corrosão podem ser encontrados no trabalho de Sakagami e Kubo (2002). Carlomagno e Meola (2001) obtiveram resultados positivos com a aplicação da técnica em afrescos.

Uma dificuldade da MT é o tempo de aquisição de dados que deve ter, pelo menos, a duração de um ciclo. Um exemplo disto é que uma onda com frequência de 0,12 Hz, requer, no

mínimo, 8s para a obtenção da imagem; se a frequência cair para 0,06 Hz o tempo para aquisição dos dados aumenta para 16,6s, assim como se for utilizada uma frequência de 0,03 Hz o tempo será de 33,3s (Maldague, Largouët e Couturie, 1998). O grande problema é que, ao aumentar a frequência, conseguindo assim uma maior velocidade de resposta, a profundidade de difusão é diminuída e o defeito pode não ser detectado (Maldague e Marinetti, 1996; Maldague, Largouët e Couturie, 1998). Tal situação acaba por restringir a MT a aplicações onde o tempo não é fator crucial.

2.3.4 – Termografia pulsada por fase

A chamada *Pulsed Phase Infrared Thermography* (PPT) que, por falta de uma tradução oficial, é nomeada aqui *termografia pulsada por fase*, é uma técnica de processamento de sinal, introduzida poucos anos atrás, baseada na dualidade dos domínios de frequência e tempo e na transformada de Fourier que permite passar de um ao outro domínio (Maldague e Marinetti, 2002).

Cada função temporal tem uma representação de frequência como, por exemplo, o pulso ideal de Dirac que varia no tempo, mas possui valor constante no domínio de frequência. Utilizando-se o conceito da transformada de Fourier, a evolução temporal da temperatura, como obtida em uma clássica PT, pode ser conduzida para o domínio de frequência, que é, de fato, a distribuição espectral de amplitude e fase (Maldague, Largouët e Couturie, 1998).

A PPT combina as vantagens da PT e MT. Enquanto na MT, uma simples frequência é testada em regime permanente, na PT um pulso quadrado, em regime transiente, é utilizado ao invés de um pulso ideal de Dirac. Isto faz com que ondas de calor de diversas frequências e amplitudes não constantes sejam lançadas sobre o material. Na PPT o pulso utilizado é como na PT, porém devido à aplicação da transformada de Fourier no processamento do sinal, os resultados são apresentados em termos não só da amplitude e frequência, mas também da fase, como na MT (Maldague, Largouët e Couturie, 1998; Maldague e Marinetti, 2002).

O procedimento da PPT consiste em adquirir uma seqüência de imagens extraíndo, para cada pixel de cada uma das imagens, o decaimento temporal, $D(n)$, da intensidade, onde n é o índice da imagem. Por isto, é necessária certa diferença de temperatura entre duas imagens sucessivas. A transformada de Fourier de uma função, $F_{(u_n)}$, expressa pela Equação (2.13), é, então, aplicada (Maldague e Marinetti, 1996; Maldague e Marinetti, 2002):

$$F_{(u_n)} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} T(x) \exp[-j 2\pi u_n n / N] = \text{Re}(u_n) + j \text{Im}(u_n) \quad (2.13)$$

onde u_n é o incremento na frequência, N , o número de imagens, e $\text{Re}(u_n)$ e $\text{Im}(u_n)$ são, respectivamente, a parte real e imaginária da transformada de Fourier do sinal de temperatura, $T(x)$, obtido pela termocâmara, para cada pixel no campo de visão.

Finalmente, a fase e a amplitude são calculadas de acordo com as Equações (2.14) e (2.15):

$$\phi_{(u_n)} = a \tan\left(\frac{\text{Im}(u_n)}{\text{Re}(u_n)}\right) \quad (2.14)$$

$$A_{(u_n)} = \sqrt{\text{Re}(u_n)^2 + \text{Im}(u_n)^2} \quad (2.15)$$

O fato de analisar o decaimento temporal da temperatura em uma seqüência de imagens faz com que as informações fornecidas pela PPT não sejam constantes, mas disponíveis em função da frequência empregada, que pode ter valores de 0 até $1/\Delta t$, onde Δt é o intervalo de tempo entre duas imagens subseqüentes. Desta forma, quanto menor o número de imagens obtidas (maiores frequências), menor é a energia disponível para análise e mais pobre a gama de informações obtidas. Esta redução da energia disponível para análise com o aumento da frequência é parcialmente compensada pelo fato de que o comprimento da difusão térmica, conforme visto na Equação (2.7), é inversamente proporcional à raiz quadrada da frequência.

Sendo assim, a grande vantagem da PPT é que a transformada de Fourier abre as portas para uma análise da amplitude e da fase (Maldague, Largouët e Couturie, 1998), conseguindo identificar defeitos localizados em profundidades maiores do que aqueles identificáveis pela MT, com maior velocidade de resposta, como na PT. Porém, grandes diferenciais de temperatura são necessários, o que limita a aplicação da técnica a situações em que o objeto sob análise não sofra restrições quanto a este fator (Maldague e Marinetti, 2002). Assim como na MT, uma outra possível restrição deste método está na necessidade de conhecimentos prévios sobre análise e tratamento de imagem (Maldague e Marinetti, 1996) e processamento de sinal, muitas vezes sendo necessário o emprego de técnicas de apoio, como a rede neural artificial.

2.4 – FONTES DE INCERTEZA NA APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA

Segundo Chrzanowski (2001a), um ponto de partida para a identificação dos erros associados

às medidas realizadas com termocâmeras é a utilização dos conceitos contidos no guia de avaliação de incerteza: *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (1993). Ainda segundo Chrzanowski (2001a) as termocâmeras podem ser divididas em dois grupos: as de observação e as de medição. Com aplicações mais direcionadas ao setor militar, as câmeras de observação permitem operações na escuridão absoluta e em condições ambientais adversas, porém com menor definição de imagem. As termocâmeras de medição estão mais direcionadas ao setor civil, com aplicações industriais, científicas e, principalmente, nos ensaios térmicos não destrutivos.

Do ponto de vista da aplicação, as medições baseadas em imagens termográficas podem ser divididas em dois grupos: as que requerem apenas medições de temperaturas relativas (ou medições meramente qualitativas), onde a qualidade da imagem é o critério mais importante, e as que requerem medições de temperatura absoluta (ou medições quantitativas), onde se espera obter a resposta com o menor valor de incerteza possível (Chrzanowski, 2001a).

Existe, porém, uma carência de informações conclusivas sobre as metodologias a serem empregadas na determinação das incertezas associadas à medição de temperatura sem contato. A escassez de trabalhos nesta área talvez esteja associada à grande quantidade de variáveis envolvidas no processo, cada qual com características específicas. Todavia, alguns estudos recentes, como os de Chrzanowski (1996), Chrzanowski, Fischer e Matyszkiew (2000), Chrzanowski e Park (2001), Chrzanowski *et al.* (2001), Ranieri e Pagliarini (2002), Mecca, Sanchez e Sanchez (2002) e Horny (2003), já têm apontado tendências na análise de incerteza na aplicação da termografia, seja em condições reais de operação, seja durante a calibração do instrumento. Por outro lado, algumas normas militares publicadas pelo departamento de defesa americano, como a MIL-T-49381 (1980), MIL-I-24689 (SH) (1988), MIL-STD-1859 (1989) e a MIL-STV-2194 (1992), já definem os métodos de avaliação das termocâmeras de observação. O mesmo objetivo tem as normas da ASTM E 1311-89 (1989), ASTM E 1213-92 (1992) e ASTM E 154313-94 (1994) com relação às termocâmeras de medição. Neste trabalho, a descrição e a metodologia para a determinação de cada uma das fontes de incerteza presentes no processo de calibração e medição seguiu as informações contidas nestes estudos e normas, assim como aquelas presentes nos trabalhos de Chrzanowski e Jankiewicz (1996), Chrzanowski e Szulim (1998), Chrzanowski (2001a), Chrzanowski (2001b) e Krapels *et al.* (2002).

As fontes de erros que geram as incertezas em um processo de medição de temperatura sem

contato, podem, portanto, ser divididas em externas (ou de medição) e internas (ou intrínsecas), ou, ainda, como erros devido a condições radiométricas, erros eletrônicos e de calibração.

Em processos de calibração, onde se determina a incerteza intrínseca da termocâmera, todos os fatores externos são ignorados ou conhecidos. Tal situação é simulada com a utilização de um corpo negro (padrão) de grandes dimensões para a realização das medidas, a manutenção da menor distância possível entre a termocâmera e o corpo negro, de forma a poder-se ignorar as influências da transmitância da atmosfera, a manutenção da temperatura do laboratório entre 20 e 30°C e o posicionamento do corpo negro no centro do campo de visão do sistema. As medidas devem ser realizadas para o menor intervalo de temperatura passível de ser registrado pela termocâmera (resolução) e os resultados apresentados como uma média de, pelo menos, doze medidas. Na determinação da incerteza, uma distribuição normal deve ser assumida. Esta metodologia é aceita pelos maiores laboratórios internacionais de calibração e é seguida pelos órgãos brasileiros de calibração.

Um conjunto de sete fatores é utilizado na caracterização da incerteza intrínseca de uma termocâmera: mínimo erro (ME), erro gerado por ruído (NGE), resolução digital da temperatura (DTR), estabilidade da temperatura (TS), repetitividade (RE), uniformidade da medição (MU), e a resolução espacial da medição (MSR).

O mínimo erro, ME, é definido como o desvio da temperatura registrada pela termocâmera, T_{out} , em relação à temperatura do objeto analisado (mensurando), T_{ob} , quando as medidas são executadas em condições de calibração. Embora nomeado erroneamente nos catálogos dos fabricantes como indicativo de incerteza, o ME pode ser tratado como uma primeira aproximação da incerteza do equipamento.

O erro gerado por ruído, NGE, é definido como o desvio padrão de T_{out} devido a ruídos presentes no sistema. Em publicação anterior, Chrzanowski e Jankiewicz (1996) apresentaram o NGE como o desvio padrão de T_{out} devido a ruídos presentes apenas no detector. Aqui, amplia-se este conceito para ruídos presentes em todo o bloco da termocâmera, coincidindo com aquele já empregado por Chrzanowski e Szulim (1998) para o caso particular de termocâmeras tipo *single band*. De qualquer forma, o NGE pode ser calculado utilizando-se o valor do NETD (sensibilidade térmica) fornecido nos catálogos dos fabricantes. Outra opção ao cálculo do NGE leva em consideração a razão sinal-ruído do canal elétrico, V_n , e a inclinação da curva de calibração do sistema, $\partial S/\partial T$:

$$\text{NGE} = \frac{V_n}{\partial S / \partial T} \quad (2.16)$$

onde S é o sinal elétrico de saída.

A resolução digital da temperatura, DTR, é a menor diferença entre dois níveis de temperatura que pode ser distinguido devido à resolução do canal digital da termocâmara. Esta diferença depende da amplitude da faixa nominal e do número de bits do conversor analógico digital do equipamento. Devido à dependência não linear de T_{out} do sinal elétrico de saída, DTR é também uma função de T_{ob} . Porém, somente é possível calcular DTR como uma função de T_{ob} quando as informações referentes aos blocos eletrônicos são perfeitamente conhecidas. Uma vez que, na maioria das vezes, tais detalhes construtivos ficam restritos aos fabricantes, deve-se assumir uma dependência linear de T_{out} do sinal elétrico e calcular DTR utilizando-se a Equação (2.17):

$$\text{DTR} = \frac{\Delta T_{\text{span}}}{2^{k_n}} \quad (2.17)$$

onde ΔT_{span} é a amplitude da faixa nominal da temperatura e k_n é o número de bits do conversor analógico digital da termocâmara. DTR é normalmente menor que NGE para amplitudes da faixa nominal de poucos graus Celsius. Porém, para um conversor de 8 bits, como das termocâmeras antigas, e faixas nominais de centenas de graus, pode-se ter uma inversão drástica nesta situação.

A estabilidade da temperatura, TS, é definida como a faixa de indicações de temperatura na qual os resultados das medições, realizadas em diferentes condições de temperatura ambiente (porém dentro dos limites indicados pelos fabricantes), estão localizados. Mudanças da temperatura ambiente em comparação com a temperatura utilizada durante a calibração do equipamento causam mudanças no sinal elétrico de saída. As mudanças neste sinal podem ser tratadas como erros do sinal de medição (sinal de entrada). Porém, devido à dependência não linear entre T_{out} e o sinal elétrico de saída, o mesmo erro no sinal de medição pode provocar diferentes erros na medição de temperatura. Isto significa que a estabilidade da temperatura da termocâmara depende da temperatura do objeto analisado, T_{ob} . Sendo assim, deve-se medir TS para diferentes T_{ob} , eliminado a influência das outras fontes, o que torna a sua determinação extremamente difícil. Neste caso, deve-se utilizar uma câmara de teste bastante grande, com condições ambientais perfeitamente controláveis e em equilíbrio. Uma vez que

mudanças consecutivas nas condições ambientais são necessárias aos testes, o alcance do equilíbrio na câmara de testes acaba por demandar grande disponibilidade de tempo. Por outro lado, diversas temperaturas do corpo negro devem ser testadas. Adicionalmente, a obtenção de altas T_{ob} , principalmente acima de 1000°C , é limitada pela temperatura da câmara de teste, bastante inferior a este valor. Para evitar o longo tempo de testes necessário à determinação de TS e os problemas mencionados, é desejável que se possa calcular TS para apenas uma T_{ob} e que o resultado valha para todas as demais. Isto é possível aplicando-se a Equação (2.18):

$$TS(T_{ob}) = \frac{TS[T_{ob(m)}]T_{ob} RDRF[T_{ob(m)}]}{T_{ob(m)} RDRF(T_{ob})} \quad (2.18)$$

onde $TS(T_{ob})$ é a estabilidade da temperatura do objeto, T_{ob} , $TS[T_{ob(m)}]$ é estabilidade da temperatura medida para a temperatura do objeto, $T_{ob(m)}$, e RDRF é a função resistiva da perturbação relativa da termocâmara. Definida como a razão entre o erro relativo do sinal medido e o erro relativo da temperatura medida, a RDRF pode ser calculada por:

$$RDRF = \frac{\{[dS_{bb}(T_{ob})]/(dT_{ob})\}T_{ob}}{S_{bb}(T_{ob})} = \frac{T_{ob} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\text{sys}(\lambda) \exp(c_2/\lambda T_{ob})] / \{\lambda^6 T_{ob}^2 [\exp(c_2/\lambda T_{ob}) - 1]^2\} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{[\text{sys}(\lambda)]/\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T_{ob}) - 1]\} d\lambda} \quad (2.19)$$

onde $S_{bb}(T_{ob})$ é o sinal elétrico de saída durante o processo de calibração da termocâmara gerado pela temperatura do corpo negro (neste caso, representando T_{ob}) e $\text{sys}(\lambda)$ é a sensibilidade espectral da câmara.

A repetitividade, RE, é definida como a faixa de indicações da temperatura na qual os resultados de séries medições estão localizados quando estas séries são realizadas sob idênticas condições. Tais condições devem coincidir com as obtidas durante a determinação do mínimo erro, ME. Analogamente à TS, a repetitividade é uma função da temperatura do objeto, T_{ob} . Pode ser calculada para qualquer temperatura do objeto e, baseando-se em um único valor deste parâmetro, aplica-se a Equação (2.18), onde se substitui TS por RE. Em contraste com TS, RE pode ser facilmente medida para diferentes temperaturas do objeto.

A uniformidade da medição, MU, é definida como a faixa de indicação na qual os resultados

da medição de temperatura estão localizados quando o objeto testado é colocado em diferentes posições do campo de visão da termocâmara. Também deve ser determinado nas condições de calibração. Assim como RE, MU é uma função da temperatura do objeto, T_{ob} , podendo ser facilmente medida para diferentes T_{ob} com base em um único valor deste parâmetro. Para isto, utiliza-se a Equação (2.18), substituindo-se TS por UM.

MSR, ou resolução espacial da medição, é definida como a mínima dimensão angular do mensurando que não provoca alterações nos resultados da medição. Pode-se, então, dizer que se a dimensão angular do mensurando varia, mas é maior que a MSR, T_{out} permanece a mesma. A MSR é determinada em função da dimensão angular do detector da termocâmara (em equipamentos que usam apenas um detector) ou para a dimensão angular de um elemento de uma matriz linear ou completa de detectores (para equipamentos que utilizam tais tecnologias), da nitidez da imagem e do espaçamento entre as linhas da matriz completa ou elementos da matriz linear. No caso de equipamentos que utilizam um só detector ou uma matriz linear de detectores, a MSR não depende da localização horizontal do mensurando, mas depende da sua localização vertical. Entretanto, no caso de equipamentos que utilizam uma matriz completa de detectores, a localização horizontal e vertical do mensurando torne-se importante. Isto porque, quanto melhor localiza-se o mensurando dentro da dimensão angular do detector, melhor o sinal obtido e, conseqüentemente, melhor a nitidez da imagem termográfica. Sugere-se então que na determinação do MSR o valor medido para o pior caso testado seja empregado.

De forma resumida, pode-se dizer que os seis primeiros parâmetros dão a informação sobre as incertezas na temperatura registrada pela termocâmara, T_{out} , em relação a real temperatura do objeto, T_{ob} , devido à presença de diferentes fontes de erros: ruído no canal analógico e limitação do canal digital da termocâmara, mudanças na temperatura ambiente, mudança dos parâmetros dentro do seu campo de visão, além de outras fontes de incertezas presentes nas condições de calibração. O último parâmetro fornece a informação sobre a mínima dimensão necessária do objeto a ser testado pela termocâmara, sem que esta dimensão afete a temperatura medida.

Na maioria das vezes estes parâmetros representam para os usuários uma caixa preta, mas é justamente através deles que se pode calcular, através da aplicação da Equação (2.20), a incerteza padrão combinada intrínseca, u_{in} , da temperatura T_{out} medida pela termocâmara.

$$u_{\text{int}} = \sqrt{u_{\text{ME}}^2 + u_{\text{NGE}}^2 + u_{\text{DTR}}^2 + u_{\text{TS}}^2 + u_{\text{RE}}^2 + u_{\text{MU}}^2} \quad (2.20)$$

Desta forma, a incerteza padrão combinada de T_{out} devida a fatores intrínsecos pode ser calculada a partir das diversas fontes de incertezas presentes no sistema de medição. Estes valores dependem do tipo de distribuição adotada em cada caso. Experimentalmente é possível identificar o tipo de distribuição estatística que rege cada uma das fontes e o peso sobre a respectiva parcela de incerteza. Porém, este procedimento é extremamente custoso e consome longo tempo de pesquisa e complicados procedimentos de medição, o que restringe a sua aplicabilidade. Ao mesmo tempo, o efeito sobre a incerteza padrão combinada parece mínimo, o que justifica a escolha da Equação (2.20) neste cálculo.

Uma vez conhecido o mínimo erro, ou seja, o desvio de temperatura registrada pela termocâmara, T_{out} , em relação à temperatura do objeto analisado, T_{ob} , pode-se dizer que se conhecem os limites, em uma dada distribuição de probabilidade, dentro do qual está localizado T_{ob} , não sendo possível, porém, determinar seu exato valor. Assumindo os limites de T_{ob} como sendo $[T_{\text{out}} - 0,5\text{ME}, T_{\text{out}} + 0,5\text{ME}]$, pode-se calcular a parcela da incerteza padrão de T_{out} devida ao ME, u_{ME} . Assume-se uma distribuição uniforme para T_{ob} , uma vez que este é o procedimento padrão em situações onde não existe nenhum conhecimento sobre os possíveis valores do mensurando dentro de certo intervalo. A parcela da incerteza padrão u_{ME} da temperatura T_{out} , obtidas em medições realizadas em condições de calibração, pode, então, ser calculada por:

$$u_{\text{ME}} = \frac{\text{ME}}{\sqrt{12}} \quad (2.21)$$

O desvio padrão de T_{out} devido a ruídos presentes no sistema pode ser calculado quando o NGE da termocâmara e o tipo de distribuição de T_{out} são conhecidos. O teorema estatístico do limite central, quando aplicado a sistemas geradores de imagens térmicas, demonstra que a distribuição dos ruídos gerados pelo sistema tende a tomar uma forma Gaussiana, independentemente da distribuição do ruído gerado por cada um dos componentes do sistema. Desta forma, pode-se assumir uma distribuição normal de T_{out} devido a ruídos no canal elétrico do sistema e calcular sua incerteza padrão, u_{NGE} , como:

$$u_{\text{NGE}} = \text{NGE} \quad (2.22)$$

A parcela da incerteza padrão de T_{out} devido à limitação da resolução digital da temperatura

pode ser facilmente determinada quando o DTR é conhecido. Assumi-se uma distribuição uniforme para T_{ob} dentro dos limites determinados pela resolução digital da temperatura da termocâmara, ou seja, $[T_{out} - 0,5DTR, T_{out} + 0,5DTR]$. A parcela da incerteza padrão de T_{out} devido à resolução digital do equipamento, u_{DTR} , é, então, dada como:

$$u_{DTR} = \frac{DTR}{\sqrt{12}} \quad (2.23)$$

Os valores de TS, RE e UM também fornecem informações referentes aos limites dentro dos quais está localizado T_{ob} , porém não fornecem informações sobre o tipo de distribuição de probabilidade. Mais uma vez, assume-se uma distribuição uniforme para T_{ob} . As parcelas da incerteza padrão de T_{out} devido à estabilidade da temperatura, u_{TS} , repetitividade, u_{RE} , e uniformidade da medição, u_{MU} , podem ser calculadas como:

$$u_{TS} = \frac{TS}{\sqrt{12}} \quad (2.24)$$

$$u_{RE} = \frac{RE}{\sqrt{12}} \quad (2.25)$$

$$u_{MU} = \frac{MU}{\sqrt{12}} \quad (2.26)$$

As Equações (2.21) a (2.26) fornecem, portanto, as parcelas que compõe a incerteza padrão de T_{out} e que representam as incertezas desta temperatura devido às diversas fontes intrínsecas.

Analisando a Equação (2.20), verifica-se que a parcela da incerteza provocada pela MSR da termocâmara não é representada, o que indica que se assume que seja igual a zero. Tal situação, a princípio, gera alguma surpresa, pois MSR é um dos mais importantes parâmetros de medição da termocâmara, além de que T_{out} depende explicitamente das dimensões do objeto. Porém, no caso em que o comprimento angular do mensurando é maior que a MSR pode-se desconsiderar a influência das suas dimensões sobre o resultado da medição. Por outro lado, é possível desenvolver uma formulação matemática que calcularia a parcela da incerteza de T_{out} devido à dimensão angular do mensurando quando esta for menor que a MSR. A grande dificuldade neste sentido estaria na necessidade de vencer a resistência dos fabricantes em disponibilizar dados construtivos do equipamento.

Poucos laboratórios civis têm realmente condição de realizar a calibração de termocâmeras,

avaliando de forma correta todas as fontes intrínsecas de incerteza citadas. Uma das raras exceções está na *Temperature Radiation Section* do *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* – PTB de Berlim que forneceu os dados necessários a algumas das publicações que serviram como base de informações deste estudo. Outra dificuldade no cálculo da incerteza intrínseca é que, devido a imposições do Departamento de Defesa americano, existe uma reserva de informações por parte dos fabricantes no que se refere ao equipamento e seu processo de fabricação. Tal situação, agregada à falta de infra-estrutura, leva a maioria dos laboratórios a indicar o mínimo erro, ME, como sendo a incerteza padrão do equipamento, conforme indicado também nos catálogos.

De qualquer forma, a fim de se determinar a incerteza padrão de cada parcela indicada na Equação (2.20), uma enorme gama de termocâmeras matriciais foi testada no PTB, onde foram utilizadas temperaturas do corpo negro variando de -20 a 500°C . A temperatura do laboratório foi mantida a 20°C . A maioria dos fabricantes apresentou informações prévias que indicavam incerteza máxima do equipamento como sendo de 2% de T_{ob} , porém nunca inferior à $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Os resultados demonstraram que estes valores podem ser bastante superiores, podendo chegar, em alguns equipamentos e para temperaturas do corpo negro perto dos limites empregados, a quase 9,5% ou $\pm 9,5^{\circ}\text{C}$. A fonte de incerteza intrínseca com maior peso sobre os resultados foi a estabilidade da temperatura, TS.

Para a caracterização do produto, os fabricantes apresentam em seus catálogos outros parâmetros que não a incerteza calculada segundo as componentes de incertezas apresentadas na Equação (2.20). São eles a resolução da imagem (IR), o campo de visão instantâneo (IFOV), a resolução espacial, e os mais importantes quando se deseja comparar equipamentos: a mínima resolução da diferença de temperatura (MRTD), a mínima diferença de temperatura identificável (MDTD) e a sensibilidade térmica (NETD).

A resolução de imagem, IR, representada como o número de pixels ou número de linhas por campo, é uma boa indicação da qualidade da imagem térmica obtida do objeto. Apesar de estarem relacionadas, é impossível determinar o valor da resolução espacial da medição, MSR, tendo como base apenas a resolução da imagem.

O IFOV é definido como a dimensão angular do detector da termocâmera (em equipamentos que usam apenas um detector) ou a dimensão angular de um elemento de uma matriz de detectores (em equipamentos com esta tecnologia). Analogamente ao MSR, o IFOV fornece a informação sobre a mínima dimensão necessária ao objeto a ser testado pela termocâmera,

sem que esta dimensão afete a temperatura medida. Porém, a MSR depende de outras características da termocâmara, como a refração dos blocos ópticos, efeitos de difração, frequência e comprimento de onda do canal elétrico. Desta forma, é impossível determinar a MSR com base apenas na IFOV.

A resolução espacial (ou resolução geométrica) é um parâmetro tipicamente relacionado aos antigos termo-scanners. É usualmente medida como a dimensão angular de um mensurando para a qual a SRF (*spacial resolution*) da termocâmara é igual a 0,5. A SRF é definida como uma função do sinal gerado pelo mensurando versus o comprimento do objeto em estudo normalizado para o sinal gerado por um outro mensurando, quando utilizado um objeto de iguais características, porém de grandes dimensões. A resolução espacial definida desta forma fornece uma boa indicação da capacidade da termocâmara em criar uma imagem. Se por um lado a SRF é aplicável apenas a sistemas antigos, com termo-scanners, por outro lado também não fornece informações sobre quão elevadas devem ser as dimensões do mensurando para que este fator não influencie os resultados da medição. Esta informação provém da resolução espacial da medição, MSR, que também pode ser definida como a dimensão do mensurando para o qual a SRF da termocâmara é igual a 0,99. Uma vez que a MSR é, normalmente, muitas vezes maior que a SRF, os fabricantes têm preferido apresentar a primeira em seus catálogos.

O MRTD pode ser definido em função da mínima diferença de temperatura requerida entre conjuntos de quatro amostras de referência e o ambiente na qual estão inseridas, que permita a identificação das amostras pelo observador, versus as frequências espaciais da amostra. Já o MDTD é definido em função da mínima diferença de temperatura requerida entre uma única amostra circular e o ambiente na qual está inserida, que permita a identificação da amostra pelo observador, versus a dimensão espacial da amostra.

Embora o MDTD e o MRTD sejam funções, eles freqüentemente são apresentados como um único valor. Desta forma, o MDTD é normalmente medido utilizando-se corpos de grandes dimensões, e têm valores entre 50 e 70% do NETD. Para o MRTD é difícil a utilização de uma regra semelhante, uma vez que são utilizados na sua determinação, corpos de diferentes frequências espaciais.

Uma vez que mede a habilidade da termocâmara em detectar e identificar um corpo, o MRTD é, no caso de termocâmeras de observação, uma excelente ferramenta de comparação de equipamentos. Utilização semelhante no caso de termocâmeras para medida de temperatura

absoluta é problemática. De forma resumida, pode-se dizer que o MRTD fornece algumas indicações sobre a resolução de temperatura do sistema e o MDTD indica a sua habilidade em detectar objetos de pequenas dimensões, mas é impossível conectar tais parâmetros à incerteza da termocâmara.

O NETD, apresentada nos catálogos como sensibilidade térmica, fornece informações referentes à influência do canal elétrico sobre os erros de medição, o que dá uma boa idéia da incerteza devido aos ruídos no sistema de medição. O NETD é, portanto, igual ao desvio padrão de T_{out} causada por ruídos no sistema. O NETD pode ainda ser definido como a diferença de temperatura entre o mensurando e o ambiente onde está inserido capaz de produzir um pico no sinal da razão sinal-ruído, de valor igual a um, sendo este um ponto perceptível no canal elétrico de saída. O NETD depende da temperatura do objeto em observação e é normalmente medido para um valor fixo próximo aos 30°C, devendo ser corrigido quando a temperatura do objeto for diferente da usada na sua determinação. Isto pode ser feito pelo emprego da Equação (2.27):

$$NETD(T_{ob}) = NGE(T_{ob}) = NETD(T_{ob} = T_m) T_m \frac{\int_{\Delta\lambda} \frac{\partial L(\lambda, T_m)}{\partial T} sys(\lambda) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} \frac{\partial L(\lambda, T_{ob})}{\partial T} sys(\lambda) d\lambda} \quad (2.27)$$

onde T_m é a temperatura do objeto na temperatura em que foi determinado o NETD e $L(\lambda, T)$ a função de Planck.

Os catálogos dos fabricantes expressam o NETD como um indicativo da incerteza do sistema de medição devido a ruídos. Assumindo uma distribuição normal da temperatura do objeto e aplicando um intervalo de 3σ , tem-se a incerteza referente aos ruídos do sistema, u_{NGE} :

$$u_{NGE} = 3 \cdot NETD(T_{ob}) \quad (2.28)$$

Neste aspecto, avaliação importante foi feita por Chrzanowski (2001a). Para um dado fabricante, que apresenta em seu catálogo valores para a incerteza do sistema de medição igual a 1%, porém não menor que 1°C, empregaram-se os valores do NETD, fornecidos também por ele em catálogo, nas Equações (2.27) e (2.28). Observou-se que os valores calculados para a incerteza, quando T_{ob} é igual a -10°C, variam de 1,2 a 2,4°C, ou seja, muito maiores do que os fornecidos oficialmente. Isto demonstra que nem todas as fontes de incerteza intrínsecas são levadas em conta nos cálculos. Desta forma, a incerteza intrínseca da

termocâmara não pode ser creditada apenas aos valores fornecidos pelo fabricante ao NETD.

Vale salientar que os valores indicados nos manuais dos fabricantes não levam em conta os efeitos dos erros de medição e a variação nas características da termocâmara com o tempo de utilização. Ignorados também são os efeitos do vento. Segundo Balaras e Argiriou (2002), velocidades de vento maiores que 5m/s podem afetar de forma significativa as medições à proporção que aumenta o coeficiente de transferência de calor da superfície, diminuindo a temperatura superficial. Tal diminuição, por sua vez, reduz também o sinal de entrada, dificultando a análise por parte do sistema de medição.

As características apresentadas pelos fabricantes correspondem ao comportamento do equipamento em temperaturas em torno de 20°C, onde a transmitância do meio é controlada e a emissividade do objeto, assim como sua incerteza, conhecida. Em condições reais de utilização, porém, a temperatura pode variar bastante, e mesmo que se mantenha dentro da faixa de utilização indicada pelos fabricantes, de -10 a 40°C, mudanças significativas nos resultados podem ocorrer devido a variações na radiação emitida pelos elementos ópticos da termocâmara. A condição ambiental influencia a temperatura dos detectores e, por consequência, sua sensibilidade, além de causar a modificação da temperatura dos blocos eletrônicos do equipamento, modificando seu comportamento e tornando o sistema instável. Mesmo nos equipamentos mais modernos, já equipados com hardware e software que corrigem a influência dos fatores ambientais, o problema da variação da temperatura do meio em relação à utilizada na calibração não deve ser ignorado (Balaras e Agariou, 2002).

A emissividade da superfície, em condições reais de utilização, pode variar significativamente quando analisadas, até mesmo, regiões diferentes de um mesmo objeto. No caso de obras de arte, onde diversos materiais são empregados, a dificuldade em se determinar a emissividade da superfície, sua variação dentro de uma área ou modificações devido à presença de sujeira, têm servido como ferramenta de crítica aos técnicos resistentes à utilização da termografia no setor. Embora o problema da emissividade seja real, existem técnicas que contornam a situação da determinação desta variável. A utilizada, na maior parte das vezes, consiste em obter, através de um meio independente (normalmente termopares) e de menor incerteza que o da termocâmara, a temperatura da superfície da obra. A emissividade é então ajustada na termocâmara de forma que os dois instrumentos indiquem a mesma temperatura.

Outra potencial fonte de incerteza externa é a transmitância do meio. Diversas partículas presentes no ar, como dióxido de carbono, ozônio e vapor d'água, podem atenuar, de forma

significativa, a emissão de radiação, assim como partículas de poeira e umidade podem causar efeitos dispersivos. Em situações de campo, assim como em situações de calibração, a fim de minimizar influências da transmitância do meio, procura-se manter a menor distância entre a termocâmera e o objeto sob observação, o que também maximiza a resolução da imagem.

Chrzanowski *et al.* (2001) apresentam uma equação para a avaliação da incerteza padrão combinada da temperatura medida através de termocâmeras, $u_c(T_{out})$, na qual as parcelas de incerteza devido à emissividade efetiva do objeto, $u(\epsilon_r)$, à temperatura do meio, $u(T_{ba(r)})$, e à transmitância efetiva da atmosfera, $u(\tau_{a(r)})$, são consideradas:

$$u_c(T_{out}) = \sqrt{(u(\epsilon_r))^2 + u(T_{ba(r)})^2 + u(\tau_{a(r)})^2 + u_{in}^2} \quad (2.29)$$

Sugere-se, ainda, a utilização de coeficientes de sensibilidade que indicam quanto o sinal de saída para temperatura, T_{out} , varia com os sinais de entrada da emissividade, ϵ , temperatura ambiente, T_{ba} , e transmissividade do meio, τ_a , o que transforma a Equação (2.29) para:

$$u_c(T_{out}) = \sqrt{(c_\epsilon u(\epsilon_r))^2 + (c_T u(T_{ba(r)}))^2 + (c_\tau u(\tau_{a(r)}))^2 + u_{in}^2} \quad (2.30)$$

onde c_ϵ , c_T e c_τ correspondem, justamente, aos coeficientes de sensibilidade obtidos pela derivada da função $T_{out}(\epsilon, T_{ba}, \tau_a)$, e podem ser calculados por:

$$c_\epsilon = - \frac{\int_0^\infty \frac{sys(\lambda)}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T_{out}) - 1]} d\lambda - \int_0^\infty \frac{sys(\lambda)}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T_{ba(a)}) - 1]} d\lambda}{\int_0^\infty \frac{\epsilon_a sys(\lambda) c_2 \exp(c_2/\lambda T_{out})}{\lambda^6 T_{out}^2 [\exp(c_2/\lambda T_{out}) - 1]^2} d\lambda} \quad (2.31)$$

$$c_T = - \frac{\int_0^\infty \frac{\exp(c_2/\lambda T_{ba(a)}) (1 - \epsilon_a) sys(\lambda)}{\lambda^6 T_{ba(a)}^2 [\exp(c_2/\lambda T_{ba(a)}) - 1]} d\lambda}{\int_0^\infty \frac{\epsilon_a sys(\lambda) \exp(c_2/\lambda T_{out})}{\lambda^6 T_{out}^2 [\exp(c_2/\lambda T_{out}) - 1]^2} d\lambda} \quad (2.32)$$

$$c_\tau = - \frac{\int_0^\infty \frac{\epsilon_a sys(\lambda)}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T_{out}) - 1]} d\lambda - \int_0^\infty \frac{(1 - \epsilon_a) sys(\lambda)}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T_{ba(a)}) - 1]} d\lambda}{\int_0^\infty \frac{\epsilon_a \tau_{a(a)} sys(\lambda) c_2 \exp(c_2/\lambda T_{out})}{\lambda^6 T_{out}^2 [\exp(c_2/\lambda T_{out}) - 1]^2} d\lambda} \quad (2.33)$$

Para o cálculo da incerteza padrão combinada $u_c(T_{out})$ através da Equação (2.30) é necessário conhecer os coeficientes c_ε , c_T e c_τ e suas respectivas incertezas padrão $u(\varepsilon_r)$, $(T_{ba(r)})$ e $u(\tau_{a(r)})$. Assumindo-se distribuição uniforme para todas estas variáveis, obtêm-se:

$$u(\varepsilon_r) = \frac{\Delta\varepsilon}{\sqrt{3}} \quad (2.34)$$

$$u(T_{ba(r)}) = \frac{\Delta T_{ba}}{\sqrt{3}} \quad (2.35)$$

$$u(\tau_{ba(r)}) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{3}} \quad (2.36)$$

onde $\Delta\varepsilon$, ΔT_{ba} e $\Delta\tau$ são o desvio padrão da média de cada uma das variáveis.

Chrzanowski (2001a) sugere que, no cálculo da incerteza padrão combinada, seja considerada uma distribuição normal de probabilidades, uma vez que é aplicado o teorema estatístico do limite central. Isto levaria T_{ob} a estar definida dentro do intervalo $[T_{out} - u_c(T_{out}) \leq T_{ob} \leq T_{out} + u_c(T_{out})]$, dentro do qual é considerada verdadeira para um nível de confiança de 68%. A incerteza expandida pode então ser calculada para nível de confiança de 95%.

Os erros de medição poderiam ser controlados através da utilização de amostras com características perfeitamente conhecidas e controle das condições ambientais presentes durante os ensaios (Chrzanowski, Fischer e Matyszkiew, 2000, Chrzanowski *et al.*, 1996). Porém, em situações reais de operação, isto se torna impossível, uma vez que os valores assumidos para as características termofísicas dos materiais apresentam grandes incertezas associadas. No caso de afrescos, pinturas sobre madeira, mosaicos e painéis de azulejo a situação torna-se crítica devido à composição diversa dos materiais de cada uma das camadas que compõem as obras.

Por outro lado, a termografia somente é capaz de identificar e caracterizar falhas, de forma clara e segura, se o diferencial de temperatura existente entre a região da falha e região íntegra da obra for superior aos limites de incerteza de medição. Isto leva à necessidade de uma análise comparativa entre a incerteza de medição e a tolerância característica do problema, tida como o menor diferencial de temperatura superficial gerado entre uma área íntegra e uma área com a menor falha indicada pelos especialistas em restauração como característica da existência de problemas.

A este ponto, ficam claro que progressos fundamentais no sentido de racionalizar e ratificar a utilização da termografia nos ensaios não destrutivos aplicados à avaliação da integridade de obras de arte dependem da adequação dos fabricantes aos conceitos de incerteza e da apresentação de resultados quantitativos, metrologicamente consistentes.

2.5 – VIBROMETRIA LASER DOPPLER

A interferometria óptica, sobre a qual são baseados os vibrômetros atualmente disponíveis no mercado, consiste em uma técnica não-destrutiva capaz de medir a velocidade de vibração de um ponto sobre o qual incide um raio de laser. Na verdade, a vibração da superfície provoca deflexões no raio de laser incidente que, medidas no tempo, identificam a velocidade de vibração da estrutura. Tal deslocamento em frequência é denominado *shift Doppler*.

Já a frequência Doppler do deslocamento é proporcional à velocidade de vibração da estrutura, $v(t)$, e ao comprimento de onda do laser, λ . Uma vez que, em vibrômetros comerciais, a componente medida da velocidade de vibração da superfície encontra-se no mesmo eixo do feixe de laser incidente, a frequência Doppler do deslocamento, Δf_D , pode escrita como (Willemann, 2006):

$$\Delta f_D = \frac{2v(t)}{\lambda} \quad (2.37)$$

Do ponto de vista prático, a frequência Doppler do deslocamento é obtida nos vibrômetros através do emprego de dois tipos básicos de interferômetros: Mach-Zehnder e Michelson. O esquema de medição baseado no interferômetro Mach-Zehnder é apresentado na Figura 2.6.

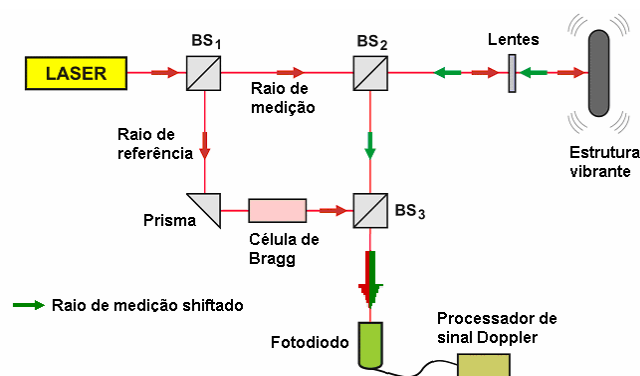


Figura 2.6 – Interferômetro Mach-Zehnder

Fonte: Willemann (2006)

No interferômetro Mach-Zehnder, a luz emitida por uma fonte de laser é dividida em raio de referência e raio de medição por um divisor de feixes (*beam splitter*, BS1). Após passar por um segundo divisor de feixes (*beam splitter*, BS2), o raio de medição é focado sobre a estrutura vibrante, sendo refletido pela mesma sobre o mesmo BS2; posteriormente, o raio de medição *shiftado* é recombinado, em BS3, com o raio de referência, cuja frequência é mantida pela célula de Bragg em 40MHz. A intensidade resultante da combinação dos dois raios depende da diferença de fase entre os eles (Esposito, 2002; Willemann, 2006).

Quando a superfície analisada encontra-se em repouso, a diferença de fase, $\Delta\phi$, é determinada unicamente pelo caminho óptico percorrido pela luz entre a superfície e o *beam splitter* BS2. Se, ao contrário, a superfície se move, a diferença de fase varia no tempo, sendo possível exprimi-la como o produto de um pulso pelo tempo de sua duração (Willemann, 2006):

$$\Delta\phi = \omega t = 2\pi \cdot f \cdot t \quad (2.38)$$

O sinal de saída em frequência é gerado em fotodiodos que recebem de BS3 os raios de referência e medição recombinados. A relação existente entre frequência Doppler do deslocamento e velocidade de vibração, permite a obtenção da segunda variável ($v(t)$) e, a partir dela, identifica-se o deslocamento da estrutura.

Já a Figura 2.7 apresenta a configuração baseada no interferômetro de Michelson.

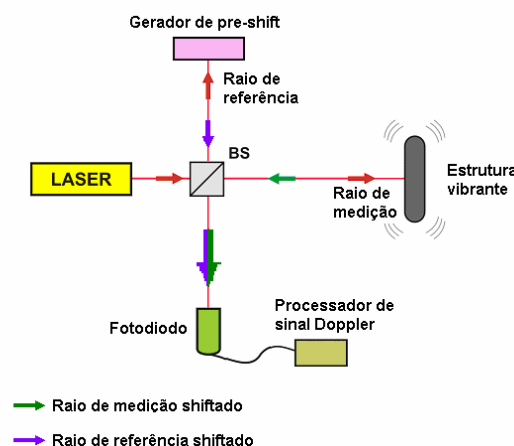


Figura 2.7 – Interferômetro de Michelson

Fonte: Willemann (2006)

Também neste caso, o feixe de laser é dividido em um raio de referência e um raio de medição, posteriormente recombinados em fotodiodos. A diferença no caminho óptico entre os dois raios muda no tempo devido à vibração da superfície sob análise, produzindo uma

interferência identificada pelos fotodiodos como sinal modulado em amplitude. A frequência de modulação representa o *shift Doppler* que, como visto na Equação (2.37), é correlacionado ao módulo da velocidade de vibração da superfície. A determinação da direção do vetor de velocidade é obtida através de um sistema de modulação eletrônica do sinal, que introduz um *pre-shift* no raio de referência. Nos vibrômetros com configuração do tipo Mach-Zender, a determinação da direção da velocidade de vibração (e, conseqüentemente, do deslocamento da estrutura) é efetuada através da comparação da frequência de medição com a frequência de referência, cujo *pre-shift* é conferido pela célula de Bragg (Esposito, 2002; Willemann, 2006).

Para o diagnóstico de estruturas, normalmente utiliza-se vibrômetros de varredura, *Scanning Laser Doppler Vibrometer – SLDV*. Este tipo de vibrômetro é baseado em um sistema de dois espelhos móveis guiados por motores galvométricos que servem ao direcionamento do raio de medição sobre uma malha de pontos, previamente definida pelo avaliador, formada sobre a superfície. A resolução espacial da malha deve ser tal que a informação sobre a localização longitudinal de um provável defeito não seja perdida. A Figura 2.8 apresenta as duas maneiras usuais utilizadas pelos sistemas tipo SLDV para a leitura da velocidade de vibração em uma estrutura, sendo que vibrômetro utilizado neste trabalho utiliza a varredura unidirecional.

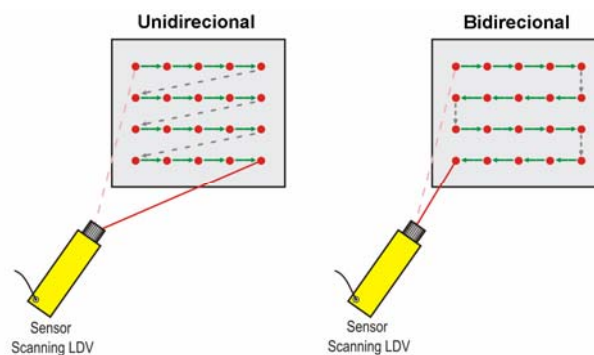


Figura 2.8 – Sistemas SLDV

Fonte: Willemann (2006)

As medições através de sistemas SLDV podem ainda ser executadas através de três formas distintas, de acordo com as características das respostas desejadas pelo avaliador.

Quando utilizado sistema de aquisição em RMS (*Root Mean Square*) excita-se a estrutura em frequências mistas e, para cada ponto da malha definida, é medido um valor de sinal através de um sistema misto analógico/digital. A principal vantagem do emprego deste sistema é a alta velocidade de medição, que pode chegar a 50 pontos por segundo (Esposito, 2002) sendo que fornece uma primeira noção da presença de irregularidades: os defeitos são apresentados

no mapa RMS como pontos com maior velocidade de vibração.

A aquisição em FFT (*Fast Fourier Transform*) trata-se mais de um sistema de tratamento de dados onde, como o próprio nome indica, para pontos de medição pré-definidos é calculado o espectro de frequência do sinal através da aplicação da transformada de Fourier, o que acaba por definir a provável frequência de vibração do ponto (Esposito, 2002). A aplicação da FFT serve como fonte de dados para a utilização do método *lock-in*.

No método Fast-Scan (ou *lock-in*), o sistema é excitado com sinais senoidais pré-estabelecidos pelo avaliador. Como o sistema RMS, o método Fast-Scan é uma modalidade de medição muito veloz e fornece como resultado mapas de amplitude e fase (Esposito, 2002).

Do ponto de vista da excitação, a solicitação, e conseqüente vibração da estrutura, pode ser obtida utilizando-se três instrumentos: martelo instrumentado, atuador piezoelétrico (PZT) e caixa acústica.

Pode-se dizer que o martelo instrumentado é, dentre os instrumentos de solicitação estrutural, o que apresenta a mais forte analogia com a técnica empregada tradicionalmente pelos restauradores. Tem como principais vantagens a rapidez e simplicidade de utilização e a possibilidade de um ótimo controle da frequência de excitação, através do emprego de materiais diferentes na parte do instrumento que efetivamente entra em contato com a superfície a ser solicitada. Por outro lado, sua notória intrusividade faz com que, no caso de avaliação de obras de arte, seja empregado apenas em situações particulares, pois existe o risco de que, um eventual excesso de força, provoque danos ou aumente os já existentes. Do ponto de vista técnico, a maior limitação do martelo encontra-se no fato de que a banda de frequência na qual vem concentrada a energia é muito reduzida, quase nunca superando 5 kHz. Isto representa um problema no sentido de individualizar defeitos menores que podem ter frequências de vibração maiores que este valor. Uma vez que, na diagnostica de afrescos o martelo é ainda empregado pelos restaurados, optou-se, neste trabalho, por citá-lo como uma opção à utilização do atuador piezoelétrico, PZT, e da caixa acústica (Esposito, 2002).

Composto de um disco de material piezoelétrico cerâmico, o PZT é alimentado através de um amplificador e exerce uma força cuja frequência equivale àquela do sinal elétrico de alimentação e cuja intensidade depende de fatores como a amplitude do sinal, modo e zona de aplicação e características físicas da estrutura sob análise. Tem como vantagem a facilidade do controle da energia aplicada em uma ampla faixa de frequência: pode-se chegar,

facilmente, a valores superiores a 100 kHz. Assim como o martelo atuador, o PZT opera de forma pontual e exige contato com a estrutura. Porém, devido a dimensão bastante reduzida (tipicamente, giram em torno de 10 mm de diâmetro por 1 mm de espessura), pode ser facilmente fixado à superfície utilizando-se, por exemplo, mel de abelha. Isto faz com que sua intrusividade seja considerada menor quando comparada àquela gerada pelo martelo atuador (Esposito, 2002). Por outro lado, no caso de bens culturais, a utilização do PZT deve restringir-se a condições em que sua instalação não acarrete danos à obra.

A caixa acústica permite a solicitação da estrutura através da emissão de certo nível sonoro, onde se procura manter não só a uniformidade da excitação sobre toda a área analisada, mas também garantir a regularidade das características espectrais das ondas emitidas. A vantagem da utilização da caixa acústica é a sua característica não invasiva, visto que não existe a necessidade de contato com a superfície da estrutura, o que permite reduzir ao mínimo o risco de danos à obra. Adicionalmente, a pressão acústica empregada é consideravelmente menor à produzida pelo martelo instrumentado ou pelo PZT, sendo possível a análise em um grande intervalo de valores de frequência. Vantagens, como o fácil controle da intensidade da força aplicada e da frequência de excitação (que pode chegar a, aproximadamente, 20 kHz), agregam valor à utilização da caixa acústica no diagnóstico de obras de arte. Por outro lado, o grande problema deste tipo de excitação é o desconforto ambiental que gera durante a execução dos trabalhos, tanto quando da utilização de ruído branco quanto de tons sinusoidais em uma dada frequência (Esposito, 2002; Feligiotti, 2004).

2.6 – CONCLUSÃO

O presente capítulo apresentou uma breve descrição dos defeitos mais comuns de serem encontrados em obras de arte assim como descreveu os fatores aos quais estão relacionados à ocorrência de tais problemas. Especial atenção foi dada à estrutura dos afrescos e obras sobre madeira que, devido à constituição multilaminar, apresentam constantes eventos relacionados a descolamentos localizados na interface das camadas que compõem tais produções artísticas. Por outro lado, os conjuntos de amostras analisadas neste trabalho representam, justamente, as características típicas de afrescos e obras sobre madeira, possuindo falhas internas simuladas.

O estado da arte, com relação à utilização de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte, foi também apresentado, juntamente com a descrição do princípio operativo da técnica e os possíveis métodos de excitação térmica aplicáveis. As características de cada tipo de estímulo térmico foram discutidas, levando-se em conta as

vantagens e desvantagens da aplicação de cada um deles quando do diagnóstico de bens culturais. Com isto, pôde-se definir, quando da proposição da metodologia experimental, descrita no Capítulo III deste estudo, qual o método mais apropriado a cada situação.

Com base na literatura disponível, efetuou-se, ainda, uma revisão sobre as fontes de incerteza intrínsecas da termocâmara. Em contrapartida, os parâmetros utilizados pelos fabricantes de termocâmeras para a caracterização do produto foram apresentados. Discutidos os fatores externos geradores de incerteza de medição, a equação para a estimativa da incerteza padrão combinada da temperatura medida através de termocâmeras, que leva em consideração as fontes externas e internas geradoras de incerteza, pôde ser apresentada. Será esta a equação utilizada para a estimativa da incerteza de cada um dos ensaios realizados neste estudo.

Por fim, os princípios básicos da vibrometria laser Doppler foram apresentados, uma vez que os resultados operados pela termografia serão confrontados, no Capítulo IV deste trabalho, com os obtidos pela SLDV e por modelo matemático desenvolvido de forma a reproduzir as características das amostras e condições do ambiente no momento dos ensaios. Tal modelo vem descrito no próximo capítulo deste estudo, dedicado a Materiais e Métodos.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

3.2 – ENSAIOS LABORATORIAIS

3.2.1 – Amostras utilizadas – domínio físico

3.2.2 – Bancada de testes

3.3 – METODOLOGIA PARA DIAGNÓSTICO DE OBRAS DE ARTE ATRAVÉS DE NDTE

3.4 – VALIDAÇÃO DOS ENSAIOS TERMOGRÁFICOS

3.4.1 – Modelo matemático

3.4.2 – Vibrometria laser Doppler

3.5 – ENSAIOS *IN SITU*

3.5.1 – Igreja de São Nicolau (Bălinești)

3.5.2 – Igreja do Monastério Popăuți (Botoșani)

3.5.3 – Igreja da Ressurreição (Monastério de Sucevița)

3.6 – CONCLUSÃO

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O monitoramento de bens culturais permite reunir e agregar informações àquelas já existentes no que se refere à tecnologia de construção, características dos materiais empregados, presença de elementos estruturais não visíveis e estado de preservação e/ou degradação da obra, com a possível localização de defeitos e de danos causados por reações químicas e ataques biológicos.

Em um primeiro momento, tanto em ensaios de laboratório quanto em estudos *in situ*, a maneira mais comumente empregada para levantar as características e reais condições do monumento é a consulta de documentos com dados que relatam o seu projeto, componentes da estrutura e modificações sofridas ao longo do tempo; porém, as análises histórica e documental podem não ser suficientes, uma vez que as informações pertinentes à elaboração e intervenções anteriores, muitas vezes, se perderam com o passar dos anos. A utilização de técnicas não destrutivas, nestes casos, permite operar um diagnóstico mais completo que inclui a validação dos ensaios através da implementação de outras metodologias experimentais e formulação matemática.

Entretanto, deve-se destacar que apesar dos cuidados para reduzir a intrusividade do processo de diagnóstico a ação do restaurador e a técnica empregada fará sempre com que a obra sofra alterações. Por outro lado, intervenções deste tipo são inevitáveis quando se deseja conservar o estado original da peça (Esposito, 2002).

Partindo deste ponto de vista pode-se dizer que não existe uma técnica capaz de resolver toda a problemática de um correto diagnóstico de bens culturais, mas pode-se, de qualquer forma, individualizar a mais adequada a uma determinada situação. Tal escolha é sempre baseada nas características dos equipamentos empregados, que devem possuir sensibilidade tal que permita minimizar a solicitação e maximizar os resultados. Outros aspectos a serem considerados é o tempo de ensaio e a facilidade de compreensão dos resultados.

Neste sentido, a termografia apresenta grandes vantagens, além de que, nem mesmo durante a realização dos ensaios, faz-se necessário tomar medidas de restrições quanto ao acesso do público à visitação da obra, conforme se pôde constatar nos testes *in situ* realizados neste estudo em três diferentes mosteiros romenos, locais de grande afluxo turístico. Ainda neste estudo, tanto para os ensaios termográficos quanto para os testes vibrométricos realizados em laboratório, utilizaram-se amostras confeccionadas por especialistas em restauração que

reproduzem a estrutura e composição dos materiais empregados na confecção de afrescos e obras sobre madeira. Os ensaios foram realizados no *Laboratorio di Misure Meccaniche e Termiche* do *Dipartimento di Meccanica* da *Università Politecnica delle Marche* – na cidade de Ancona, Itália.

3.2 – ENSAIOS LABORATORIAIS

3.2.1 – Amostras utilizadas – domínio físico

O primeiro conjunto de amostras utilizado neste estudo foi concebido de forma a reproduzir afrescos danificados pela presença de delaminações. As peças foram confeccionadas pelo restaurador espanhol Eudald Guillamet, no seu laboratório em Andorra della Vella (Espanha), e fizeram parte do projeto europeu LASERACT – *Laser multitask non-destructive technology in conservation diagnostic procedures*, do qual participou o *Dipartimento di Meccanica* da *Università Politecnica delle Marche*. Financiado pela Comunidade Européia, e realizado entre os anos de 2002 e 2005, o projeto LASERACT tinha como objetivo o desenvolvimento e a implementação de técnicas laser de medição não invasivas para o diagnóstico do estado de preservação de afrescos e pinturas sacras sobre madeira (ícones).

Guillamet numerou as quatro amostras de P0 a P3, de acordo com o defeito apresentado. A Figura 3.1 apresenta a amostra P3 onde, assim como nas demais, podem-se identificar, visualmente, as camadas tipicamente presentes em afrescos.

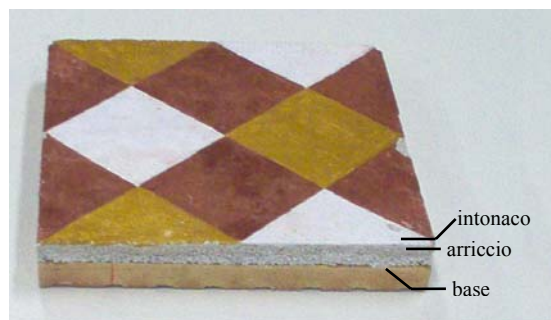


Figura 3.1 – Amostra P3

Na confecção das peças, o restaurador seguiu a estrutura e características dos *buon fresco*. Para o suporte (base) foi utilizada uma peça em barro cozido, do mesmo tipo empregado no revestimento de pavimentos antigos. Com isto, obteve-se um material compacto e resistente. Para o arriccio empregou-se um composto de hidróxido de cálcio e areia grossa (granulometria de 1 a 2 mm) na proporção de 1:3. Já para o intonaco, utilizou-se cálcio e areia

fina na proporção de 1:2,5. Sobre o intonaco, foi realizado um trabalho com motivo geométrico, onde foram empregados pigmentos derivados de terra natural.

Durante a confecção, o suporte de barro foi embebido em água a fim de facilitar a adesão da camada de arriccio. Após a aplicação do arriccio, recobriu-se as amostras com uma fina película plástica a fim de evitar a secagem rápida do conjunto, o que poderia provocar tensões residuais e conseqüentes fissuras. Como na técnica normal de produção de afrescos, logo após a aplicação do intonaco foi realizada a pintura.

A Figura 3.2 apresenta, esquematicamente, as dimensões das amostras que fazem parte do primeiro conjunto analisado e a espessura média das camadas que compõem cada peça.

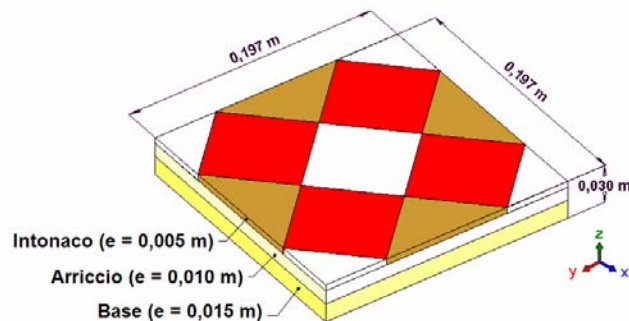


Figura 3.2 – Dimensões das amostras P0, P1, P2 e P3

Os defeitos foram simulados através da introdução de discos de, aproximadamente, 2,5 mm de espessura em posições longitudinais previamente escolhidas e entre as camadas que compõem a amostra. Na confecção de tais discos utilizou-se a mesma substância orgânica empregada na fabricação de hóstias eclesiásticas. O contato desta substância com a umidade, presente nas camadas de arriccio e intonaco, provocou seu dissolvimento parcial, criando, assim, a cavidade representativa da falha.

Na amostra P1, o defeito de, aproximadamente, 90 mm de diâmetro localiza-se entre a base e a camada de arriccio. Na amostra P2, a falha, de mesma dimensão, encontra-se entre o arriccio e o intonaco. Já a amostra P3 apresenta estas duas falhas sobrepostas. A amostra P0, utilizada como referência, foi mantida totalmente íntegra. Na Figura 3.3, podem ser vistas, esquematicamente, as posições aproximadas das falhas simuladas neste primeiro conjunto de amostras.

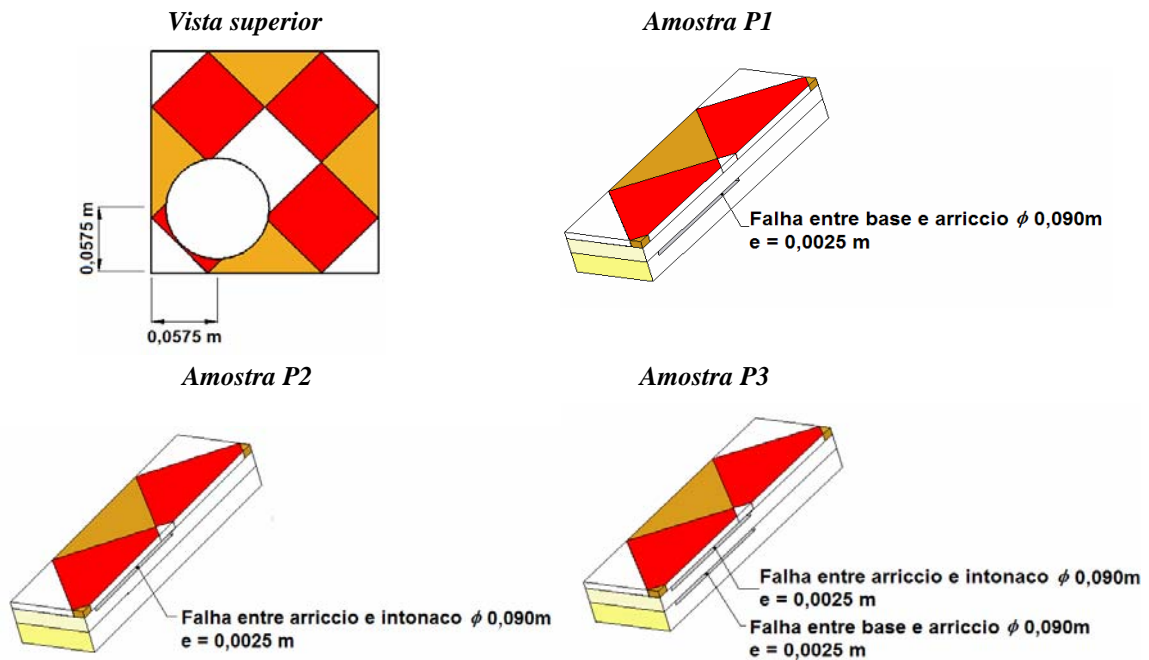


Figura 3.3 – Localização das falhas internas nas amostras P1, P2 e P3

Segundo a norma da ABNT (2003), Incropera e DeWitt (2003) e Feligiotti (2004) as propriedades dos materiais que constituem as amostras podem ser consideradas conforme apresentado na Tabela 3.1. Para o modelo matemático adotaram-se, para a seção da falha, as propriedades do ar fornecidas em Incropera e DeWitt (2003).

Tabela 3.1 - Propriedades amostras P0, P1, P2 e P3

Fonte: ABNT (2003); Incropera e DeWitt (2003); Feligiotti (2004)

	$k [W.m^{-2}.K^{-1}]$	$\alpha [m^2.s^{-1}]$
Intonaco	0,73	$6,21 \times 10^{-7}$
Arriccio	0,70	$5,05 \times 10^{-7}$
Base	0,61	$3,68 \times 10^{-7}$

O segundo conjunto de amostras utilizado neste trabalho também foi concebido de forma a reproduzir afrescos com presença de falhas não aparentes. As amostras fizeram parte do projeto europeu LASERART – *Non-intrusive laser measurement techniques for diagnostics of the state of conservation of frescoes paintings wooden icons* (1996-2000) que contou com a participação do *Dipartimento di Meccanica* da *Università Politecnica delle Marche*. As peças foram, mais uma vez, elaboradas pelo restaurador Eudald Guillamet sob a supervisão do *Laboratoire de Recherches des Monuments Historiques* de Paris. Problemas na conservação

das peças fizeram com que apenas três das amostras preparadas por Guillet estivessem disponíveis quando da realização deste estudo. Elas podem ser vistas na Figura 3.4.



Figura 3.4 – Échantillons 1, 4 e 5

Para as amostras denominadas Échantillon 1 e Échantillon 5, o restaurador utilizou como suporte pedra calcária típica da região de Aragon (Espanha). Na composição do arriccio, empregou-se liga de areia e cal na proporção de 1:3. Para a base da Échantillon 4 foi utilizado material semelhante ao do tijolo comum; para o arriccio, à mistura de areia e cal (proporção de 2:1), foi acrescentada 1 porção de seixo rolado. O intonaco de todas as amostras descritas foi realizado à base de uma mistura composta de 2,5 partes de areia fina para cada parte de cal. Novamente, logo após a aplicação do intonaco, procedeu-se a pintura. As dimensões das amostras podem ser vistas na Figura 3.5.

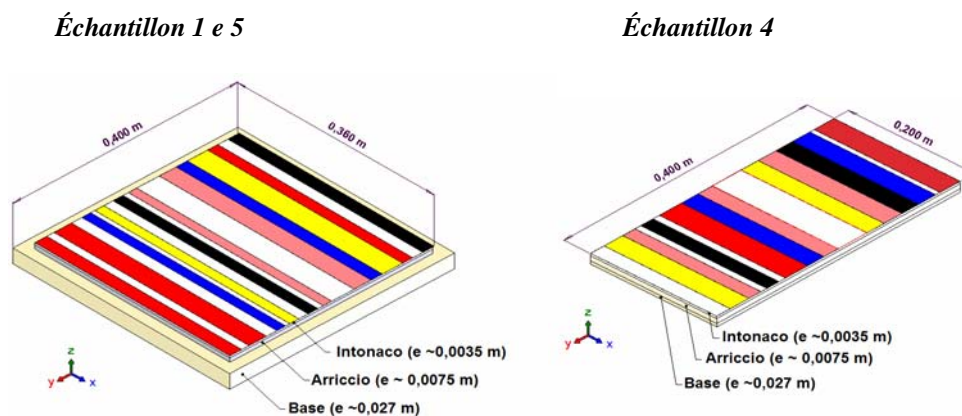


Figura 3.5 – Dimensões das Échantillons 1, 4 e 5

As falhas foram simuladas através da inclusão de uma folha de papel de seda, envolta em um filme plástico transparente, entre as camadas que compõem a peça. Procurou-se, com este procedimento, simular delaminações com formas geométricas não definidas. A Figura 3.6 apresenta, esquematicamente, as formas e localização aproximadas das falhas presentes na Échantillon 1, 4 e 5.

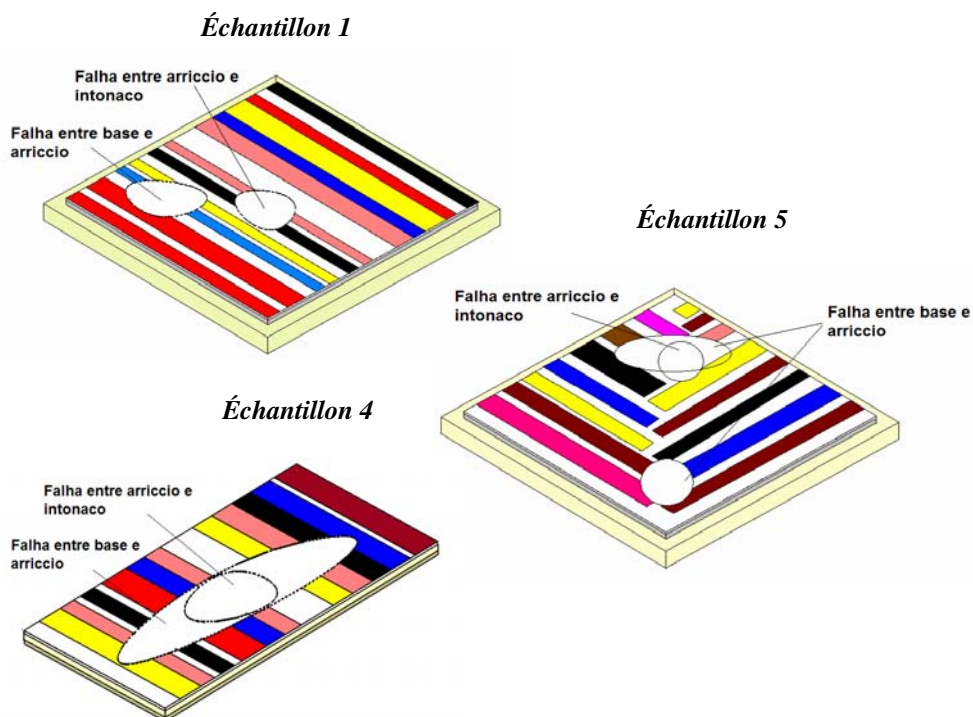


Figura 3.6 – Localização das falhas internas nas Échantillons 1, 4 e 5

As propriedades dos materiais de cada uma das camadas que constituem as amostras foram consideradas conforme Incropera e DeWitt (2003) e norma da ABNT (2003). Descritos na Tabela 3.2, os valores vêm também em acordo aos fornecidos em Feligiotti (2004). Para a seção da falha foram consideradas as propriedades do filme plástico fornecidas em Incropera e DeWitt (2003). As propriedades dos materiais, em conjunto com as do material utilizado na simulação das falhas, foram, mais uma vez, empregados no modelo matemático.

Tabela 3.2 – Propriedades das Échantillons 1, 4, 5

Fonte: ABNT (2003); Incropera e DeWitt (2003); Feligiotti (2004)

	Amostra	k [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	α [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]
Intonaco	Échantillons 1, 4 e 5	0,65	$7,21 \times 10^{-7}$
Arriccio	Échantillons 1 e 5	0,60	$6,97 \times 10^{-7}$
	Échantillon 4	1,76	$7,65 \times 10^{-7}$
Base	Échantillons 1 e 5	0,58	$3,31 \times 10^{-7}$
	Échantillon 4	1,00	$6,79 \times 10^{-7}$

Também durante o projeto LASERACT, com o objetivo de avaliar a capacidade da vibrometria laser Doppler em diagnosticar a presença de descolamentos em obras realizadas

em madeira, foram confeccionadas amostras com características de produção típicas de móveis dos séculos XVII a XIX. Duas destas amostras, elaboradas pelo restaurador francês Pierre-Yves Letienne, foram disponibilizadas para a realização deste estudo. Elas podem ser vistas na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Amostras 1/2 e 3/2

A fina camada de madeira que constitui o acabamento das peças, e, sobre a qual, na amostra 3/2, efetuou-se trabalho de ornamento, foi colada à base empregando-se cola de origem animal. Ainda sobre o ponto de vista de acabamento, a superfície das peças foi dividida transversalmente, sendo que uma das partes foi recoberta por uma camada de verniz. Isto fez com que diferentes valores de emissividade fossem considerados quando da realização dos ensaios experimentais. A Figura 3.8 apresenta as dimensões e as camadas que constituem estas amostras.

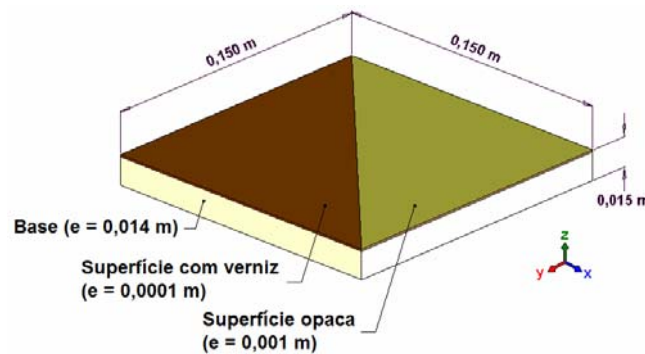


Figura 3.8 – Dimensões das amostras em madeira 1/2 e 3/2

A presença de falhas, com diâmetro de, aproximadamente, 60 mm e espessura de, aproximadamente, 1 mm, foi simulada, nas amostras 1/2 e 3/2, através da inclusão de um filme de Mélinex[®] nas posições entre camadas. Adicionalmente, as variações climáticas às quais foram submetidas acentuaram o processo de destacamento, pois a presença de umidade promove a perda do poder de aderência da cola animal. A posição e espessura aproximada da falha podem ser vistas na Figura 3.9.

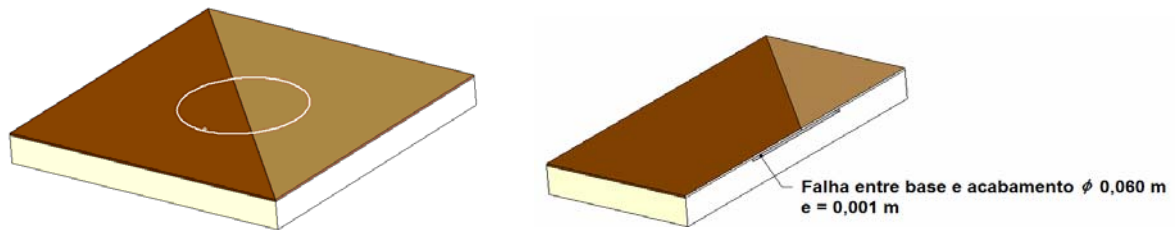


Figura 3.9 – Localização da falha nas amostras 1/2 e 3/2

Segundo Incropera e DeWitt (2003), as propriedades dos materiais que constituem as amostras de madeira podem ser consideradas conforme apresentado na Tabela 3.3. Estes valores foram também empregados quando da implementação do modelo matemático. Para a seção da falha, foram consideradas as propriedades do filme de Mélinex[®] fornecidas pelo manual do fabricante (2006).

Tabela 3.3 – Propriedades da amostras 1/2 e 3/2

Fonte: Incropera e DeWitt (2003)

	$k [W.m^{-2}.K^{-1}]$	$\alpha [m^2.s^{-1}]$
Base	0,29	$2,17 \times 10^{-7}$
Superfície	0,29	$2,17 \times 10^{-7}$

Embora não se possa dizer que tais amostras caracterizem ícones, as semelhanças com algumas obras do barroco mineiro e o tipo de falhas simuladas mostraram-se relevantes para a avaliação do método termográfico.

Para avaliação termográfica de pinturas sobre madeira, utilizou-se, ainda, neste estudo, uma amostra, de dimensões iguais a 0,235 x 0,300 x 0,018 m, confeccionada de forma similar à estrutura típica dos antigos ícones bizantinos. Nesta amostra, para a fixação da tela de linho à base, constituída por um painel de madeira, utilizou-se cola de origem animal. Sobre a tela de linho, assentou-se uma fina camada de gesso, sobre a qual, como em ícones reais, executou-se diretamente a pintura, trabalho de douramento e aplicação da camada protetora de verniz.

Conforme pode ser visto na Figura 3.10, a parte superior da amostra apresenta o trabalho completo. Na parte inferior, as principais camadas que compõem a peça foram deixadas expostas e identificáveis. As dimensões de cada uma das camadas podem ser vistas na Figura 3.11.



Figura 3.10 – Amostra – Ícone Bizantino

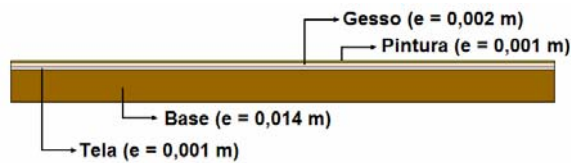


Figura 3.11 – Dimensões da amostra – Ícone Bizantino

Nenhum defeito interno encontrava-se presente nesta amostra. Sua escolha como amostra visa a utilização dos resultados obtidos experimentalmente como base ao modelo matemático, no qual descolamentos na interface das camadas foram simulados; por conseqüência, poder-se-ia prever o comportamento de uma amostra real quando da existência de tais ocorrências. As propriedades térmicas foram admitidas no modelo com valores iguais às utilizadas em Grinzato *et al.* (2002a) e estão expressas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Propriedades amostras de ícone

Fonte: Grinzato *et al.* (2002a)

	k [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	α [$m^2 \cdot s^{-1}$]
Base	0,17	$1,3 \times 10^{-7}$
Tela em linho	0,25	$1,1 \times 10^{-6}$
Gesso	0,51	$4,7 \times 10^{-7}$
Pintura	0,145	$8,7 \times 10^{-8}$

3.2.2 – Bancada de testes

A bancada de testes utilizada durante os ensaios termográficos realizados neste estudo encontra-se no *Laboratorio di Misure Meccaniche e Termiche* do *Dipartimento di Meccanica*

da *Università Politecnica delle Marche* e é apresentada, esquematicamente, na Figura 3.12.

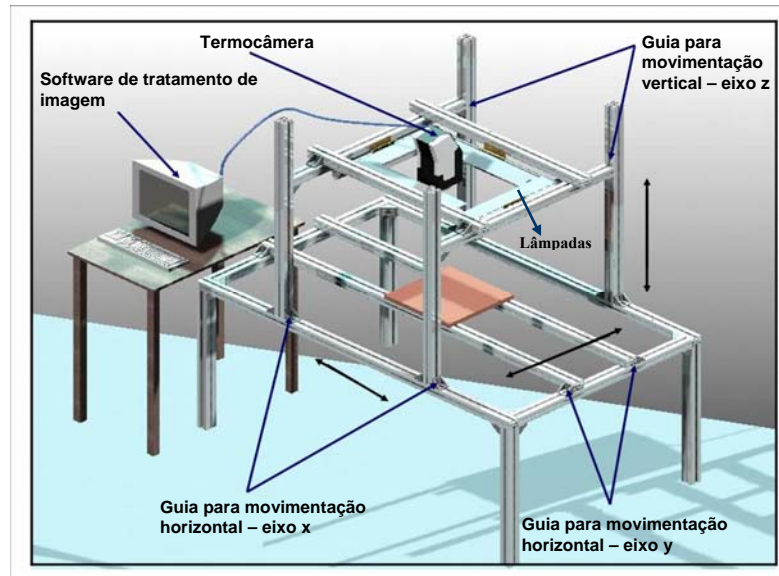


Figura 3.12 – Esquema da bancada de testes

A maneira com que a bancada foi construída permite a movimentação, através de guias, das barras que servem de suporte à amostra. Montadas na parte superior da bancada, como apresentado na Figura 3.12, as guias possibilitam o livre posicionamento da amostra no campo formado pelas direções x e y . A utilização de barras auxiliares acrescentava a possibilidade de movimento no sentido vertical (direção z). Tal flexibilidade possibilitou a melhor localização da superfície a ser analisada dentro do campo de visão da termocâmara. A Figura 3.13 apresenta a bancada preparada para a execução de um ensaio, com barras de suporte para amostras montadas na parte inferior do conjunto.



Figura 3.13 – Bancada de testes

O sistema de excitação térmica, composto de quatro lâmpadas de quartzo, cada qual com potência de 1000 W, pode ser visto na Figura 3.14.



Figura 3.14 – Sistema de excitação térmica

Para evitar a dispersão de energia, as lâmpadas que compunham o sistema foram montadas dentro de canaletas móveis que permitiam a mudança do ângulo de inclinação, direcionando a energia à superfície a ser excitada. O detalhe da montagem de uma das lâmpadas que compunham o conjunto pode ser visto na Figura 3.15.



Figura 3.15 – Detalhe da montagem de uma das lâmpadas

Mais uma vez, a configuração da bancada permitia a escolha do posicionamento do sistema de aquecimento tanto no sentido horizontal (eixo x e y) quanto vertical (eixo z). O aquecimento uniforme foi obtido através do posicionamento das quatro lâmpadas a distâncias iguais em relação às bordas da amostra e com mesmo ângulo de inclinação. Circuitos eletrônicos permitiam controlar o instante do acendimento das lâmpadas e o ajuste do tempo de aquecimento. O sistema permitia, ainda, o acendimento simultâneo de todas as quatro lâmpadas como também de somente duas delas, desde que posicionadas na mesma direção. O sistema de controle pode ser visto na Figura 3.16.



Figura 3.16 – Sistema de acionamento das lâmpadas

Condições de contorno convectivas foram garantidas pela exposição das superfícies das amostras ao ambiente. As laterais foram isoladas termicamente.

Para a determinação da temperatura ambiente, utilizou-se termômetro com incerteza de medição expandida para 95% igual a $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ para esta faixa de temperatura. A umidade relativa do ar foi calculada a partir da temperatura de bulbo seco e bulbo úmido fornecidas por psicrômetro, instalado no laboratório onde foram realizados os ensaios. A incerteza máxima do instrumento, relacionada pelo fabricante, na determinação da temperatura é de $\pm 1\%$. Durante os testes, e com a finalidade de auxiliar na determinação da emissividade superficial da amostras, foram utilizados dois termopares tipo T instalados na superfície das mesmas. A incerteza expandida do conjunto termopar/indicador de temperatura foi determinada em calibração como sendo de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$.

O sistema de aquisição de imagem era composto de termocâmara FLIR ThermaCAMTMS40, cujas características estão descritas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Características da termocâmara FLIR ThermaCAMTMS40

ITEM	ESPECIFICAÇÃO
Frequência de operação	60/60 Hz
Distância focal	0,3 m até o infinito
Faixa de temperatura observável, padrão	- 40°C a 120°C 0°C a 500°C 350°C a 1500°C
Incerteza de medição (para 30°C no corpo negro)	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ ou 2% do valor indicado
Campo de visão	24° (horizontal) x 18° (vertical)
Número de pixels da imagem térmica	320 x 240
Sistema de resfriamento do detector	Microbolômetro sem resfriamento
Resposta espectral	7,5 to 13 μm ;
Sensibilidade térmica	< 0,08°C

Para o tratamento das imagens, utilizou-se o software ThermaCAM Researcher 2004, fornecido pelo fabricante da termocâmara e o programa IR View v1.2, desenvolvido por Pilla, Maldague e Klein (2003) em ambiente MATLAB.

3.3 – METODOLOGIA PARA DIAGNÓSTICO DE OBRAS DE ARTE ATRAVÉS DE NDTE

A falta de informações sobre a estrutura que compõe afrescos e obras sobre madeira, a diversidade de materiais empregados e mais, a heterogeneidade quanto às cores e origem dos pigmentos utilizados na execução do motivo, o número de camadas e sua espessura, que pode mudar de forma imprevisível, fazem com que seja necessário definir uma metodologia de ensaio aplicável ao diagnóstico destas peças. Obviamente, esta metodologia deve abranger considerações não só acerca das propriedades físicas dos materiais presentes na obra, mas também sobre suas características superficiais, que influenciam de forma preponderante os resultados. Deve, ainda, considerar as condições ambientais presentes no momento dos testes, calibração do equipamento, entre outras variáveis, que possibilitem a reprodutibilidade dos ensaios, uma análise consistente da incerteza dos resultados obtidos e a validação da técnica dentro dos limites de tolerância impostos pelos setores ligados à preservação de bens culturais.

Com base na análise de diversos trabalhos que utilizam a termografia como ferramenta de avaliação em vários setores, pôde-se propor uma metodologia para o diagnóstico da integridade de obras de arte através de NDTE, adotada, neste estudo, tanto nos ensaios laboratoriais quanto nos ensaios *in situ* realizados. Elaborada em forma de etapas, tal metodologia vem descrita a seguir, juntamente com os parâmetros operacionais empregados neste trabalho e algumas considerações teóricas que justificam a adoção dos procedimentos.

ETAPA 1 – Escolha da estimulação térmica

A escolha da excitação térmica em um determinado estudo deve sempre ser baseada nas características do objeto sob avaliação, suas restrições quanto ao aquecimento superficial, na tipologia da análise a ser efetuada e, sobretudo, nos resultados almejados. Neste sentido, deve-se, inicialmente, avaliar a necessidade da implementação de métodos artificiais de aquecimento (termografia ativa) ou se condições de contorno naturais bastam à análise (termografia passiva).

- **Termografia ativa x termografia passiva** – por seu caráter totalmente não intrusivo e pela restrição de submeter à superfície um maior aquecimento, é normal que exista uma predileção inicial pela utilização da termografia passiva no caso da avaliação de obras de arte. Na verdade, em estudos *in situ* que visam uma análise qualitativa como, por exemplo,

a identificação de pontos com presença umidade e de estruturas não aparentes, a termografia passiva, na maioria das vezes, leva a resultados satisfatórios. Porém, em casos mais específicos, como na identificação de pequenos descolamentos e falhas internas, é necessário que a superfície sob análise receba carga térmica suficiente para que um diferencial de temperatura entre as regiões íntegra e com presença de irregularidades seja alcançado, o que nem sempre é possível sem a utilização de meios artificiais de excitação. De qualquer forma, em situações que visem uma análise quantitativa, mesmo que a termografia ativa seja a mais indicada, o emprego de qualquer uma das técnicas é teoricamente viável, desde que a energia térmica recebida pela superfície seja devidamente quantificada, o que gera, também, resultados passíveis de serem validados do ponto de vista matemático.

No caso da termografia passiva, os fatores mais relevantes a serem levados em consideração quando da implementação da técnica são:

- **Período do ano** – devido à dependência direta das condições ambientais, sobretudo quando operada em ambientes abertos, a escolha do período do ano para a realização dos testes é fator importante no sentido de maximizar os resultados. Geralmente, condições de verão, representadas por alta insolação, aumentam o diferencial de temperatura entre a região íntegra e com presença de patologia não visível. Porém, deve-se observar que no caso de países tropicais como o Brasil, o verão é caracterizado por alta nebulosidade e umidade, fatores prejudiciais aos ensaios, já que aumentam os ruídos de medição. Por outro lado, a menor incidência de raios solares durante o inverno pode, em parte, ser compensada pela baixa ocorrência de nuvens. Em países da Europa, ensaios realizados entre o final da primavera e o início do outono apresentam resultados mais satisfatórios. Isto porque, diferentemente do Brasil, o verão na maioria das cidades européias é caracterizado por ser quente e com baixa incidência de chuvas, o que o torna totalmente favorável à metodologia.
- **Sombreamento e reflexos solares** – a tomada de imagens deve ser sempre feita de forma a evitar sombreamento e reflexos solares, que podem influenciar, de forma significativa, as informações. Para avaliações efetuadas a céu aberto, a realização de ensaios nas primeiras horas da manhã e logo após o poente geralmente evita tais problemas e favorece os testes no que diz respeito à obtenção do aquecimento uniforme da superfície.
- **Tomada de imagens** – com o propósito de se monitorar, de uma forma global, o

comportamento térmico da estrutura, é importante que a observação seja feita, sempre que possível, tanto durante o período de aquecimento (do amanhecer até o horário de maior incidência solar, que é em função da latitude e longitude do local dos testes e período do ano), quanto do resfriamento (do horário de maior incidência solar até o crepúsculo). O registro das imagens deve ser feito em intervalos de tempo tais que permitiram identificar a capacidade do teste em diagnosticar as patologias desejadas durante estes dois períodos.

Já quando da aplicação da termografia ativa, a modalidade do método de excitação confere condições peculiares aos ensaios.

- **Procedimento de medição da PT** – excita-se a estrutura através de um pulso de energia de tempo finito. A análise é feita com base no contraste térmico e no gradiente de temperatura entre a área com e sem defeito, sendo que o melhor momento de observação e, conseqüentemente, para identificação do defeito, coincide com o instante onde ocorre o máximo contraste térmico.
- **Procedimento de medição da MT** – inicia-se a excitação adotando-se altos valores de freqüência, o que permite a análise das camadas mais superficiais da amostra; gradualmente, diminuem-se estes valores, a fim de que toda a espessura da peça possa ser analisada. Com isto, se reproduz o procedimento aconselhável, também, para ensaios *in situ*, onde a escolha das freqüências acaba por tomar um caráter de tentativa e erro, o que demanda, muitas vezes, longo período de testes. Por outro lado, a capacidade de se determinar a profundidade e espessura do defeito, através da relação existente entre freqüência de excitação e comprimento da difusão térmica, agrega valor à técnica, embora exista o problema de que defeitos mais profundos podem não ser identificados quando da escolha inadequada da freqüência de excitação.
- **Procedimento de medição da PPT** – o pulso de energia é fornecido como na PT, porém, durante o tratamento de dados, aplica-se uma ferramenta matemática (transformada de Fourier) que fornece resultados em função da amplitude, freqüência e fase da onda térmica.
- **Limites de temperatura** – na termografia pulsada, os limites de temperatura considerados seguros para cada tipologia de obra representada devem ser respeitados de forma a não gerar danos: o pulso de energia deve ter duração e energia tal que gere um diferencial de temperatura entre área íntegra e com presença de falha capaz identificar a ocorrência sem, porém, elevar, de forma danosa, as temperaturas superficiais. Este fator acaba por restringir

a implementação da PPT a casos particulares, já que grandes gradientes de temperatura são necessários. Por outro lado, justamente devido aos pequenos diferenciais de temperatura requeridos, dentre os métodos de excitação ativa, pode-se dizer que a MT seja o mais indicado para o diagnóstico de bens culturais.

- **Uniformidade do aquecimento** – uma vez que os falsos alarmes de irregularidade e as dificuldades na análise podem estar relacionados à não homogeneidade da energia à qual a superfície é submetida, a observância deste item deve ser comum à termografia pulsada, modulada e modulada por fase.
- **Aquisição de imagens** – independente do tipo de excitação térmica adotada, a aquisição de imagens pode ser realizada no momento de aquecimento da superfície, do seu resfriamento ou em ambos. O intervalo entre a tomada de imagens sucessivas deve ser tal que não permita a perda de informações relevantes. O tempo de aquisição deve ser definido de forma que dados importantes não sejam ignorados; ou seja, para a PT e PPT deve-se realizar a análise até que o contraste térmico seja significativo e para a MT até que toda a espessura do objeto seja analisada ou, em casos que este procedimento não seja viável, pelo menos, por um ciclo das ondas térmicas.

Para os ensaios *in situ* realizados neste estudo, já que o objetivo das medições era a identificação de umidade, estruturas não-visíveis e inclusões não aparentes, o que requeria apenas análise qualitativa dos dados, somente o método passivo foi implementado. Os testes foram realizados durante o mês de Julho, o que favoreceu a obtenção de dados pela pouca ocorrência de chuvas. Os reflexos solares foram evitados durante a tomada de imagens e as ocorrências de sombreamento sobre as superfícies analisadas levadas em consideração. Analisou-se tanto o aquecimento quanto o resfriamento dos monumentos estudados. Para tanto, foram tomadas séries de imagens termográficas, obtidas em intervalos de tempo tais que permitiram acompanhar o comportamento da estrutura e identificar as patologias durante estes dois períodos.

O objetivo dos testes em laboratório era a identificação de falhas internas nas amostras, levando-se em contas variáveis geradoras de incerteza de medição, o que requeria análise quantitativa dos resultados. Implementou-se, então, a termografia ativa, utilizando-se dois métodos de excitação térmica: a *Pulsed Thermography*, PT, e a *Modulated Thermography*, MT. Optou-se por não utilizar a *Pulse Phased Thermography*, PPT, visto que esta difere da PT apenas pelo processamento do sinal. Por outro lado, poucas informações significativas

seriam agregadas àquelas obtidas pela PT, além de existir a necessidade de impor altos diferenciais de temperatura às amostras o que, em situações reais, pode se tornar prejudicial.

Na termografia pulsada, com o objetivo de se respeitar os limites de temperatura considerados seguros para cada tipologia de obra estudada, empregaram-se tempos de aquecimento diversos para cada uma das amostras utilizadas. Uma primeira aproximação foi feita a partir do modelo matemático que indicou, baseando-se nas características térmicas de cada uma das peças, a mínima energia necessária para que os defeitos fossem evidenciados sem que uma temperatura crítica fosse alcançada. Já a energia fornecida às peças pôde ser bem quantificada experimentalmente, uma vez que a curva de aquecimento de cada uma das lâmpadas era conhecida. A uniformidade do aquecimento, por sua vez, foi verificada analisando-se o decaimento de temperatura de áreas íntegras localizadas em posições diversas nas amostras. Adotou-se, então, para o sistema de aquecimento posição em relação às amostras que garantisse tal homogeneidade. A energia absorvida pelas peças, em cada um dos ensaios, está discriminada, juntamente com os resultados obtidos, para cada uma das amostras, no Capítulo IV desta tese.

Na implementação da termografia modulada adotou-se o procedimento tradicional para a escolha das frequências de excitação. Os valores empregados para a análise de cada amostra estão especificados no próximo capítulo deste estudo, destinado apresentação dos resultados.

Tanto na PT quanto na MT, o início do processo de aquisição de imagens ocorreu simultaneamente ao início da excitação térmica, o que possibilitou analisar tanto o processo de aquecimento da amostra quando o decaimento da sua temperatura superficial. As imagens foram tomadas em intervalos iguais a 1 segundo de forma a não permitir a perda de informações e favorecer a obtenção do número suficiente de dados necessários à caracterização da falha e futura análise de incerteza.

O tempo de aquisição de dados variou de amostra para amostra. Para a PT foi determinado em função do contraste térmico, ou seja, analisou-se o decaimento de temperatura até que o contraste térmico, obtido pela Equação (2.5), não fosse significativo. Para a MT, utilizaram-se dois ciclos das ondas térmicas, que variaram de acordo com a frequência utilizada em cada caso analisado.

ETAPA 2 – Estudo prévio das propriedades termofísicas do material e características ópticas da superfície. Determinação da emissividade superficial.

Mesmo em projetos onde os resultados obtidos através de NDTE não são validados a partir de análise teórica, é essencial o conhecimento das propriedades termofísicas do material do objeto sob análise: são justamente as propriedades termofísicas que permitem prever o comportamento do processo difusivo a partir da estimulação térmica da superfície e condições de contorno e, daí, antever os resultados, identificando possíveis anomalias nas respostas.

No caso de diagnóstico em obras de arte, é bastante real a dificuldade em se controlar tais variáveis devido à diversidade de materiais passíveis de serem encontrados nas diversas camadas que compõem a peça e a sua espessura nem sempre uniforme. Duas são as maneiras usuais para a determinação das propriedades termofísicas que compõem as camadas de afrescos e obras em madeiras, entre outros tipos de produção artística:

- **Consulta bibliográfica e a registros históricos** – este parece ser o ponto de partida quando da análise das características dos materiais envolvidos na confecção de qualquer tipo de produção artística. A consulta a material, seja bibliográfico tradicional, sejam registros históricos, documentais ou informações provenientes de estudos anteriores, fornece dados sobre as peculiaridades construtivas típicas de um determinado período, região, e dos materiais disponíveis e comumente empregados na execução da obra. Isto ajuda na compreensão da constituição do monumento e permite uma análise mais completa das informações.
- **Emprego de outras técnicas** – em situações cotidianas de avaliação do estado de degradação em obras de arte onde, muitas vezes, pela ausência de dados, não se tem o real conhecimento das características do material, podem-se utilizar outras técnicas não destrutivas, como o raio-X e espectrometria, com o objetivo de se obter tais informações. Também a termografia tem sido utilizada na caracterização de materiais, porém, encontra-se ainda restrita ao estudo de materiais homogêneos. Por sua vez, técnicas de análise comparativa ajudam no sentido de caracterizar e classificar, a partir da velocidade de difusão, a estrutura dentro de uma classe de material já conhecida, ou mesmo especificar uma nova classe.

No caso deste estudo, admitiram-se, como propriedades médias dos materiais que compunham as amostras, os valores encontrados na bibliografia e descritos nas Tabelas 3.1 a 3.4. No caso dos testes realizados *in situ* foram consideradas as informações documentais disponíveis, provenientes de estudos anteriores e de medições realizadas por outros especialistas dentro do projeto CULTURA 2000.

Independente, se o estudo é laboratorial ou *in situ*, atenção especial deve ser dedicada à determinação da emissividade da superfície, essencial para o ajuste da termocâmara e avaliação da incerteza de medição. O desconhecimento ou erros grosseiros na determinação desta variável provoca variação dos resultados e é uma das responsáveis pelos falsos alarmes de irregularidades.

Neste trabalho, dois foram os métodos empregados no ajuste da emissividade da superfície:

- **Calibração do sistema sem contato em relação a um sistema com contato de menor incerteza** – o método consiste em ajustar a emissividade da termocâmara até que a temperatura indicada por ela tenha os mesmos valores daquela indicada pelo sistema com contato de menor incerteza, no caso deste estudo, obtidos pelos termopares tipo T instalados na superfície das amostras e paredes afrescadas da Igreja de São Nicolau em Bălinești, da Igreja do Monastério Popăuți e da Igreja da Ressurreição.
- **Calibração do sistema sem contato em relação a um padrão de emissividade** – o procedimento consiste em recobrir uma região, mesmo que mínima, da superfície a ser analisada por material de emissividade conhecida (no caso deste estudo, fita isolante 3M[®]). Ajusta-se então a emissividade na termocâmara até que a temperatura indicada por ela, para região a ser estudada, tenha os mesmos valores daquela recoberta com o padrão de emissividade.

O primeiro procedimento descrito é preferido no setor de diagnóstico de obras de arte, uma vez que a adesão de qualquer tipo de material à superfície de algumas peças é, em grande parte das vezes, inadmissível.

Um problema encontrado neste estudo foi com relação à diversidade de cores e acabamento superficial que fez com que as superfícies analisadas, sejam nos testes de laboratório quanto no estudo *in situ*, apresentassem variações, mesmo que da ordem de décimos, no valor da emissividade. O procedimento sugerido neste caso e implementado neste trabalho consiste no ajuste da termocâmara com os valores da emissividade média obtido nas medições e, sempre que possível e necessário, realizar posteriores ajustes por área quando do tratamento das imagens. Demais variações foram consideradas pela análise de incerteza de medição.

ETAPA 3 – Ajuste da distância da termocâmara à amostra e ângulo de visão.

Devido à capacidade dos materiais de emitir radiação em diferentes direções existe a

necessidade que se mantenha um ângulo entre a termocâmara e o mensurando o mais próximo possível de noventa graus. Isto faz com que possíveis distorções na imagem sejam evitadas, como no caso das fotografias convencionais. Entretanto, existe certa tolerância neste sentido, representada pelo ângulo do campo de visão indicado pelos fabricantes. Por outro lado, uma vez que a incerteza referente a este item é de difícil determinação e está presente mesmo quando as limitações indicadas pelos fabricantes são obedecidas, sugere-se que, a menos que condições técnicas não o permitam, a perpendicularidade entre o objeto e a termocâmara seja observada, o que foi feito neste trabalho, tanto nos ensaios laboratoriais quanto nos testes *in situ*, com o objetivo de diminuir os ruídos de medição.

Já a distância entre o objeto em estudo e a termocâmara deve estar em acordo com as indicações do fabricante, ou seja, dentro do campo de visão instantâneo (IFOV) da termocâmara, permitindo a melhor resolução da imagem térmica. Isto porque, o aumento da distância entre a termocâmara e o objeto acaba por ser determinante da qualidade da imagem, já que a resolução da imagem termográfica decresce com o aumento da distância. Uma vez que cada ponto na imagem termográfica corresponde a uma área específica da superfície do objeto, o aumento da distância implica que cada um destes pontos representa uma maior área. Como resultado, a radiação captada pelo sistema de medição é uma média da radiação emitida por esta área, ou seja, a média emitida por cada ponto do objeto. Isto faz com que alguns detalhes da imagem sejam perdidos, sendo crítico em superfícies com alta variação de emissividade. Adicionalmente, maiores distâncias entre o mensurando e o sistema de medição diminui a relação sinal-ruído devido à relação inversamente proporcional entre a energia captada pelo equipamento e o quadrado da distância. Ainda neste sentido, outro fator que deve ser observado é que o aumento da distância entre o mensurando e o sistema de medição aumenta também os efeitos da transmitância do meio sobre os resultados. Desta forma, a máxima distância a ser implementada deve ser tal que os efeitos da transmitância do meio sejam minimizados.

Por outro lado, embora a análise individual de pequenas áreas do mensurando, possível com a adoção de menores distâncias entre superfície a ser analisada e sistema de medição, maximize a qualidade dos resultados, aumentam o tempo de ensaio. Daí a importância da observância deste item e a escolha de uma distância adequada que consiga fornecer as informações necessárias em um tempo de ensaio condizente.

As distâncias empregadas entre amostra e sistema de medição nos ensaios laboratoriais estão

dentro do campo de visão instantâneo do equipamento e vêm discriminadas juntamente com os resultados obtidos e os comentários a respeito da influência desta variável sobre as respostas fornecidas.

ETAPA 4 – Determinação/controle da temperatura, transmitância e umidade relativa do meio

Se por um lado a determinação da temperatura ambiente e transmissividade do meio são essenciais na estimativa da incerteza de medição, por outro, estas variáveis, juntamente com a umidade relativa atmosférica local, representam parâmetros de ajuste do sistema de aquisição de imagens.

Com respeito à temperatura do meio, apesar de possuírem sistema interno de compensação, os sistemas infravermelhos são sensíveis a temperaturas ambiente extremas que podem influenciar no desempenho do equipamento, produzindo flutuações nos resultados. Além disto, uma grande variação da temperatura pode influenciar de forma imprevisível as características térmicas e superficiais dos materiais. Por isto, temperaturas mais próximas daquelas empregadas durante o processo de calibração são desejáveis durante os ensaios.

Se em condições laboratoriais é possível controlar a temperatura e a umidade do meio através de sistemas artificiais e, com isto, quantificar e minimizar seus efeitos, já em condições de ensaios *in situ*, na maioria das vezes, o controle é impossível, o faz com que seja necessária a sua determinação com a menor incerteza associada possível. Por outro lado, os efeitos da transmitância do meio podem ser quantificados ou mesmo desprezados, desde que a máxima distância entre o objeto sob análise e a termocâmara e condições ambientais sejam tais que permitam esta hipótese.

Durante a realização dos ensaios laboratoriais e *in situ*, a temperatura ambiental manteve-se dentro dos valores utilizados na calibração do equipamento (entre 20 e 30°C), tendo sido determinada através de termômetro com incerteza de medição expandida para 95% igual a $\pm 0,2^\circ\text{C}$ para esta faixa de temperatura. A umidade relativa do ar foi calculada a partir da temperatura de bulbo seco e bulbo úmido fornecidas por psicrômetro, instalado no laboratório onde foram realizados os ensaios. A incerteza máxima do instrumento, relacionada pelo fabricante, na determinação da temperatura é de $\pm 1\%$. Os valores indicados para a temperatura e umidade do meio, imediatamente antes das medições, foram utilizados no ajuste da termocâmara para a tomada de cada série de imagens e, posteriormente, no cálculo da incerteza.

A pouca distância utilizada entre as amostras e o sistema de medição durante os ensaios em laboratório e *in situ* permitiu admitir valores de transmitância iguais a $0,99 \pm 0,01$. De qualquer forma, os cálculos, assim como a bibliografia consultada (Chrzanowski, 2001a; Minkina e Dudzik, 2006), indicaram que a parcela de incerteza desta variável é consideravelmente inferior às demais. Mais uma vez, este foi o valor adotado, em cada série de imagens, para o ajuste da termocâmara e cálculo da incerteza de medição.

Efeitos do vento podem ainda influenciar os resultados à medida que aumentam o coeficiente convectivo e, conseqüentemente, a perda de calor para o ambiente. Embora em algumas condições, como na identificação de vazamentos e infiltrações, a presença de vento seja positiva, no caso específico deste trabalho, a realização de ensaios em momentos com alta incidência de rajadas de ar produziria erros, considerados pelos autores como grosseiros e, portanto, não quantificados no cálculo da incerteza. Por este motivo, durante os testes *in situ*, as medições somente foram efetuadas com velocidades de vento próximas a zero, sendo que a quantificação dos valores foi realizada através de anemômetro com incerteza de medição igual a 0,5% do fundo de escala. Nos ensaios em laboratório, esta variável não se encontrava presente.

ETAPA 5 – Repetição dos ensaios

A repetição dos ensaios é utilizada como fundamental ferramenta na determinação da incerteza de medição. Por isto, toma especial importância neste trabalho pelo próprio escopo do estudo. Além disto, é justamente a repetitividade de informações sobre o comportamento térmico da estrutura que aumenta a possibilidade de identificação e caracterização de falhas e evita falsos alarmes de irregularidades por se confundir defeitos reais com, por exemplo, variações na granulometria dos materiais que compõe a obra.

Durante este estudo cada ensaio laboratorial foi repetido doze vezes; ou seja, para cada técnica de excitação térmica, duração ou freqüência da excitação, distância entre o sistema de medição e cada uma das amostras, foram efetuadas doze seqüências de imagens, com idêntico intervalo de aquisição entre imagens subseqüentes. Para o estudo *in situ*, a disponibilidade de tempo de acesso à obra não favoreceu o estudo sob este ponto de vista e apenas uma série de medidas foi efetuada.

ETAPA 6 – Análise da imagem

Em ensaios termográficos, a análise da imagem é realizada através da identificação dos

gradientes de temperatura da área íntegra e com presença de falhas e da intensidade do contraste presente na imagem digital. Para isto, são empregados softwares de diferentes origens e complexidades.

No caso deste estudo, para a análise das imagens térmicas obtidas em laboratório foram utilizados o ThermaCAM Researcher 2004, programa dedicado da termocâmara FLIR ThermaCAMTMS40, e o IR View v1.2, desenvolvido por Pilla, Maldague e Klein (2003). Para os ensaios *in situ* empregou-se um terceiro software, o PE Analyser 2.03, uma vez que era este o programa dedicado da termocâmara utilizada nestes testes (Nippon Neo Thermo TVS-600 Series).

Todos os três softwares utilizados no tratamento das imagens, independente do tipo de excitação térmica, fornecem a variação temporal do campo de temperatura da superfície analisada, identificam gradientes de temperatura pontuais ou médios de uma determinada área, oferecem a possibilidade de modificar valores de variáveis como transmissividade, temperatura ambiente e emissividade de um determinado setor da superfície ou de toda ela, dentre outras funções. Além disto, com o auxílio do ThermaCAM Researcher 2004, foi possível determinar o contraste térmico, localizar e identificar a dimensão do defeito e, através da aplicação da Equação (2.7), estimar a sua profundidade.

Optou-se pela implementação do programa IR View v1.2 sobre os resultados obtidos em laboratório uma vez que, através da opção de emprego de filtros gaussianos, é possível maximizar a qualidade das respostas, melhorando a visualização dos defeitos. Os resultados tratados pelo IR View v1.2, quando apresentados no Capítulo IV, contêm referência ao programa.

ETAPA 7 – Cálculo da incerteza da medição

O cálculo da incerteza de medição da temperatura representa ferramenta de fundamental importância na validação definitiva da termografia no setor de avaliação da integridade de monumentos artísticos visto que confere a confiabilidade metrológica desejada aos resultados obtidos.

Para a estimativa da incerteza padrão combinada, aplicou-se a Equação (2.30) em cada instante do resfriamento da amostra, onde os valores da incerteza padrão devido à emissividade efetiva do objeto, $u(\epsilon_r)$, devido a temperatura ambiente, $u(T_{ba(r)})$, e devido a transmitância efetiva da atmosfera, $u(\tau_{a(r)})$ foram calculados pelas Equações (2.34) a (2.36).

Os coeficientes de sensibilidade referentes à emissividade, temperatura e transmissividade do meio foram calculados através das Equações (2.31), (2.32) e (2.33), respectivamente. O procedimento de cálculo consistiu na solução das equações através da implementação de programa desenvolvido em ambiente MATLAB.

A parcela referente à incerteza padrão intrínseca da termocâmara foi obtida do último relatório de calibração e vem explicitada nas tabelas que constam no Anexo II deste trabalho.

A incerteza padrão combinada, $u_c(T_{out})$, foi expandida para um nível de confiança de 95% assumindo-se distribuição uniforme de probabilidades.

3.4 – VALIDAÇÃO DOS ENSAIOS TERMOGRÁFICOS

Neste trabalho, os resultados experimentais obtidos quando da implementação da metodologia de ensaio sugerida foram validados de duas formas: através da implementação de modelo matemático de solução numérica e comparação dos resultados obtidos com aqueles oriundos da implementação da SLDV, já consagrado no setor de preservação de obras de arte.

3.4.1 – Modelo matemático

A validação do método termográfico foi feita a partir do modelo matemático de difusão térmica. A equação que governa este fenômeno, em coordenadas cartesianas tridimensionais (x, y, z), regime transiente e sem geração de energia, é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

onde k é a condutividade térmica, ρ é a massa específica, C_p é o calor específico e t é o tempo.

A característica estrutural das amostras analisadas impôs a aplicação da equação da difusão (3.1) a cada camada de material que compõe as peças.

As condições iniciais empregadas para a termografia pulsada foram:

$$T(x, y, z, 0) = \frac{Q}{\rho C_p \zeta}, \text{ para } 0 < z < \zeta \quad (3.2)$$

$$T(x, y, z, 0) = T_0, \text{ para } z > \zeta \quad (3.3)$$

onde T_0 é a temperatura inicial das amostras, isto é, a temperatura em que se encontram antes da excitação térmica; ζ é a espessura da última camada de material que recobre a superfície e que absorve o impulso térmico, Q , fornecido pelo conjunto de lâmpadas instaladas na bancada de testes. Para as amostras P0, P1, P2 e P3 e para as amostras denominadas Échantillons 1, 4 e 5, ζ foi definido numericamente como a camada de tinta aplicada sobre o intonaco; para as amostras em madeira 1/2 e 3/2, pela fina camada que compunha o acabamento das peças. Na amostra representativa de ícone bizantino, ζ manteve um valor constante independente da área da peça analisada, ou seja, do material exposto diretamente ao impulso térmico.

Para a termografia modulada, uma vez que pulsos de calor são lançados continuamente sobre a amostra ao início de cada ciclo, as condições iniciais foram repetidas ao longo do tempo.

O isolamento lateral das amostras, mantido durante a execução dos ensaios, permitiu admitir fluxo de calor unidimensional na direção z , sendo adotadas condições de contorno adiabáticas em $x = 0$, $x = XL$, $y = 0$ e $y = YL$ e convectivas em $z = 0$ e $z = ZL$, ou seja:

$$k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (3.4a)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=XL} = 0 \quad (3.4b)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad (3.4c)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=YL} = 0 \quad (3.4d)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = h_c (T - T_\infty) \quad (3.5a)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=ZL} = h_c (T - T_\infty) \quad (3.5b)$$

Para o coeficiente convectivo, h_c , considerou-se o valor de $12 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, que é, aproximadamente, a média de valores admitidos para convecção livre de gases em Incropera e DeWitt (2003). A temperatura ambiente, T_∞ , empregada foi a média das temperaturas do meio

obtidas durante os procedimentos experimentais. As dimensões XL, YL e ZL referem-se às dimensões das amostras.

A solução da Equação (3.1) foi alcançada através da utilização da técnica numérica de volumes finitos, com formulação em volume de controles, o que permite um perfeito balanço de energia para todo o domínio de cálculo. Na solução, proposta por Patankar (1980), o domínio é discretizado em volumes de controle finitos. A Figura 3.17 descreve os volumes de controle da formulação tridimensional discretizados, onde Δx , Δy e Δz representam, respectivamente, as dimensões do volume de controle na direção x, y e z.

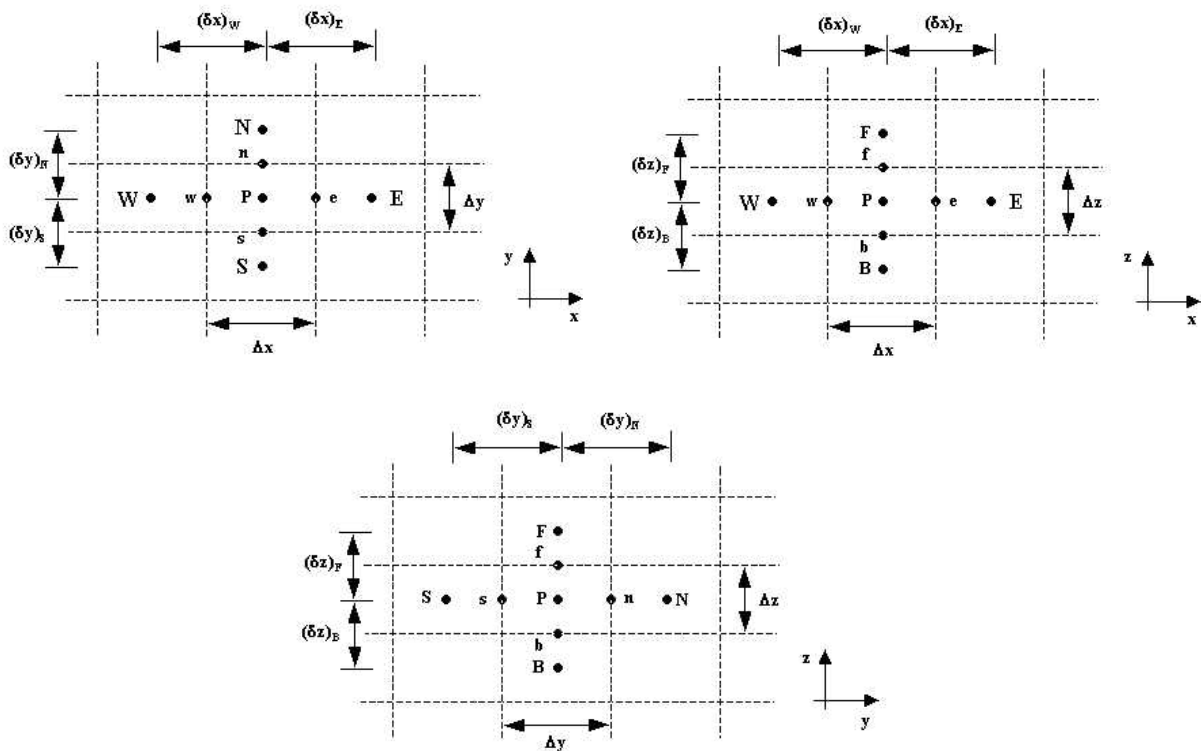


Figura 3.17 – Volume de Controle P nos planos xy, xz e yz

O volume de controle P é representado pela área tracejada nos planos xy, xz e yz. Os pontos nodais vizinhos são norte (N), sul (S), leste (E), oeste (W), frente (F) e atrás (B). As faces dos volumes de controle são representadas pelas linhas tracejadas e as letras minúsculas n, s, e, w, f, b, indicam a sua respectiva posição. Os valores da temperatura são estimados somente nos pontos nodais principais, no centro dos volumes de controle. Segundo Patankar (1980), a principal vantagem deste método é a conveniência do posicionamento das faces dos volumes de controle que coincidem com os pontos onde as propriedades são estimadas. As fronteiras geométricas do domínio físico foram tratadas como sendo os primeiros pontos da malha computacional que descreve o problema. A adoção deste procedimento facilita a

especificação das condições de contorno.

A discretização da Equação (3.1) foi obtida por meio da sua integração no volume de controle prescrito. Com isto, obteve-se a equação do balanço térmico para cada volume de controle na forma:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_f \int_s \int_w \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) dx dy dz dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_f \int_s \int_w \left(\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \right) dx dy dz dt \quad (3.6)$$

Assumindo uma variação linear da temperatura T no espaço entre dois pontos nodais, totalmente implícitas no intervalo temporal (T^0 no tempo presente e T no tempo futuro), obtêm-se o seguinte sistema de equações algébricas, a saber.

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + a_B T_B + a_F T_F + a_P^0 T_P^0 \quad (3.7)$$

onde:

$$a_E = k_e \frac{\Delta y \Delta z}{(\delta_x)_e} \quad (3.8a)$$

$$a_W = k_w \frac{\Delta y \Delta z}{(\delta_x)_w} \quad (3.8b)$$

$$a_N = k_n \frac{\Delta x \Delta z}{(\delta_y)_n} \quad (3.8c)$$

$$a_S = k_s \frac{\Delta x \Delta z}{(\delta_y)_s} \quad (3.8d)$$

$$a_B = k_b \frac{\Delta x \Delta y}{(\delta_z)_b} \quad (3.8e)$$

$$a_F = k_f \frac{\Delta x \Delta y}{(\delta_z)_f} \quad (3.8f)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho C_p \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \quad (3.9)$$

$$a_P = a_P^0 + a_E + a_W + a_N + a_S + a_B + a_F + a_P^0 \quad (3.10)$$

Ainda, baseando-se em metodologia sugerida por Patankar (1991), desenvolveu-se, neste estudo, um programa, em ambiente FORTRAN[®], para a solução do sistema de equações. No algoritmo, a Equação (3.7) foi aplicada a cada volume de controle levando-se em consideração as condições iniciais e de contorno definidas nas Equações (3.2) a (3.5), além das características das falhas e de cada uma das camadas que compunham as amostras estudadas. O número de volumes de controle foi definido a partir do teste de malha adotado no algoritmo e critério de convergência, baseado na comparação da temperatura obtida em cada ponto através da solução numérica com aquela obtida por solução analítica para um sólido semi-infinito; hipótese possível de ser adotada devido ao isolamento lateral das amostras durante os ensaios. Apenas diferenças menores que 10^{-5} °C, entre a solução numérica e analítica, foram aceitas.

O algoritmo desenvolvido é passível de receber adaptações e, guardadas as características de cada tipo de produção artística, reproduzir e prever resultados quando da aplicação da termografia em diversos tipos de obras de arte.

3.4.2 – Vibrometria laser Doppler

O *Dipartimento di Meccanica* da *Università Politecnica delle Marche* desenvolve, há mais de uma década, pesquisas onde a vibrometria laser Doppler é empregada como ferramenta de diagnóstico de bens culturais, como nos projetos LASERART e LASERACT.

Tal experiência justifica a adoção, neste trabalho, do procedimento padrão de medição através de sistemas SLDV ali utilizado e que foi sugerido por Espósito (2002). A metodologia de testes consiste em iniciar a aquisição de dados utilizando-se RMS, o que evidencia, através de picos no espectro de velocidade de vibração, áreas com presença de potenciais defeitos na estrutura. Em alguns casos, onde se deseja obter mapas de amplitude e fase do sinal vibrométrico, efetua-se análise em FFT nos pontos da malha posicionados sobre áreas supostamente defeituosas. Com isto, individualizam-se as ressonâncias de vibração dos defeitos. Aplica-se então o método *lock-in*, onde as frequências de excitação utilizadas assumem os valores fornecidos para as áreas defeituosas na análise em FFT. Este procedimento fornece respostas detalhadas, com baixo ruído, levando a uma melhor individualização da falha.

O vibrômetro utilizado neste trabalho, do fabricante OMETRON[®], apresenta configuração baseada no interferômetro de Michelson e, assim como todos os sistemas SLDV é monitorado

por *hardware* específico que apresenta como resultado mapas de velocidade para análise em RMS e de amplitude e fase da vibração para análise através do método *lock-in*. Pode-se dizer que é justamente a forma diferente de vibrar de uma área com presença de falhas que permite a individualização de tais defeitos pela SLDV, como mostrado nos mapas obtidos pela implementação da técnica apresentados no Capítulo IV deste trabalho.

De forma geral, pode-se dizer que os sistemas SLDV, como o vibrômetro OMETRON® VPI 4000 utilizado neste estudo, permitem a aquisição de dados a uma velocidade máxima de vibração de 10 m/s, com uma frequência também máxima de 100 kHz, resolução de deslocamento de, aproximadamente, 10 nm e velocidade de 1 µm/s. A incerteza de medição é de ± 1 a 2% da RMS. Na maior parte das vezes, o laser utilizado é de Hélio-Neon, com potência da ordem de mW. Apesar da baixa potência do laser, é possível realizar medições a distâncias maiores que 10 m, com resolução espacial da ordem de milímetros (Esposito, 2002; VPI 4000 Scanning Laser Vibrometer Operator's Manual, 1997).

Neste estudo, durante a execução dos ensaios utilizando-se SLDV, optou-se pela utilização do PZT e da caixa acústica como fonte de excitação, por constituírem, no momento, a melhor opção à excitação da estrutura quando do diagnóstico de obras de arte.

A aplicação da vibrometria laser Doppler sobre as amostras descritas, assim como a implementação da metodologia termográfica e modelo matemático sobre o mesmo conjunto de amostras, geraram uma série de resultados que são apresentados, discutidos e confrontados entre si no próximo capítulo deste trabalho.

3.5 – ENSAIOS *IN SITU*

Para a complementação do trabalho e compreensão das dificuldades e limitações da técnica em ambientes reais de diagnóstico efetuaram-se, durante o mês de Julho de 2006, medições termográficas e vibrométricas em três igrejas localizadas em mosteiros ortodoxos da Moldavia, região ao norte da Romênia.

A escolha dos locais para a realização dos testes partiu de um convite do Ministério da Cultura romeno, através do *National Institute of Research and Development for Optoelectronics – INOE*, que, com apoio financeiro da Comunidade Européia, e dentro do projeto CULTURA 2000, realizou o workshop *Saving Relics of European Medieval Cultural Heritage*. O evento contou com a participação de diversos membros ligados ao setor de restauração e diagnóstico de obras de arte e possibilitou uma apreciação bastante particular de

cada um dos monumentos devido à interdisciplinaridade dos especialistas envolvidos e diversidade de técnicas empregadas (web site do encontro, 2006).

Cabe, porém, uma breve descrição de cada um dos três locais onde foram realizados os testes assim como das condições de preservação encontradas, salientando que a localização dentro de cada uma das igrejas na qual cada técnica foi implementada e o objetivo final dos ensaios foi determinado pela equipe do INOE e pela Professora Tereza Sinigalia, PhD., historiadora local e dirigente geral do projeto, de acordo com as necessidades dos restauradores.

3.5.1 – Igreja de São Nicolau (Bălinești)

Embora existam indícios históricos na própria edificação que levam os historiadores a propor versões diferentes para a data inicial de construção da igreja de São Nicolau em Bălinești pode-se dizer que as hipóteses mais plausíveis apontam para um efetivo uso do local para celebrações religiosas a partir dos últimos anos do século XVI ou início do século XVII (Sinigalia e Vetros, 2006). Ao longo do tempo, a igreja não passou por modificações substanciais na sua estrutura, porém sofreu grave processo de degradação dos murais de afrescos: os externos, típicos na região, encontram-se quase totalmente perdidos e os internos fortemente danificados. Já em 1925, a igreja de São Nicolau passou por processo de restauração que, focado no restabelecimento das características arquitetônicas, forneceu uma clara idéia da estrutura de alvenaria que compõe o monumento (Sinigalia e Vetros, 2006). Em 2003, iniciou-se um grande projeto de restauro dos afrescos remanescentes internos e externos. A Figura 3.18 apresenta uma visão geral da igreja e sua planta construtiva.

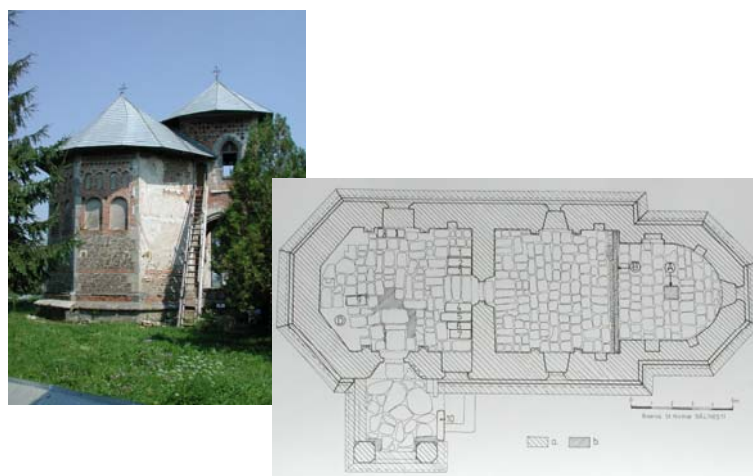


Figura 3.18 – Igreja de São Nicolau (Bălinești) – visão geral e planta construtiva

Como estilo arquitetônico, a igreja de Bălinești apresenta características bastante raras e

difíceis de serem encontradas na arquitetura eclesiástica típica da região da Moldávia: plano retangular com ábside poligonal e nartéx (entrada), também de aspecto poligonal, com três lados (Sinigalia e Vetros, 2006). O portal de entrada, sobre o qual se concentrou parte dos testes termográficos, apresenta estilo gótico, sendo que a abóbada, construída em tijolos, apóia-se em arcos sustentados por colunas de pedra. O interior do portal vem decorado com afrescos e a sua parte externa com pequenos discos de cerâmica com motivos heráldicos. A decoração com discos de cerâmica se repete por todo o perímetro superior externo da igreja, em alguns pontos entre os painéis que recebiam afrescos e ainda em outros locais específicos. O portal de entrada e tais detalhes da decoração podem ser vistos na Figura 3.19.



Figura 3.19 – Igreja de São Nicolau (Bălinești) – portal de entrada e detalhes da decoração externa

Além do portal de entrada, onde a termografia passiva foi utilizada no diagnóstico da alvenaria externa, visando à identificação de presença de umidade e prováveis destaques do acabamento utilizado no restauro, aplicou-se também a técnica, sob a forma passiva, em alguns painéis externos já restaurados. No setor sul da igreja, em área delineada na planta apresentada na Figura 3.20, os painéis de afresco, vistos em destaque na mesma figura, apresentavam-se, em comparação aos demais, bastante preservados. Por isto, maior atenção lhes foi destinada.

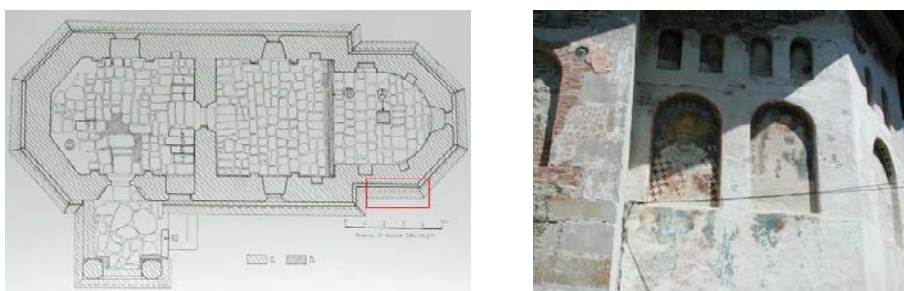


Figura 3.20 – Igreja de São Nicolau (Bălinești) – painéis externos avaliados utilizando-se termografia

Internamente, o setor da capela-mor foi já totalmente recuperado e, hoje, os trabalhos se concentram na nave principal, sendo que serão estendidos ao átrio de entrada. A fim de cooperar com este trabalho futuro, o diagnóstico dos afrescos interiores, utilizando-se a vibrometria laser Doppler, se concentrou justamente no setor do átrio de entrada. As áreas avaliadas vêm em destaque na Figura 3.21 que apresenta, paralelamente, detalhe do afresco estudado presente no setor delineado.

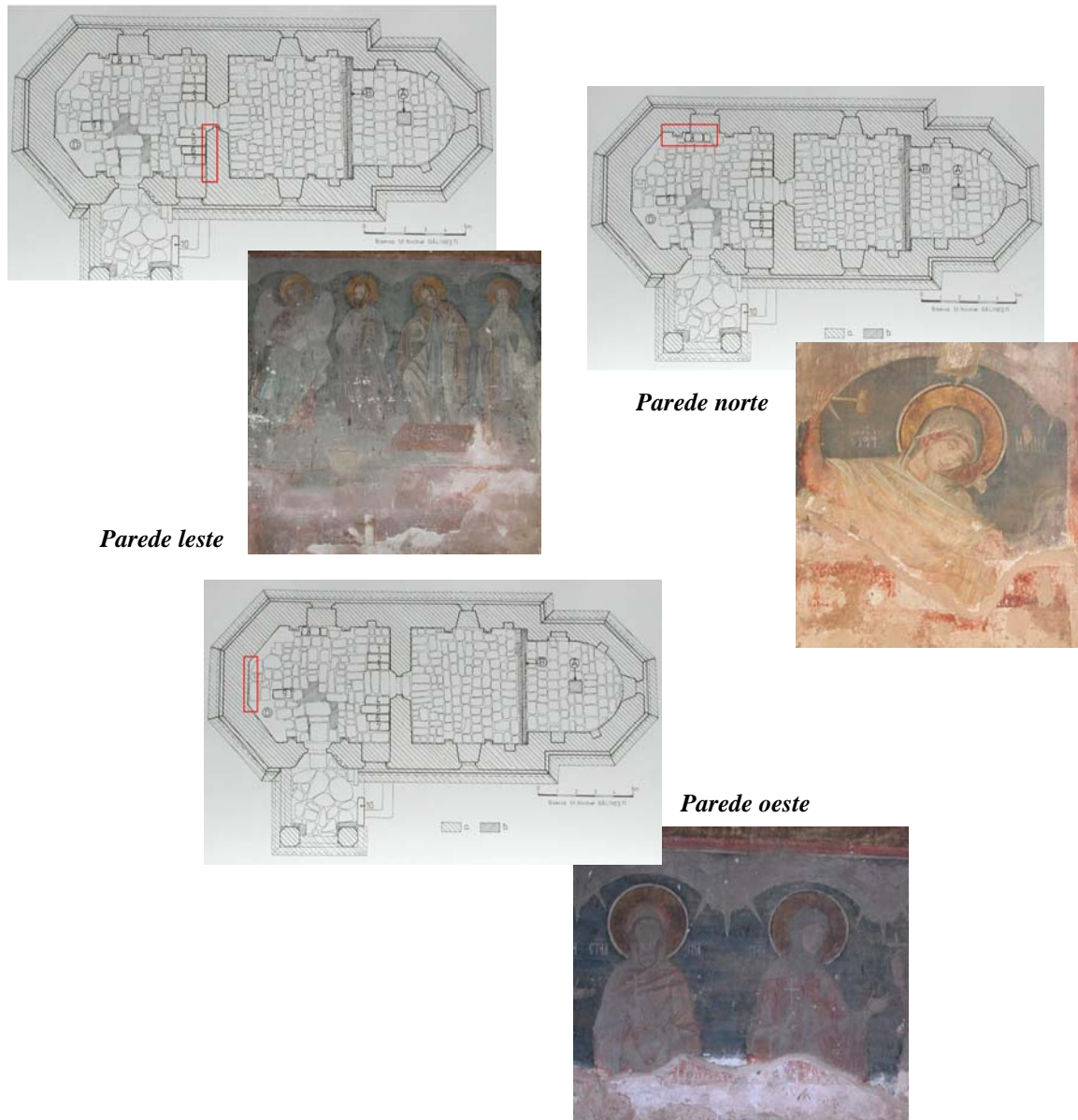


Figura 3.21 – Igreja de São Nicolau (Bălinești) – afrescos avaliados utilizando-se SLDV

3.5.2 – Igreja do Monastério Popăuți (Botoșani)

Fundada em 1496, com o objetivo de servir aos serviços religiosos da corte principesca local, somente em 1753 a Igreja de São Nicolau (nome original da igreja do Monastério de Popăuți)

transformou-se em igreja monástica, adotando o nome do próprio monastério. Em 1864 transformou-se em igreja paroquial para retomar a figura de igreja monástica somente em 1992, após a queda do regime comunista (Sinigalia e Vetros, 2006).

As pinturas internas, belíssimos afrescos retratando santos e fatos da vida de Jesus, datam de alguns anos após a fundação da igreja. Embora originalmente possuísse também afrescos na sua fachada externa, estes foram completamente removidos durante reforma sofrida entre os anos de 1906 e 1908, tendo sido as paredes recobertas por cerâmica (Sinigalia e Vetros, 2006). Por outro lado, manteve-se a as peças de cerâmica esmaltadas em forma de discos com motivos heráldicos que, como a exemplo de Bălinești, circundam todo o perímetro superior da igreja e a torre principal. A Figura 3.22 apresenta uma visão geral externa da igreja do Monastério de Popăuți, destacando detalhes da sua decoração.



Figura 3.22 – Igreja do Monastério de Popăuți (Botoșani) – visão geral e detalhe da decoração externa

Com arquitetura característica da época do principado de Stefano, o Grande, a igreja de Popăuți apresenta a estrutura típica das igrejas ortodoxas com altar, nave e nártex posicionados em seqüência. A torre principal localiza-se sobre a nave, sendo sustentada por elemento arquitetônico conhecido como arcos moldavos (Sinigalia e Vetros, 2006).

A grande presença de umidade danificou fortemente os murais de afrescos presentes no interior da igreja. Neste sentido, iniciou-se em 2002 um efetivo processo de restauração, tendo já sido recuperadas parte das pinturas localizadas no altar e na nave. A Figura 3.23 apresenta três momentos na evolução dos trabalhos e representa um exemplo do sucesso do projeto.

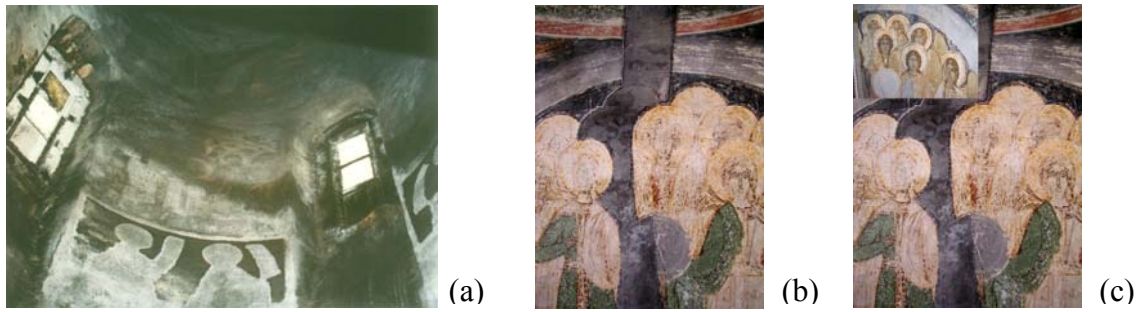


Figura 3.23 – Igreja do Monastério de Popăuți (Botoșani) – mural de afresco antes (a), durante (b) e após (c) processo de restauro

Os ensaios vibrométricos e termográficos concentraram-se na área interna do átrio de entrada, ainda não restaurado. Para a vibrometria coube a identificação de descolamentos dos afrescos (alguns já visualmente perceptíveis). A termografia foi utilizada para a avaliação qualitativa de estruturas e elementos estruturais não visíveis. A Figura 3.24 apresenta a bancada de teste vibrométrica, os dois dos murais avaliados pela SLDV e as estruturas investigadas através da implementação da termografia passiva.

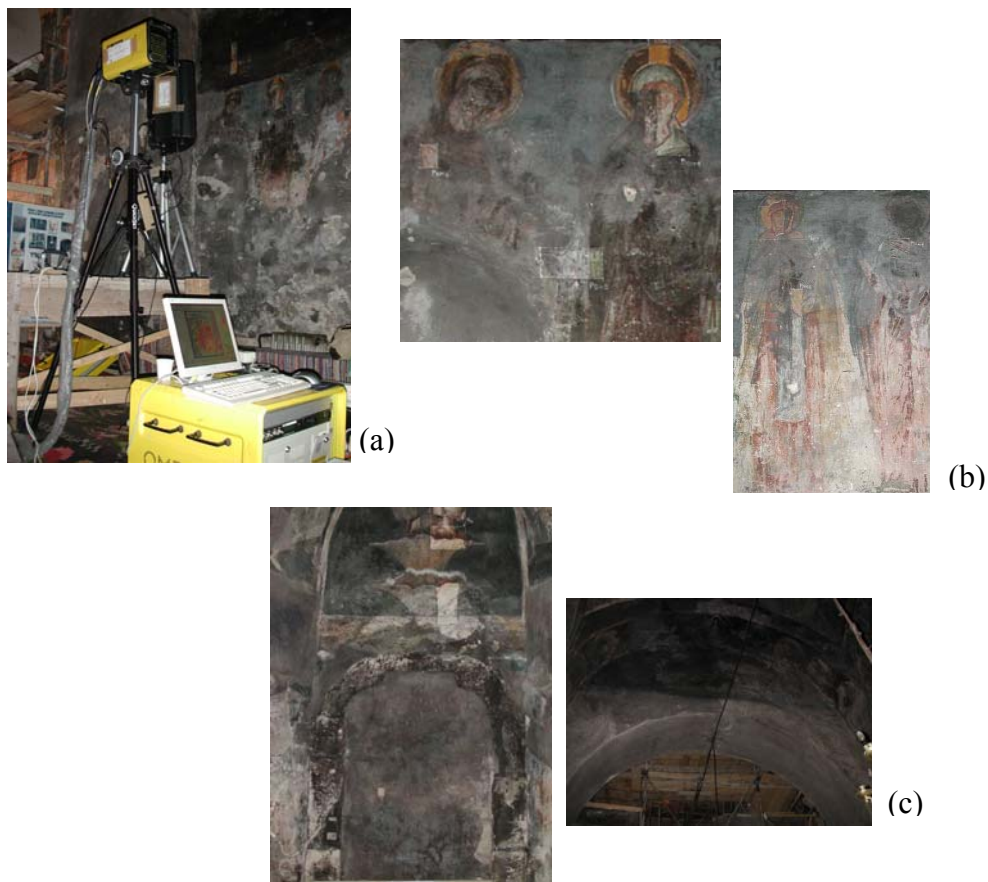


Figura 3.24 – Igreja do Monastério de Popăuți (Botoșani) – bancada de testes vibrométricos (a), afrescos avaliados pela SLDV (b) e estruturas investigadas através da termografia (c)

3.5.3 – Igreja da Ressurreição (Monastério de Sucevița)

Um dos mais belos e conhecidos monumentos da Romênia, a igreja da Ressurreição, localizada no interno dos muros do monastério de Sucevița, foi fundada em 1584 (terminada em 1586) por iniciativa de Gheorghe Movilă, então bispo da cidade de Rădăuți (Sinigalia e Vetros, 2006).

Com características arquitetônicas que mesclam o estilo bizantino e balcânico com elementos góticos ocidentais e outros típicos da região da Moldavia (Sinigalia e Vetros, 2006), a igreja da Ressurreição apresenta, além de altar, nave e nártex, câmara mortuária e um segundo nártex que dá acesso aos dois portais externos que coligam às entradas norte e sul ao templo. Os afrescos internos e externos, de cores muito vivas, conferem um aspecto bastante particular ao local e em comparação aos das outras igrejas da região, as pinturas externas encontram-se muito melhor preservadas.

Em 1983, a recuperação do telhado foi realizada tomando-se como referência ilustração contida em afresco presente na nave da igreja (Sinigalia e Vetros, 2006). Tal ilustração vem apresentada na Figura 3.25, juntamente com uma visão externa do local.



Figura 3.25 – Igreja da Ressurreição (Mosteiro de Sucevița) – afresco interno e visão externa

Em 1989, iniciou-se projeto que visava à recuperação dos afrescos externos, tendo este sido terminado em 1998. Em 1999, iniciou-se outro projeto para a recuperação dos afrescos internos do altar, nave e torre principal. A próxima etapa direciona-se ao restauro dos painéis contidos na câmara mortuária (Sinigalia e Vetros, 2006). Com objetivo de colaborar nos trabalhos, implementou-se, então, a vibrometria sobre os painéis instalados neste último setor.

Adicionalmente, e com a intenção de avaliar o estado atual dos painéis externos após os trabalhos de restauro, aplicou-se também a vibrometria em algumas pinturas localizadas na parede norte da igreja. Já a termografia, além de avaliar áreas de afrescos externos da parede norte, foi aplicada em toda a parede sul, obtendo sucesso na identificação de patologias não visíveis. A Figura 3.26 apresenta os murais internos e externos avaliados pela SLDV e uma visão geral das paredes norte e sul, vindo destacados os setores nos quais os resultados mais relevantes obtidos pela implementação da termografia passiva foram registrados.



Figura 3.26 – Igreja da Ressurreição (Mosteiro de Sucevița) – afrescos internos avaliados pela SLDV (a), afrescos externos avaliados pela SLDV (b), área da parede norte avaliada pela termografia (c), área da parede sul avaliada pela termografia (d)

Para os ensaios *in situ* utilizou-se sistema de aquisição de imagem diverso do empregado durante os testes laboratoriais. As características da termocâmara Nippon Neo Thermo TVS-600 Series estão descritas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Características da termocâmara Nippon Neo Thermo TVS-600 Series

ITEM	ESPECIFICAÇÃO
Frequência de operação	30 Hz
Distância focal	0,3 m até o infinito
Faixa de temperatura observável, padrão	- 20°C to 150°C 100°C to 300°C
Incerteza de medição (para 30°C no corpo negro)	± 2°C ou 2% do valor indicado
Campo de visão	25,8° (horizontal) x 19,5° (vertical)
Número de pixels da imagem térmica	320 x 240
Sistema de resfriamento do detector	Microbolômetro sem resfriamento
Resposta espectral	8 to 14 µm;
Sensibilidade térmica	< 0,1°C

Para o tratamento das imagens, utilizou-se o software PE Analyser 2.03, fornecido pelo fabricante da termocâmara. Já os instrumentos utilizados para a determinação da temperatura ambiente, umidade do ar e emissividade superficial das amostras foram os mesmos empregados quando dos ensaios laboratoriais.

3.6 – CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentadas as características e detalhes construtivos das amostras utilizadas nos ensaios laboratoriais, assim como dos instrumentos utilizados nas medições e da bancada de testes que se encontra instalada no *Laboratorio di Misure Meccaniche e Termiche* do *Dipartimento di Meccanica* da *Università Politecnica delle Marche*.

Uma metodologia para o diagnóstico da integridade de obras de arte através de NDTE foi proposta. Elaborada em forma de etapas, tal metodologia foi descrita, juntamente com os parâmetros operacionais empregados neste trabalho, tanto nos ensaios laboratoriais quanto nos ensaios *in situ* realizados. Algumas considerações teóricas que justificam a adoção dos

procedimentos foram discutidas.

Apresentou-se também o modelo matemático utilizado na validação dos resultados experimentais e a metodologia de teste empregada quando da implementação da vibrometria laser Doppler sobre o mesmo conjunto de amostras utilizadas nos ensaios laboratoriais e alguns painéis de afrescos avaliados *in situ*.

Por fim, procedeu-se uma breve descrição da Igreja de São Nicolau em Bălinești, da Igreja do Monastério Popăuți e da Igreja da Ressurreição em Sucevița, onde foram realizados testes *in situ*. Foram relatadas as condições de preservação encontradas e a localização, dentro de cada uma das igrejas, na qual a termografia e a vibrometria foram implementadas. O objetivo final dos ensaios foi determinado pela equipe do INOE e pela Professora Tereza Sinigalia, PhD.

Os resultados dos testes realizados em laboratório e da avaliação *in situ* vêm, então, descritos no próximo capítulo deste estudo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 – AFRESCOS

4.1.1 – Amostras P0, P1, P2 e P3

4.1.2 – Échantillons 1, 4 e 5

4.2 – OBRAS EM MADEIRA

4.2.1 – Amostras 1/2 e 3/2

4.2.2 – Ícone Bizantino

4.3 – ESTUDO *IN SITU*

4.3.1 – Igreja de São Nicolau (Bălinești)

4.3.2 – Igreja do Monastério Popăuți (Botoșani)

4.3.3 – Igreja da Ressurreição (Monastério de Sucevița)

4.4 – CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos, para cada uma das amostras utilizadas nos ensaios laboratoriais e para as estruturas analisadas no ensaio *in situ*, os resultados obtidos pela implementação dos ensaios térmicos não destrutivos, utilizando-se a metodologia de prova e de avaliação de incerteza sugerida neste trabalho. As respostas obtidas pela vibrometria laser Doppler e pelo modelo matemático são também apresentadas e comparadas com as do NDTE.

Optou-se pela apresentação dos resultados separados por estilo de criação artística e por conjunto de amostras. Desta forma, em um primeiro momento, serão discutidos os resultados obtidos para as amostras P0, P1, P2 e P3 e Échantillons 1, 4 e 5, preparadas de forma a reproduzir afrescos reais. Em seqüência, serão apresentados os resultados obtidos para as amostras que representam obras realizadas em madeira, ou seja, amostras 1/2 e 3/2, e para a amostra elaborada de forma a reproduzir a técnica de produção e camadas de um ícone Bizantino. Finalmente, serão apresentados os resultados operados nos ensaios *in situ*.

4.1 – AFRESCOS

4.1.1 – Amostras P0, P1, P2 e P3

Quando da implementação da metodologia experimental sugerida neste trabalho, foram controladas a intensidade e a homogeneidade da energia lançada sobre as peças na forma de excitação térmica, a fim de que temperaturas superficiais, consideradas nocivas à manutenção da integridade das amostras, não fossem alcançadas.

Para tanto, monitorou-se a temperatura em duas áreas distintas da superfície de P0 a fim de verificar se o posicionamento e o ângulo de inclinação das lâmpadas garantiam o aquecimento uniforme da amostra. A Figura 4.1 apresenta, respectivamente, as áreas de P0 analisadas quando acionadas todas as quatro lâmpadas que compunham o sistema de aquecimento (a), quando acionadas somente as lâmpadas horizontais, ou seja, aquelas localizadas na mesma direção das fronteiras norte-sul da amostra (b) e quando acionadas somente as lâmpadas verticais, ou localizadas na mesma direção das fronteiras leste-oeste (lateral) de P0 (c).

Ainda nesta direção, a Figura 4.2 apresenta, para duas distâncias entre a termocâmara e P0, o aumento e o decaimento da temperatura das áreas A1 e A2 quando todas as lâmpadas da bancada foram acionadas. A incerteza expandida de medição máxima do sinal de saída de temperatura foi igual a 1,3 °C para a distância de 0,50 m e 1,3 °C para a distância de 0,66 m. A Tabela A.II.1 e a Tabela A.II.2, encontradas no Anexo II deste trabalho, apresentam,

respectivamente, as planilhas que forneceram tais valores.

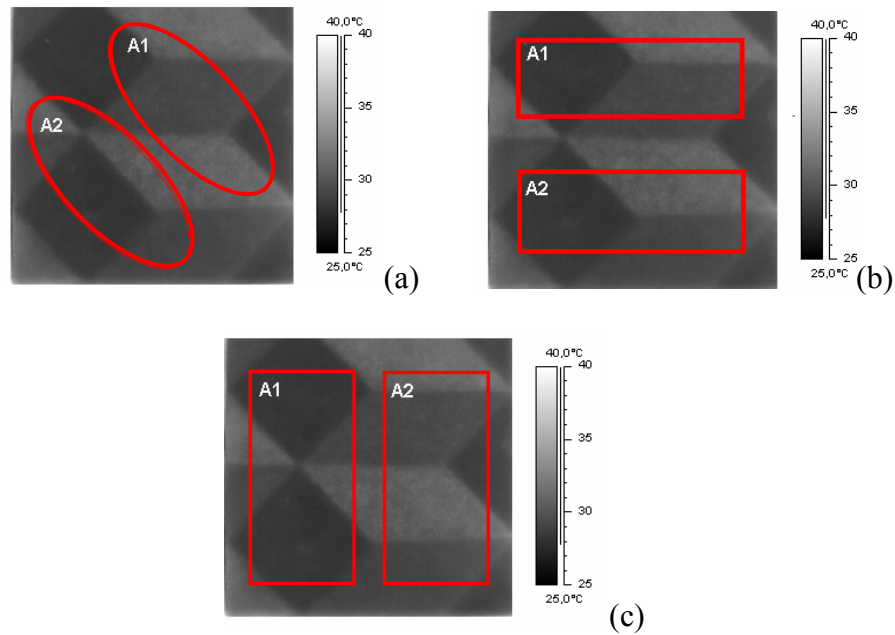


Figura 4.1 – Áreas A1 e A2 analisadas em P0

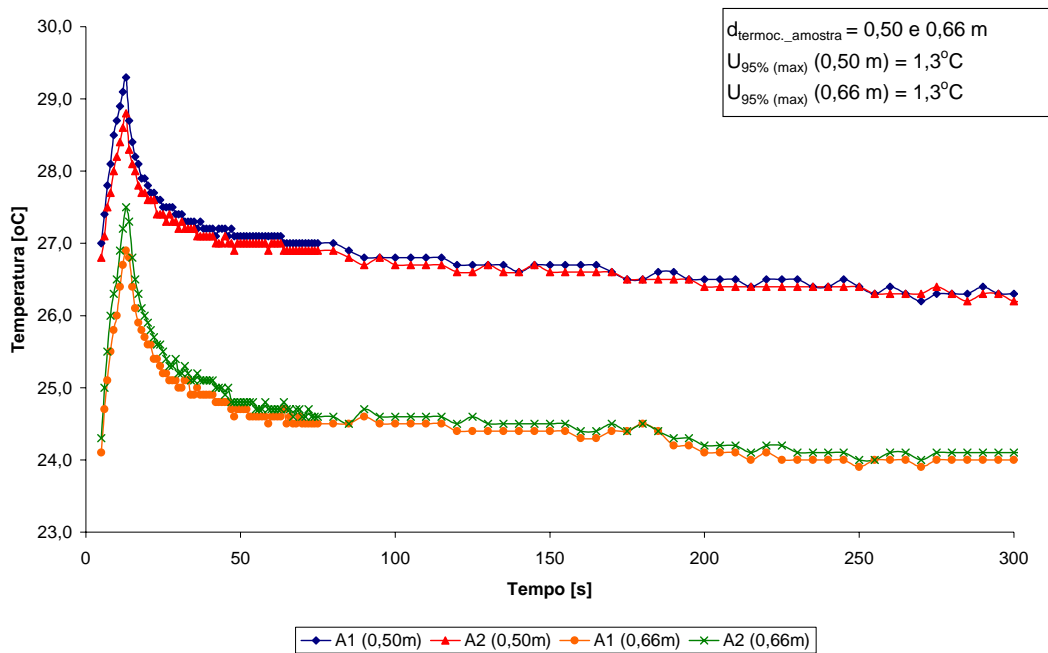


Figura 4.2 – Decaimento de temperatura das áreas A1 e A2 – 0,50 m e 0,66 m

Os resultados apresentados na Figura 4.2 demonstram que o posicionamento horizontal (eixo x e y) e vertical (eixo z) das lâmpadas e o ângulo de inclinação fixado possibilitaram o aquecimento uniforme da peça, uma vez que os diferenciais de temperatura existentes entre as áreas A1 e A2, tanto quando do posicionamento da amostra a 0,50 m da termocâmara quanto

a 0,66 m, foram desprezíveis. Interessante, ainda, notar a diminuição da energia captada pela termocâmara com o aumento da distância: temperaturas em média 2,2°C menores foram registradas quando do aumento de 0,16 m na distância entre a termocâmara e P0. A influência desta variável na identificação dos defeitos será comentada posteriormente.

Na Figura 4.3, a análise foi realizada para distância entre amostra e sistema de medição igual a 0,50 m e para acionamento individual de cada par de lâmpadas. A energia absorvida pela superfície da amostra foi igual a $1,4 \times 10^4$ J e a incerteza expandida máxima de medição registrada foi igual a 1,3°C. A Tabela A.II.3 apresenta a planilha utilizada no cálculo da incerteza de medição.

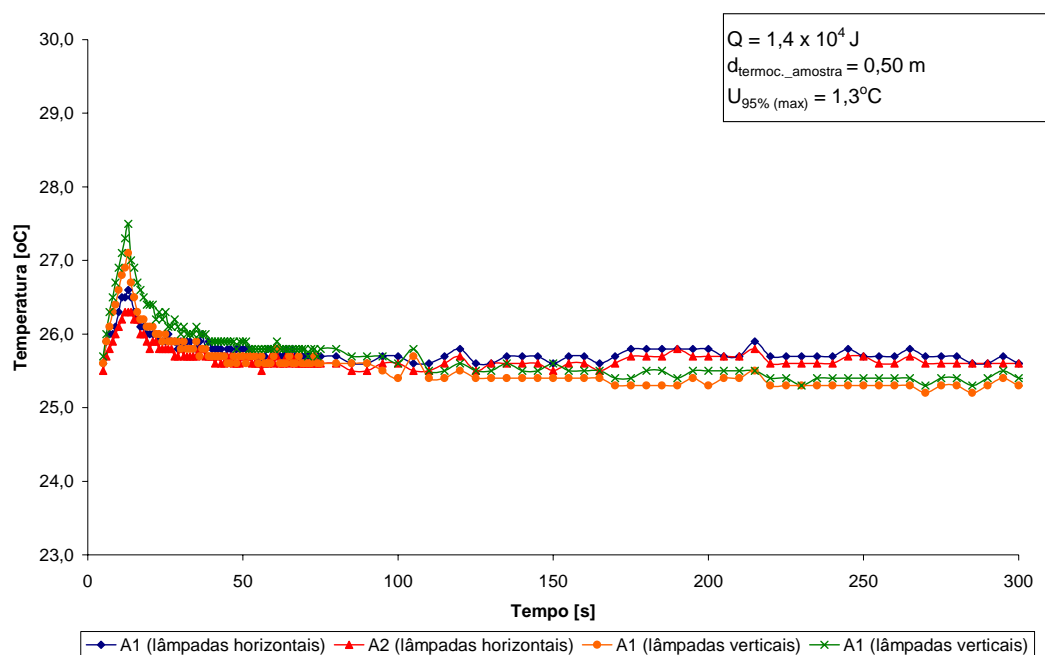


Figura 4.3 – Decaimento de temperatura das áreas A1 e A2 – aquecimento horizontal e vertical

Embora temperaturas ligeiramente mais altas tenham sido registradas quando da excitação utilizando as lâmpadas horizontais, a diferença em relação aos valores obtidos quando a solicitação foi efetuada apenas pelas lâmpadas verticais encontra-se bem abaixo da incerteza de medição máxima para a série de imagens termográficas analisada. Desta forma, pode-se afirmar que o aquecimento uniforme da amostra foi mantido mesmo para acendimento de apenas um par de lâmpadas. Este primeiro conjunto de dados definiu como eficiente o posicionamento e o ângulo de inclinação adotado para o sistema de excitação térmica, o que os levaram a serem mantidos durante os demais ensaios.

Uma segunda análise foi realizada a fim de se avaliar a influência, sobre as medições efetuadas, da escolha incorreta da emissividade da superfície quando do ajuste da termocâmara. A Figura 4.4 apresenta o resultado dos ensaios realizados (decaimento da temperatura superficial) na amostra P0 quando valores diversos para a emissividade foram empregados, sendo que $0,78 \pm 0,01$ é o valor obtido experimentalmente para a variável em toda a superfície da amostra. A incerteza de medição máxima da temperatura registrada durante estes ensaios, cujos cálculos são apresentados na Tabela A.II.4, foi igual a $1,3^{\circ}\text{C}$.

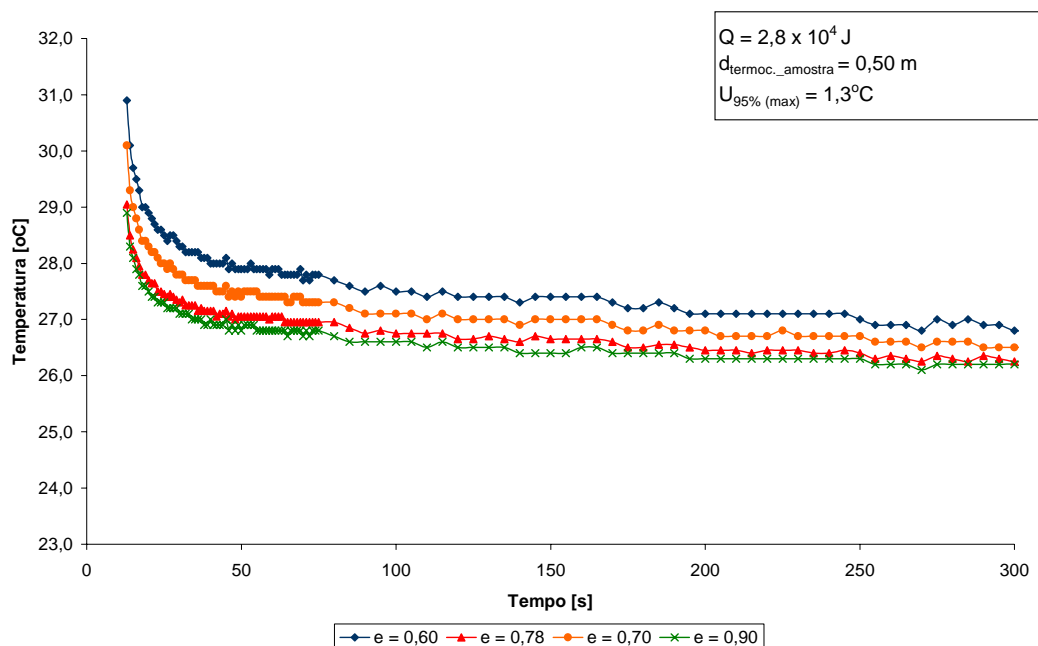


Figura 4.4 - Decaimento de temperatura de P0 – variação da emissividade

Os resultados demonstram que a adoção de valores incorretos para a emissividade superficial durante ensaios termográficos, e mesmo pequenas variações na especificação da variável, pode acarretar em erros no registro da temperatura, em alguns casos, superiores à incerteza. Isto justifica a maior atenção destinada a este fator quando do ajuste da termocâmara, já que diferenças nos valores de temperatura decodificados pelo sistema de medição, mesmo que pequenas, podem levar aos falsos alarmes de irregularidades.

A este ponto é interessante avaliar os efeitos da adoção da emissividade média da superfície quando do ajuste da termocâmara. Na Figura 4.5 são reportados os valores da temperatura no tempo quando analisadas, separadamente, cada uma das cores que compõem a peça. Neste caso, adotou-se, para cada uma das cores presentes na superfície afrescada de P0, a emissividade efetivamente presente na seção. A incerteza em todos os valores de emissividade foi igual a $\pm 0,01$. A fim de promover a comparação de dados, incluiu-se, no mesmo gráfico, o

decaimento de temperatura obtido quando a peça foi tratada como um todo, ou seja, quando se adotou, para toda a superfície da amostra, o valor da emissividade média. O valor atribuído à máxima incerteza de medição da temperatura, descrita na Tabela A.II.5, foi de 1,3 °C.

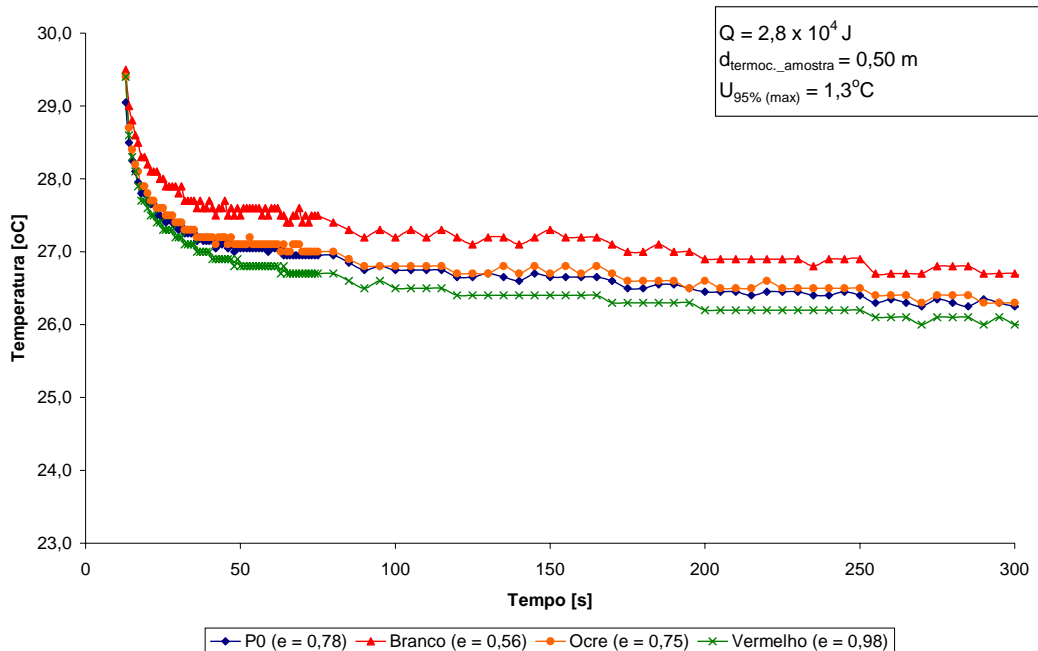


Figura 4.5 – Decaimento de temperatura de P0 – efeito das cores

A concentração de cores mais fortes na superfície de P0 elevou o valor da emissividade média e fez com que, quando analisada a seção pintada em branco, fossem notadas maiores diferenças entre a temperatura registrada quando a emissividade efetiva da área foi utilizada e a temperatura obtida quando se empregou a emissividade média para toda a superfície da peça. Porém, a necessidade do controle da excitação térmica, utilizado a fim de que grandes gradientes de temperatura não fossem impostos às obras, fez com que o efeito das cores fosse minimizado, já que sua relevância é proporcional, justamente, ao aumento da temperatura superficial. De fato, no caso de P0, os diferenciais apresentados, mesmo para a seção coberta com tinta branca, apresentam valores próximos, senão menores, que incerteza de medição calculada. Por outro lado, tais variações no valor da emissividade são levadas em conta quando da própria avaliação da incerteza.

O objetivo da aplicação da vibrometria sobre P0 foi identificar o modo e a frequência natural de vibração da amostra, estabelecendo um referencial para a posterior análise das peças com presença de falhas. O campo de velocidade de vibração, como esperado, apresentou-se estável, conforme pode ser visto na Figura 4.6 que apresenta o mapa RMS obtido utilizando-se como fonte de excitação o PZT (a) e a caixa acústica (b).

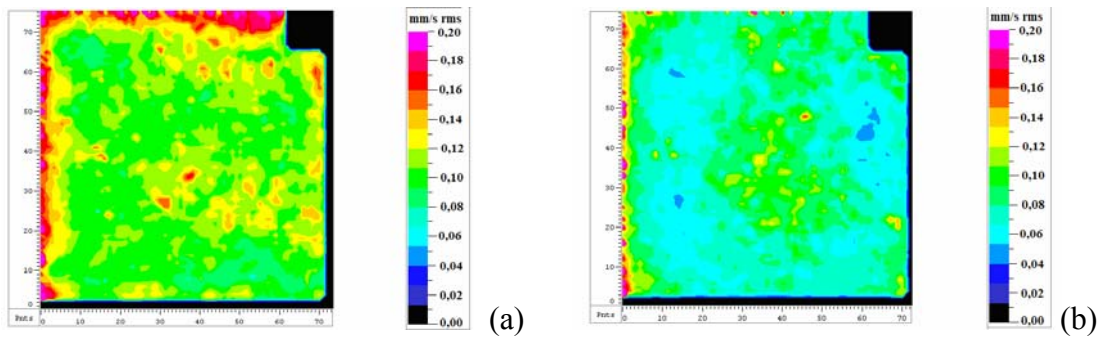
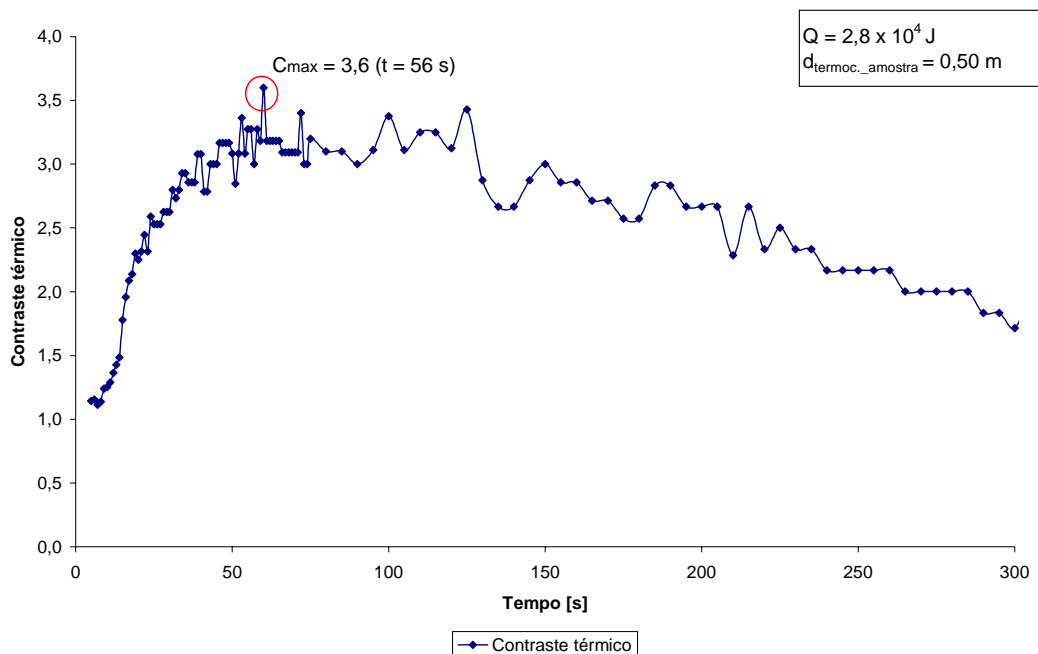


Figura 4.6 – Análise em RMS de P0

Para o correto diagnóstico de defeitos em afrescos, o importante é que, mesmo com a presença do efeito das cores e com a influência da distância entre superfície sob análise e sistema de medição, o diferencial de temperatura entre a área com e sem defeito esteja situado acima dos limites máximos de incerteza. A difusão térmica e a troca de calor por convecção com o ambiente fazem com que o melhor momento para a observação da presença ou não de uma anomalia seja quando a temperatura registrada pela termocâmera venha influenciada, mais fortemente, por estes fenômenos. Esta situação é representada na imagem pelo contraste térmico, que varia com o tempo e pode ser calculado a partir da Equação (2.5). Os valores obtidos para o contraste térmico durante os ensaios realizados em P2, com energia de excitação igual a $2,8 \times 10^4$ J e distância entre termocâmera e amostra igual a 0,50 m, podem ser vistos na Figura 4.7, onde o momento e o valor máximo registrado, C_{\max} , estão assinalados.



Figuras 4.7 – Contraste térmico de P2

Para a termografia pulsada, a análise da imagem foi realizada justamente no momento do máximo contraste térmico. A imagem referente a este instante, tratada a partir do programa ThermaCAM Researcher 2002 (a) e a partir do IR View v1.2 (b), pode ser vista na Figura 4.8. As temperaturas expressas pelo IR View v1.2 vêm apresentadas em Kelvin, ao contrário do ThermaCAM Researcher 2002 que apresenta escala de temperatura em graus Celsius.

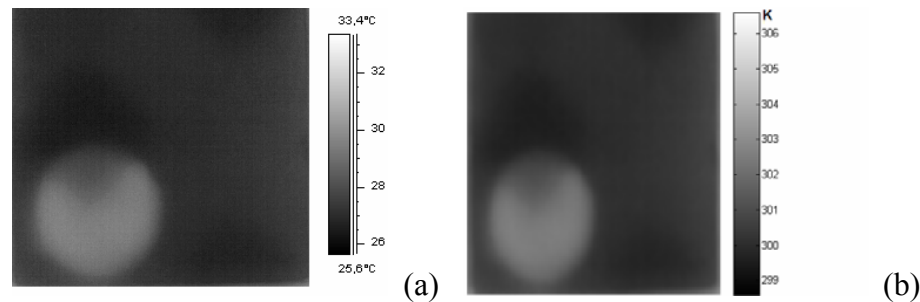


Figura 4.8 – Imagem térmica de P2 – $C(t)_{\max}$

A simples apreciação da imagem térmica de P2 no momento do máximo contraste permite já a identificação do defeito, mesmo levando-se em consideração o baixo gradiente de temperatura imposto à amostra pelo sistema de excitação que, neste caso, não superou 5°C . Por outro lado, a aplicação dos filtros disponíveis no IR View v1.2 minimizaram os ruídos de medição sobre cada pixel da imagem, diminuindo a influência das cores afrescadas da amostra e resultando em contornos da falha mais estáveis.

Certamente a superficialidade da falha facilitou sua identificação visual, porém a caracterização do defeito, do ponto de vista metrológico, somente é possível ao se comparar os valores obtidos para a temperatura na região íntegra com aqueles registrados na área com a presença do defeito potencial. Esta análise é realizada na Figura 4.9 que contém o decaimento superficial da temperatura para as duas áreas. A máxima incerteza de medição do sinal de temperatura de saída durante o ensaio foi igual a $1,3^{\circ}\text{C}$, conforme discriminado na Tabela A.II.6 presente no Anexo II deste trabalho.

O diferencial de temperatura entre a área com e sem defeito apresentou-se, na maior parte do tempo em que se monitorou o comportamento da superfície da amostra, duas vezes acima da incerteza máxima de medição registrada durante o ensaio. Isto faz com que se possa caracterizar a falha de uma forma segura e, em se tratando obras reais, poder-se-ia fornecer um diagnóstico concreto sobre a qual basear um efetivo programa de restauração. Neste sentido, a validação dos resultados apresenta-se como uma ferramenta importante para que falsos alarmes sejam evitados.

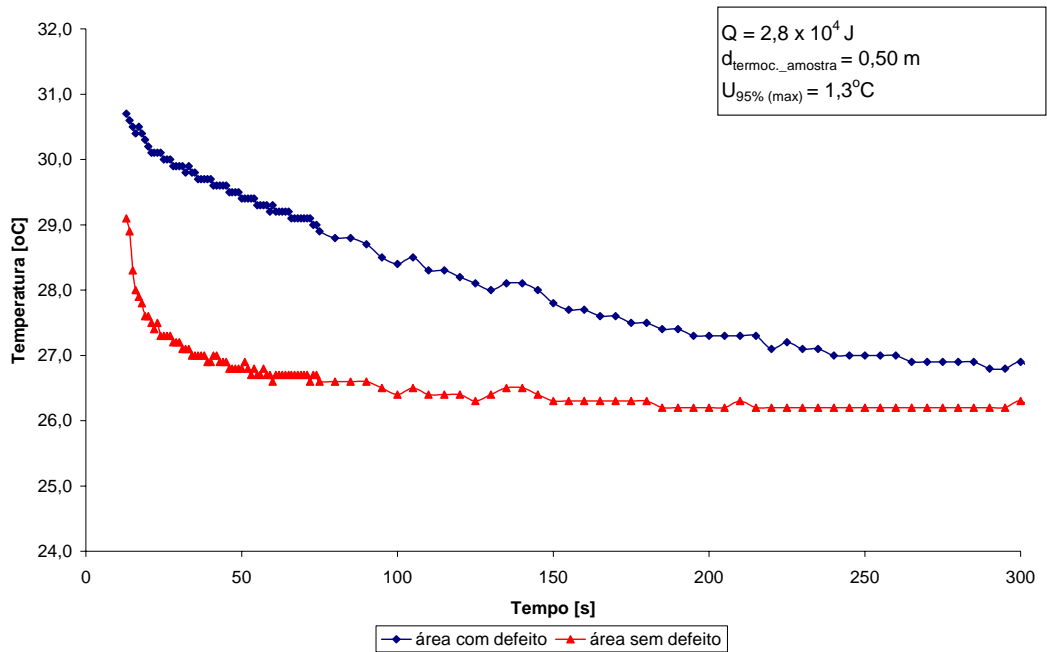


Figura 4.9 – Decaimento de temperatura de P2 – áreas com e sem defeito

Na Figura 4.10, o decaimento de temperatura experimental obtido para P2, tanto para a área defeituosa quanto para a área íntegra, são comparados com os resultados obtidos numericamente através da implementação do modelo matemático.

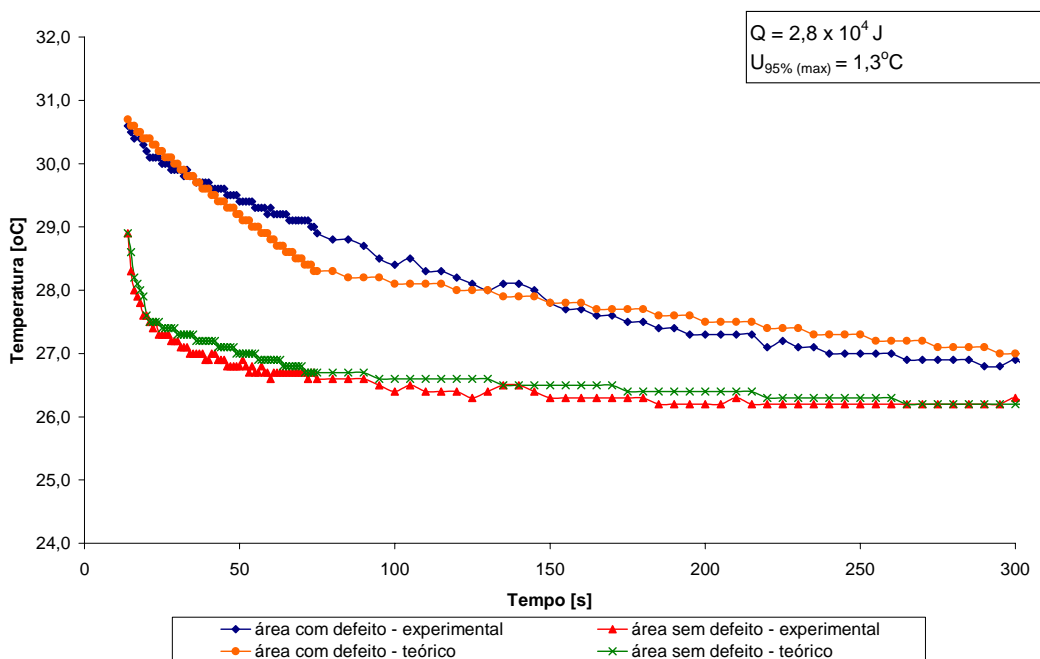


Figura 4.10 – Decaimento de temperatura de P2 – experimental x teórico ($2,8 \times 10^4$ J)

Pode-se dizer que o modelo matemático permitiu, a exemplo do procedimento experimental, a identificação da presença do defeito, já que temperaturas mais altas foram registradas naquela

região. Porém, mais importante aqui foi a validação dos resultados experimentais, uma vez que durante todo o decaimento superficial de temperatura a diferença entre os valores obtidos experimental e teoricamente apresentaram-se menores que a incerteza de medição.

Também através da vibrometria laser Doppler foi possível identificar a presença do defeito em P2, em posição compatível com a identificada pela termografia. A aquisição de dados iniciou-se em RMS onde a solicitação, e conseqüente vibração da estrutura, foi obtida utilizando-se a caixa acústica. O resultado, em forma de mapa de amplitude de vibração, pode ser visto na Figura 4.11.

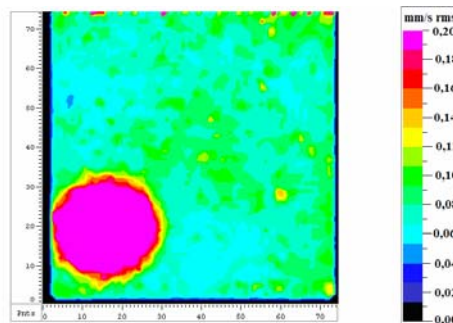


Figura 4.11 – Análise em RMS de P2

Embora a presença de velocidades de vibração mais altas permitisse a identificação preliminar do defeito já a partir da análise em RMS, para melhor caracterizá-lo, procedeu-se a análise em FFT, o que possibilitou a individualização da ressonância de vibração da falha, determinada como sendo igual a 925 Hz. Utilizou-se então esta frequência para excitar a amostra e realizar a análise em modo *lock-in*. Os mapas de amplitude (a) e fase (b) obtidos podem ser vistos na Figura 4.12.

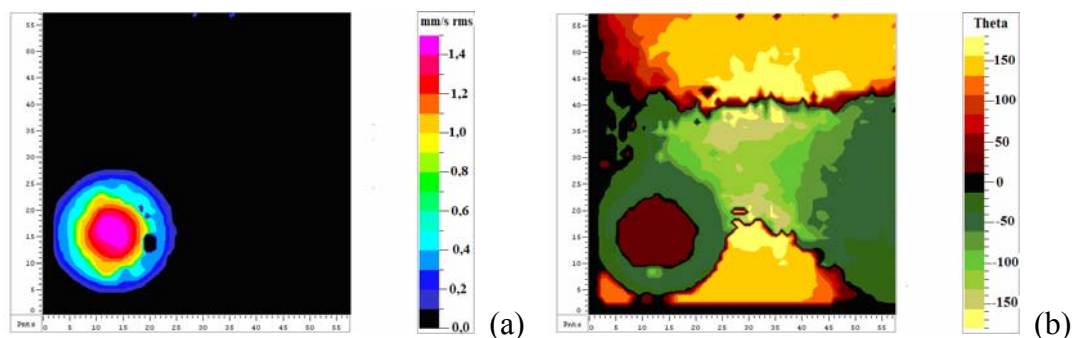


Figura 4.12 – Mapa de amplitude e fase de vibração de P2 (925 Hz)

Uma vez que em modo *lock-in* a amostra é excitada na própria frequência de ressonância do defeito, este vem mais bem individualizado. Já o mapa de fase, permite visualizar o modo de

vibração da peça, sendo que a falha é identificada justamente porque provoca distorções no modo natural de vibração do elemento. No caso deste trabalho, a análise restringiu-se ao primeiro modo de vibração das amostras.

Por fim, é interessante analisar a influência das cores sobre o sinal obtido pelo vibrômetro durante os ensaios. Para efetivamente operar como um instrumento de diagnóstico, o SLDV necessita que parte da luz emitida retorne ao sistema. Esta reflexão depende, sobretudo, das características da superfície analisada, como rugosidade, tipo de acabamento e, no caso de afrescos, dos pigmentos empregados na composição da pintura. Em situações industriais, o sinal Doppler pode ser maximizado através da utilização de tintas especiais, que aplicadas sobre a superfície, aumentam a relação sinal ruído. Por razões óbvias, a adoção deste procedimento não é possível no caso da análise de obras de arte. Procedeu-se então neste estudo a análise SNR (*signal-to-noise ratio*) do sinal captado pelo sistema de medição. A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos, para as áreas com e sem defeito.

Tabela 4.1 – Relação sinal-ruído para as diversas cores da amostra P2

Cor	SNR (dB)	SNR (dB)
	área sem defeito	área com defeito
Vermelho	- 9,73	28,23
Branco	- 1,34	25,82
Ocre	- 6,28	25,01

O melhor resultado foi obtido aqui para a área com defeito coberta pelo pigmento vermelho. Este referencial é muito importante nos processos de diagnóstico utilizando-se o SLDV, uma vez que define os limites inferiores do sinal necessário para que a medição produza resultados. Se o sinal registrado pelo vibrômetro atinge os valores mínimos, a medição pode ser caracterizada por alto índice de ruído e perde-se a eficiência do método.

Voltando à análise termográfica, o modelo matemático indicou que, mesmo submetendo a peça a uma menor quantidade energia, ainda assim a falha seria, pelo menos, visualmente perceptível. Desta forma, procedeu-se a diminuição, pela metade, do valor da excitação térmica nos ensaios experimentais. Os valores de temperatura registrados no tempo vêm apresentados na Figura 4.13 comparados com os resultados obtidos pela solução numérica do modelo matemático.

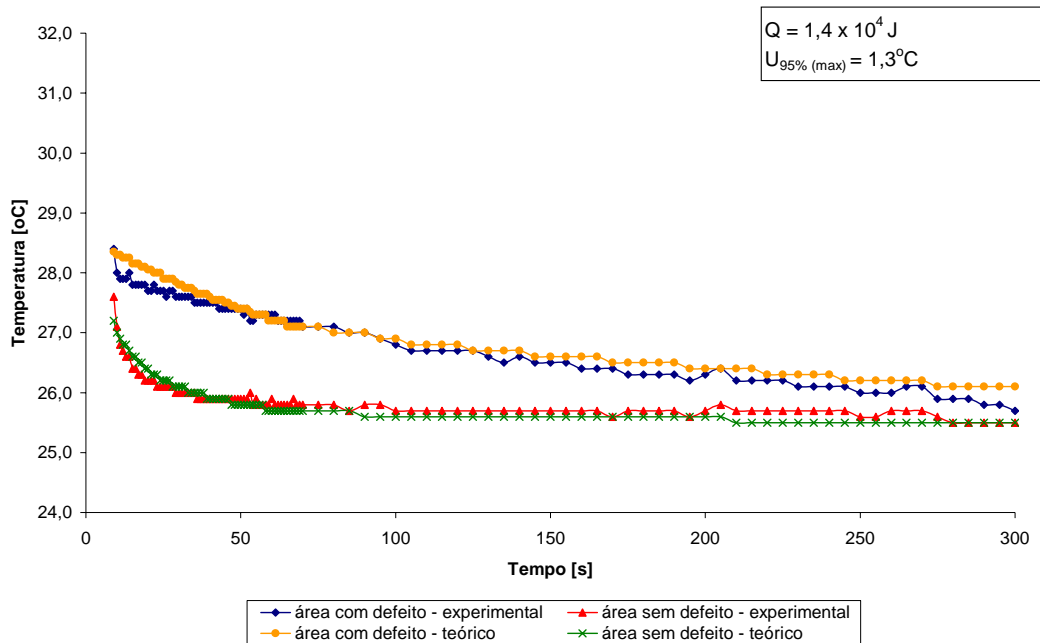


Figura 4.13 – Decaimento de temperatura de P2 – experimental x teórico ($1,4 \times 10^4$ J)

Para excitação térmica igual a $1,4 \times 10^4$ J, embora os dados numéricos convalidem os ensaios experimentais, baseando-se nas respostas obtidas, não se pode confirmar, com absoluta certeza, a presença da falha: enquanto a máxima incerteza computada na série de imagens termográficas, adquiridas durante esta prova e discriminadas na Tabela A.II.7, foi igual a $1,3^\circ\text{C}$, a diferença máxima de temperatura entre a área com e sem defeito foi da ordem de $1,6^\circ\text{C}$.

Se por um lado, conforme constatado nas Tabelas apresentadas no Anexo I deste estudo, a transmissividade é o fator externo com maior peso sobre a incerteza de medição, por outro lado, o efeito do aumento da distância entre amostra e termocâmara não foi tão comprometedor no sentido da identificação do defeito. Conforme nota-se na Figura 4.14, que apresenta uma série de termogramas obtidos para a superfície de P2, onde se fixou a distância entre a amostra e o sistema de medição em 0,66 m, um diferencial de temperatura entre a área com e sem defeito, duas vezes maior que a incerteza de medição, determinada em planilha apresentada na Tabela A.II.8 como sendo igual a $1,3^\circ\text{C}$, foi mantido durante boa parte do processo de resfriamento e, com maior intensidade, no momento do máximo contraste térmico ($t = 47$ s, $C(t)_{\text{max}} = 3,1$). Os tempos indicados na mesma figura referem-se ao período decorrido, após a retirada da fonte térmica, no qual as imagens foram tomadas e as temperaturas são as médias registradas para a região íntegra e com presença de falha. Para sua melhor identificação nos termogramas, tratados a partir do ThermaCAM Researcher 2002,

optou-se por circundar o defeito.

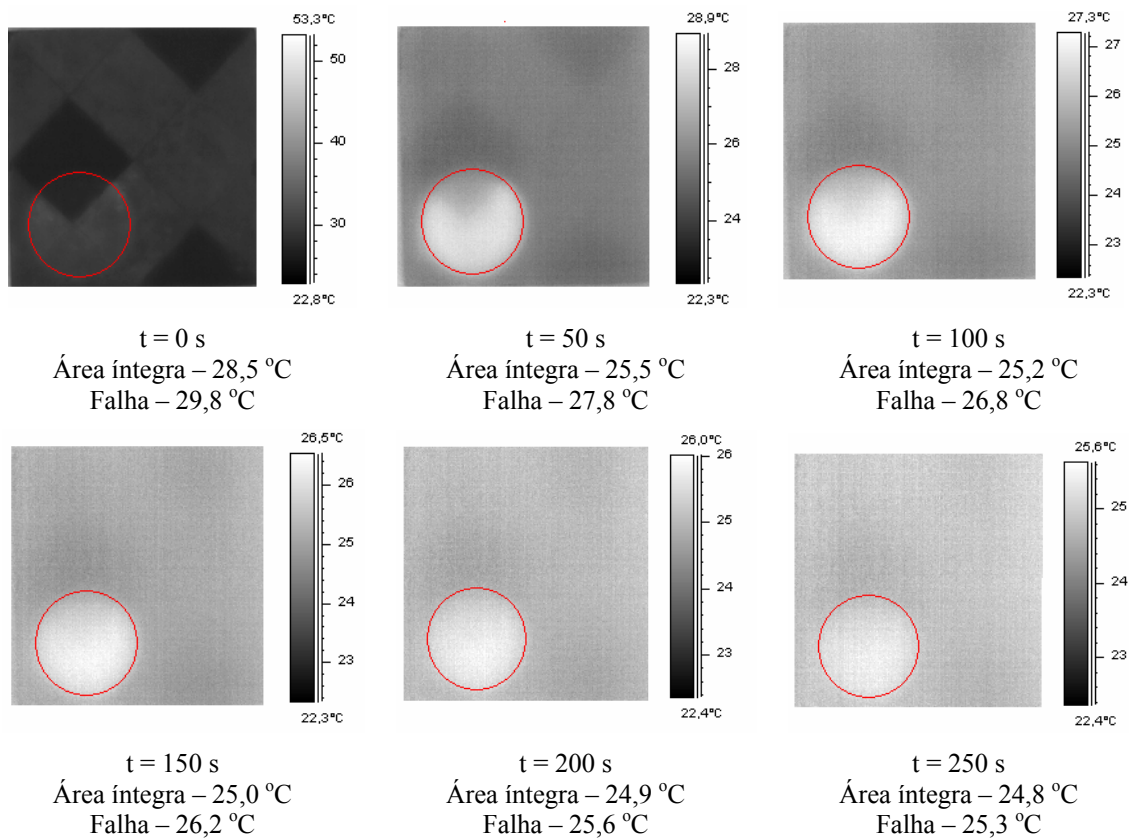


Figura 4.14 – Termografia pulsada – amostra P2 ($2,8 \times 10^4$ J e $d = 0,66$ m)

A aplicação da termografia modulada permitiu, além da identificação do defeito, estimar a sua profundidade correlacionando a frequência de excitação e a difusividade térmica do intonaco com o comprimento de difusão térmica, fornecido pela aplicação da Equação (2.7).

Conforme pode ser visto na Figura 4.15, que apresenta os resultados obtidos através da MT para algumas das frequências adotadas, na frequência de 0,037 Hz, o defeito começa a ficar perfeitamente reconhecível, já que a diferença de temperatura entre a área com e sem defeito vêm da ordem de $2,7^{\circ}\text{C}$, enquanto a incerteza de medição não ultrapassa $1,3^{\circ}\text{C}$ conforme visto na Tabela A.II.9. Uma maior queda no valor do contraste térmico, aqui calculado internamente pelo IR View v1.2, programa adotado no tratamento de imagens, segundo a Equação (2.12), começa a ocorrer quando da utilização de frequências próximas a 0,006 Hz. Isto significa dizer que o comprimento da difusão térmica começou a apresentar valores superiores à profundidade da falha. Este conjunto de dados permitiu estimar que a falha realmente encontrava-se entre a camada de intonaco e arriccio à, aproximadamente, 3,0 mm da superfície e com espessura de, aproximadamente, 2,4 mm.

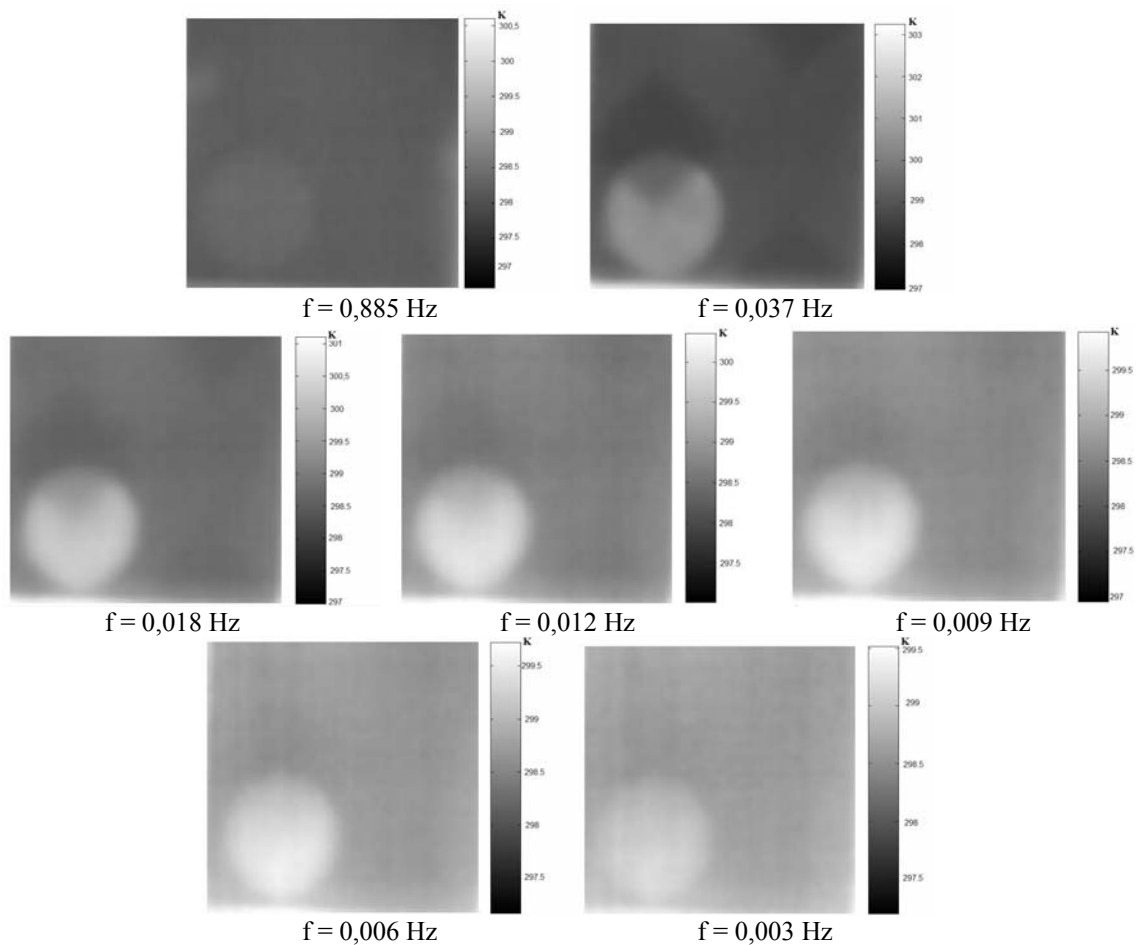


Figura 4.15 – Termografia modulada – amostra P2

No caso da amostra P3, além de identificar a presença de falhas internas, o objetivo em se implementar a investigação termográfica estava em verificar a capacidade da técnica em individualizar defeitos sobrepostos. Analisou-se, inicialmente, o decaimento da temperatura das regiões com e sem defeito. Os resultados vêm apresentados na Figura 4.16 que fornece também as respostas obtidas através da solução do modelo teórico. A incerteza de medição obtida durante os testes e explicitada na Tabela A.II.10 não superou $1,3^{\circ}\text{C}$.

Da análise destes resultados, pode-se afirmar que a existência de defeito foi percebida tanto nos ensaios experimentais quanto da solução do modelo matemático: diferenças de temperatura duas vezes maiores que a incerteza de medição foram mantidas entre a área com e sem presença de falha durante a maior parte do processo de resfriamento. Porém, a partir desta simples análise, não se pode confirmar a sobreposição. Com este objetivo, partiu-se para a análise comparativa dos resultados obtidos para região defeituosa de P3 com aqueles obtidos para a região com presença de falhas de P2. As respostas vêm apresentadas na Figura 4.17 para duas energias de excitação: $2,4 \times 10^4 \text{ J}$ e $1,4 \times 10^4 \text{ J}$.

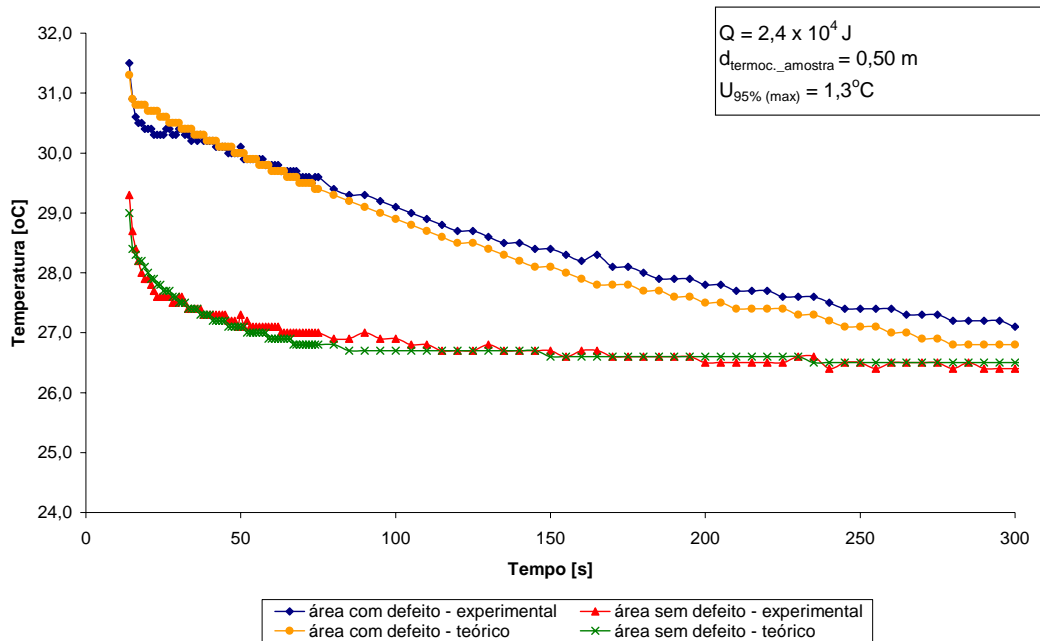


Figura 4.16 – Decaimento de temperatura de P3 – experimental x teórico ($2,4 \times 10^4$ J)

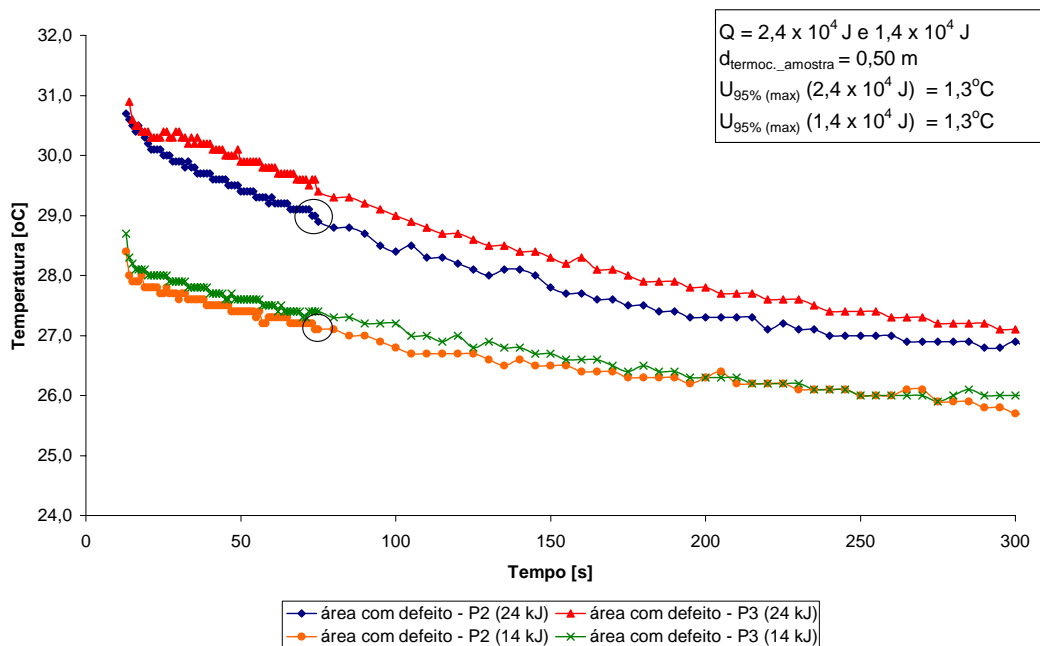


Figura 4.17 – Decaimento de temperatura – P2 x P3 ($2,4 \times 10^4$ J e $1,4 \times 10^4$ J)

Embora as temperaturas obtidas no ensaio de P3 sejam maiores que as registradas em P2 quando o impulso térmico impôs a amostra energia igual a $2,4 \times 10^4$ J, e, apenas ligeiramente superiores, quando o valor da excitação térmica cai a $1,4 \times 10^4$ J, não se pode caracterizar a presença de falhas sobrepostas baseando-se somente nesta observação.

Por outro lado, observando-se o mesmo gráfico, percebe-se que, na área circundada referente

à P2, existe um decaimento um pouco mais acentuado da temperatura, registrado quando a difusão térmica supera a região com defeito. Ao encontrar a região íntegra, de maior condutividade térmica, as ondas térmicas se dissipam com maior facilidade, o que determina a mudança da temperatura superficial da amostra registrada pela termocâmara. O mesmo não ocorre em P3, o que permite supor a presença de um defeito mais espesso ou de mais de uma falha na mesma posição logitudinal.

Esta informação é apoiada pela análise do contraste térmico, calculado pela Equação (2.5). Comparando-se os valores obtidos para P2 ao longo do resfriamento, com aqueles registrados durante o decaimento da temperatura de P3, nota-se que, para P3, níveis mais elevados do contraste térmico são mantidos por um tempo maior. Isto permite considerar a tal possibilidade de falhas sobrepostas ou de um defeito de maiores dimensões. A Figura 4.18 apresenta os termogramas registrados quando da implementação da PT e, novamente, os tempos indicados referem-se ao período decorrido, após a retirada da fonte térmica, no qual as imagens foram tomadas.

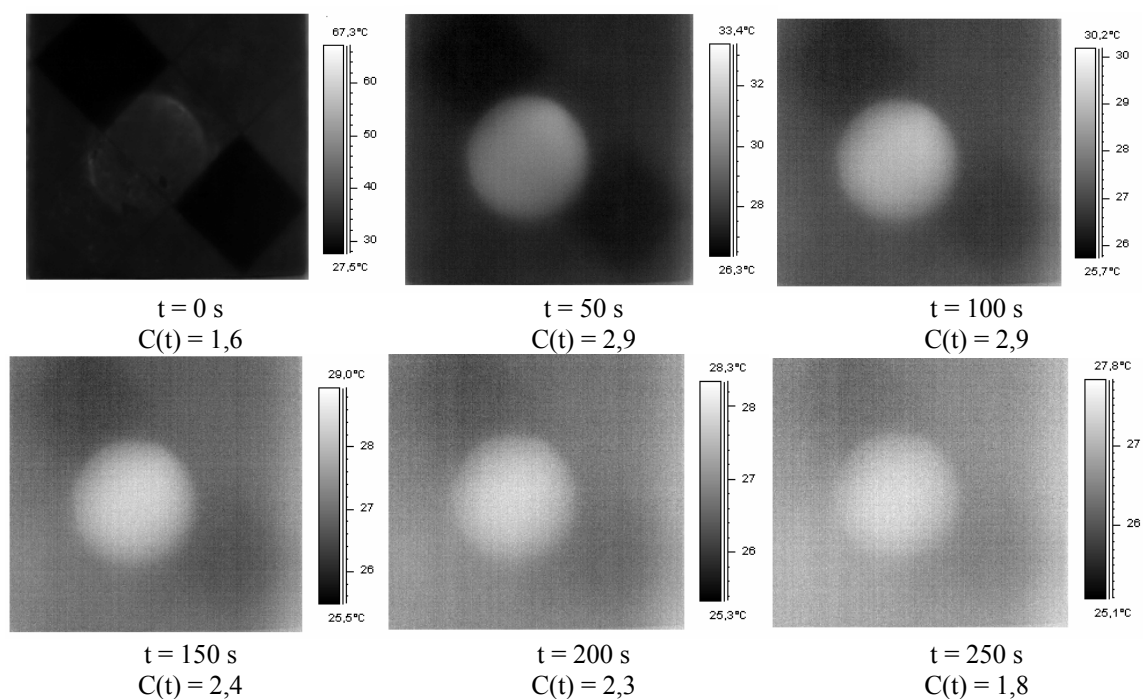


Figura 4.18 – Termografia pulsada – amostra P3 ($2,4 \times 10^4$ J e $d = 0,50$ m)

Pela própria característica da técnica, a presença de defeitos sobrepostos não é perceptível através da aplicação da vibrometria laser Doppler, o que foi também confirmado pelos resultados obtidos neste trabalho. A Figura 4.19 apresenta os resultados em RMS para a amostra P3, utilizando-se como método de excitação a caixa acústica (a) e o PZT (b).

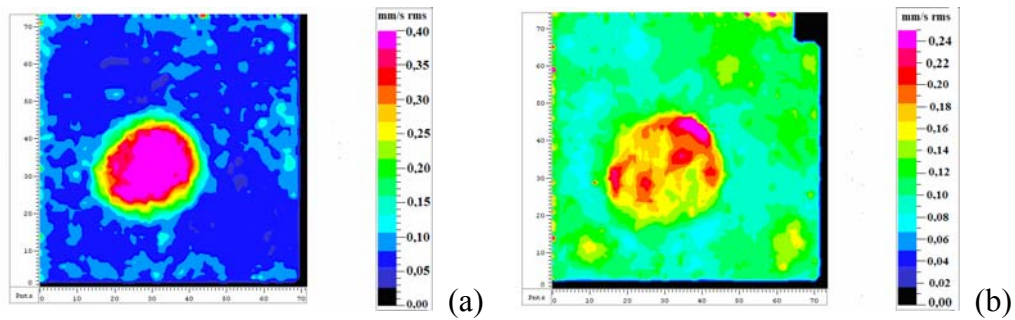


Figura 4.19 – Análise em RMS de P3 – excitação com caixa acústica (a) e PZT (b)

Comparando-se os resultados obtidos em RMS para a amostra P2, utilizando-se a caixa acústica como sistema de solitação, com àqueles apresentados em P3, nota-se que velocidades de vibração do defeito sempre maiores que 0,16 mm/s são registrados. Valores semelhantes são encontrados quando da utilização do PZT. Desta forma, pode-se dizer que a vibrometria tenha identificado o defeito superficial, mas os mapas em RMS foram incapazes de identificar a sobreposição ou a presença da segunda falha.

Quando efetuada a análise em FFT, a frequência de vibração da área defeituosa foi determinada e, daí, pode-se aplicar excitação em modo *lock-in* com o objetivo de melhor individualizar as seções. A Figura 4.20 apresenta os mapas de amplitude (a) e fase (b) obtidos.

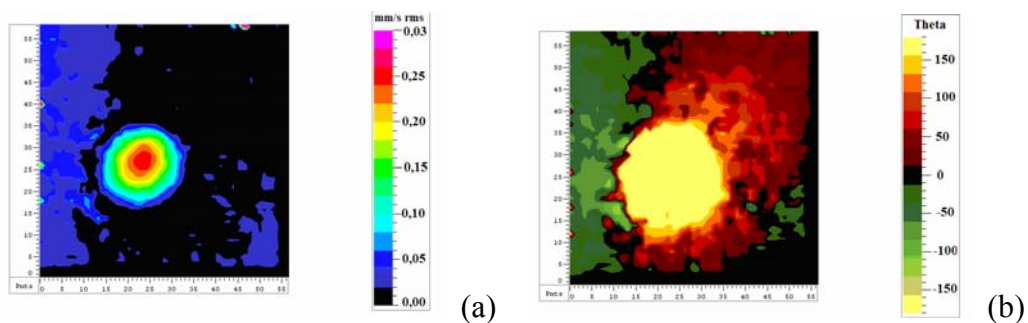


Figura 4.20 – Mapa de amplitude e fase de vibração de P3 (900 Hz)

Mais uma vez, o fato de que a frequência de vibração da área defeituosa apresenta valores muito próximos aos registrados para a seção com presença de falha da amostra P2 leva a crer que a influência da presença do defeito mais superficial sobre os resultados sobrepôs-se à do defeito mais profundo que, na verdade, não foi nem mesmo percebido. Diferenças no modo de vibração da amostra não acrescentam informações no sentido da identificação do segundo defeito. De fato, conforme já citado, a percepção de falhas sobrepostas é uma das limitações da vibrometria.

Já a implementação da termografia modulada sobre P3, além de confirmar a presença de

defeitos, sugeriu, fortemente, a sobreposição das falhas. A Figura 4.21 apresenta, para algumas das diversas frequências adotadas, os resultados obtidos através da MT. As imagens foram tratadas pelo programa IR View v1.2.

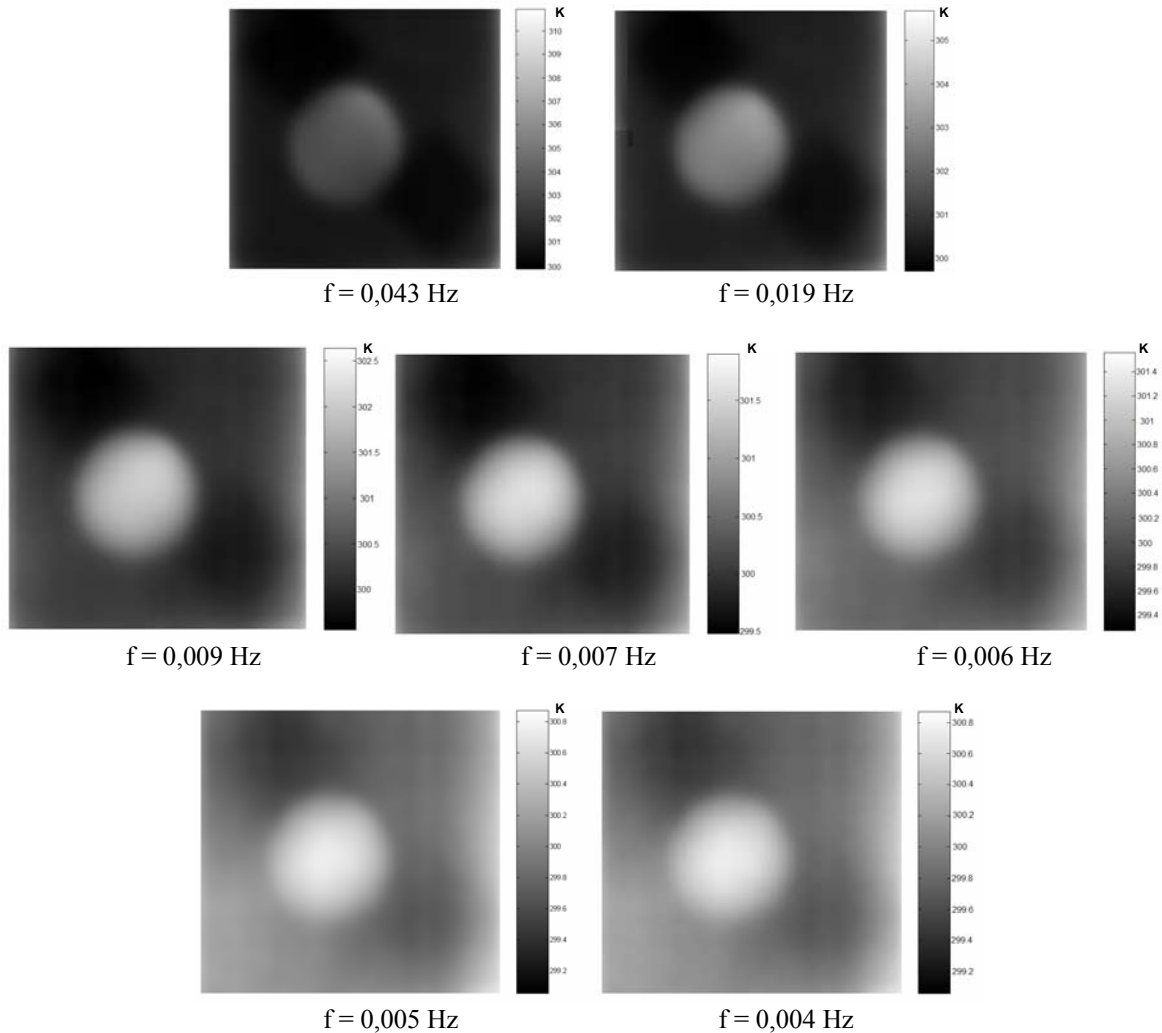


Figura 4.21 – Termografia modulada – amostra P3

No caso de P3, o defeito começa a ficar perfeitamente reconhecível em frequências superiores a 0,045 Hz e o contraste térmico se perde em frequências abaixo de 0,002 Hz. A análise destes dados permitiu estimar que o início do defeito, calculado com o auxílio da Equação (2.7), utilizando-se a difusividade térmica média do arriccio e intonaco, encontrava-se a, aproximadamente, 2,0 mm da superfície e se mantinha até quase 10,0 mm de profundidade. A questão é que falhas de espessura total igual a 8,0 mm gerariam diferenciais de temperatura mais altos daqueles registrados e apresentados na Figura 4.16, além de já serem suficientes para provocar o descolamento total das camadas. Isto faz com que se possa afirmar que existe realmente uma sobreposição de defeitos.

Em P1, a localização da falha em pontos mais profundos dificultou sua identificação através da PT. A Figura 4.22 apresenta os termogramas registrados em alguns momentos do resfriamento quando utilizado um impulso térmico de $5,6 \times 10^4$ J. A distância entre amostra e sistema de medição foi de 0,55 m e a incerteza máxima da temperatura, indicada na Tabela A.II.11, igual a $1,3^\circ\text{C}$. Os tempos indicados referem-se ao período decorrido, após a retirada da fonte térmica, no qual as imagens foram tomadas e as temperaturas são as médias registradas para a região íntegra e com a suposta presença de falha.

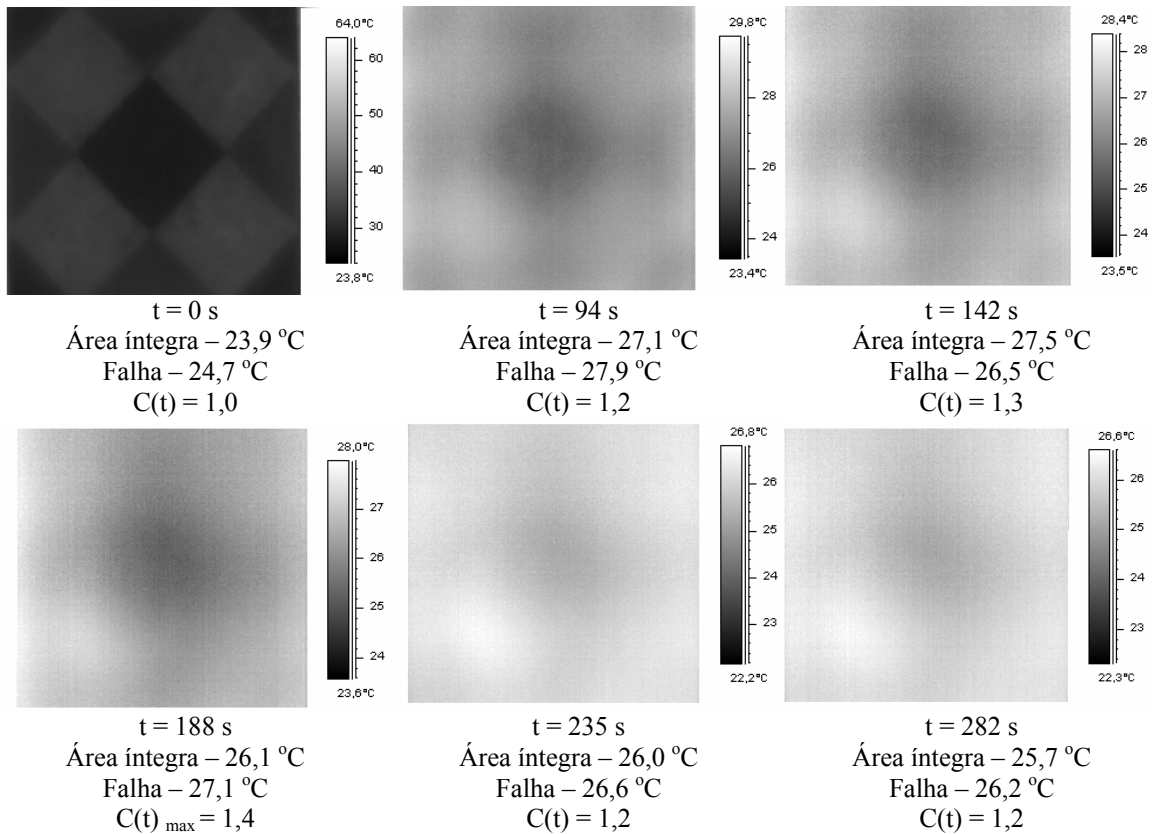


Figura 4.22 – Termografia pulsada – amostra P1 ($5,6 \times 10^4$ J e $d = 0,55$ m)

A escolha pela utilização de uma maior quantidade de energia quando da excitação térmica de P1, adveio da não percepção da falha quando imposta à amostra uma menor quantidade de calor. Porém, esta primeira tentativa ainda mostrou-se insuficiente para a identificação correta do defeito já que o diferencial de temperatura entre a área íntegra e a região onde se localizava a falha manteve-se em níveis inferiores que duas vezes a incerteza de medição, mesmo quando do registro do contraste térmico máximo (188 s). Submeteu-se, então, a peça a uma maior quantidade de calor. A Figura 4.23 apresenta as temperaturas superficiais obtidas no aquecimento e no resfriamento das áreas com e sem defeito de P1, quando se sujeitou a amostra a outros dois níveis de energia.

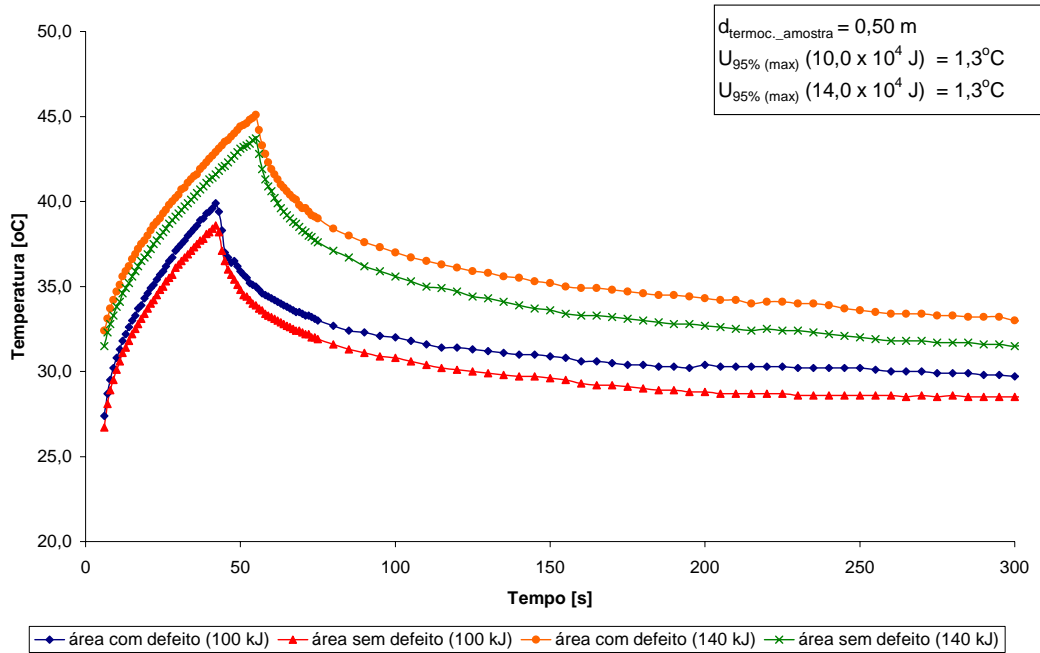


Figura 4.23 – Aquecimento e decaimento de temperatura – P1 ($10,0 \times 10^4$ J e $14,0 \times 10^4$ J)

Conforme visto na Figura 4.23, nem mesmo o aumento da excitação térmica foi capaz de proporcionar a correta identificação do defeito incluso em P1. Por outro lado, aumentar ainda mais os valores da temperatura superficial poderia acarretar em danos em afrescos reais, o que não justificou sua implementação. Assim, tentou-se utilizar a termografia modulada com um tempo mais longo de observação, o que implicou no uso de frequências mais baixas. Os termogramas obtidos e tratados pelo IR View v1.2, para as algumas frequências de referência utilizadas, são apresentados na Figura 4.24. A escala de temperatura vem em Kelvin.

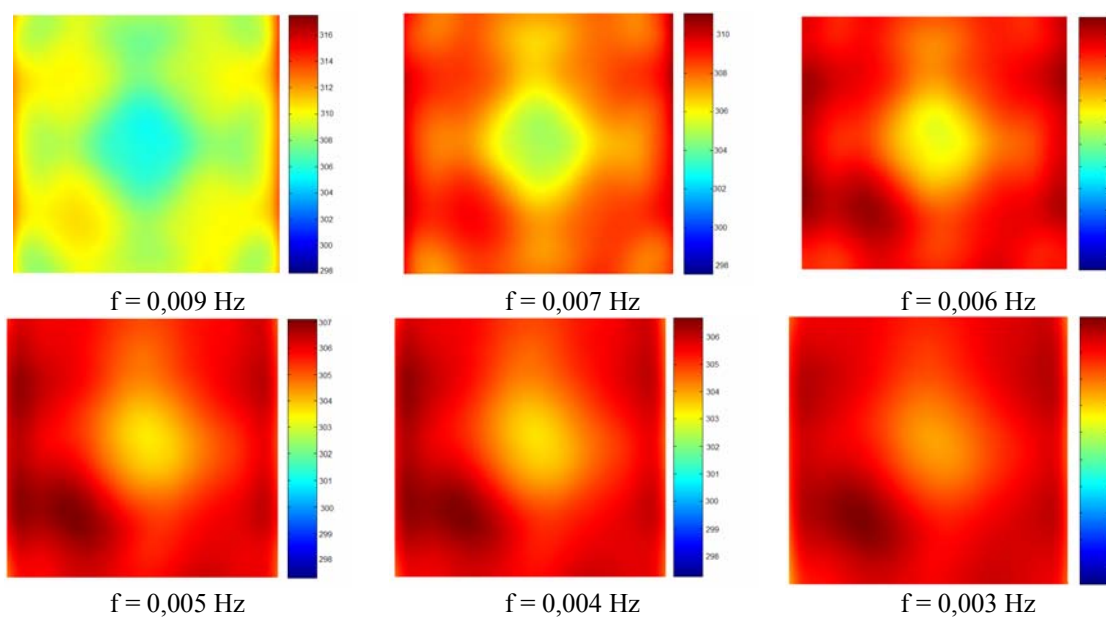


Figura 4.24 – Termografia modulada – amostra P1

Embora as diferenças de temperatura entre as áreas com e sem a presença do defeito ainda se situassem em níveis menores que a incerteza de medição, mantida, conforme apresentado na Tabela A.II.12, em $1,3^{\circ}\text{C}$, nota-se, no canto inferior esquerdo da amostra, justamente onde localizava-se a falha, um aumento dos valores da temperatura com a diminuição da frequência, o que, ao menos qualitativamente, indica uma anormalidade. Isto começa a ocorrer em frequências próximas a $0,007\text{ Hz}$ e permanece até frequências inferiores a $0,002\text{ Hz}$. Reportando os valores à Equação (2.7), utilizando-se a difusividade térmica média do arriccio e intonaco, confirma-se a localização do defeito inserido na camada de arriccio. No que concerne à escolha de nova escala de cores durante o tratamento das imagens, houve um favorecimento no sentido da identificação, ao menos que visual, da falha. Por outro lado, maximizou-se o efeito da emissividade das cores em decorrência do aumento da temperatura superficial.

Para a vibrometria laser Doppler, quando implementada a análise em RMS, onde se solicitou a amostra acusticamente através da utilização de caixa acústica, o defeito não foi claramente identificado. Isto ocorre devido à localização da falha em pontos mais profundos da amostra que faz com que este possua frequências de vibração mais altas, não alcançadas pela solicitação. Já quando empregado o PZT, que alcança valores de frequências superiores, o defeito começou a ser mais visível, conforme apresentado na Figura 4.25.

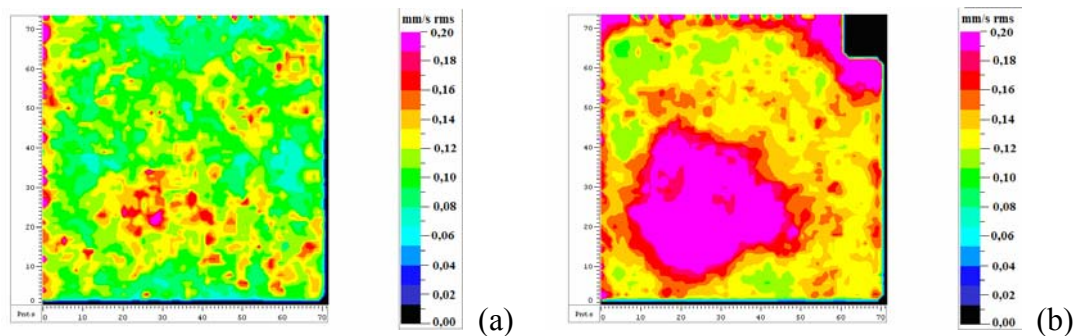


Figura 4.25 – Análise em RMS de P1 – excitação com caixa acústica (a) e PZT (b)

Realizando a análise em FFT, pôde-se identificar a frequência de vibração do defeito que, neste caso, foi de 2750 Hz . Os mapas de amplitude e fase de vibração explicitaram melhor a falha, indicando que a vantagem da implementação da vibrometria sobre este conjunto de amostras foi, justamente, a possibilidade da identificação do defeito mais profundo presente em P1. Os resultados da implementação da análise em modo *lock-in*, podem ser vistos, para solicitação através de caixa acústica, na Figura 4.26 e, para solicitação através de PZT, na Figura 4.27.

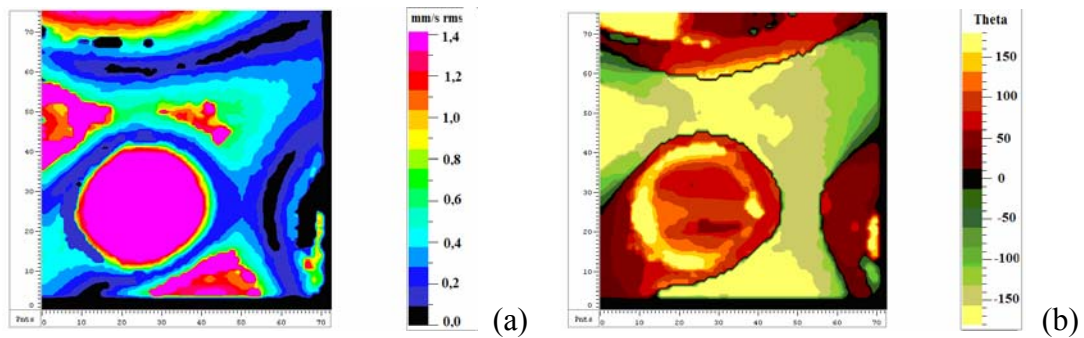


Figura 4.26 – Mapa de amplitude (a) e fase (b) de vibração de P1 (2750 Hz) – excitação com caixa acústica

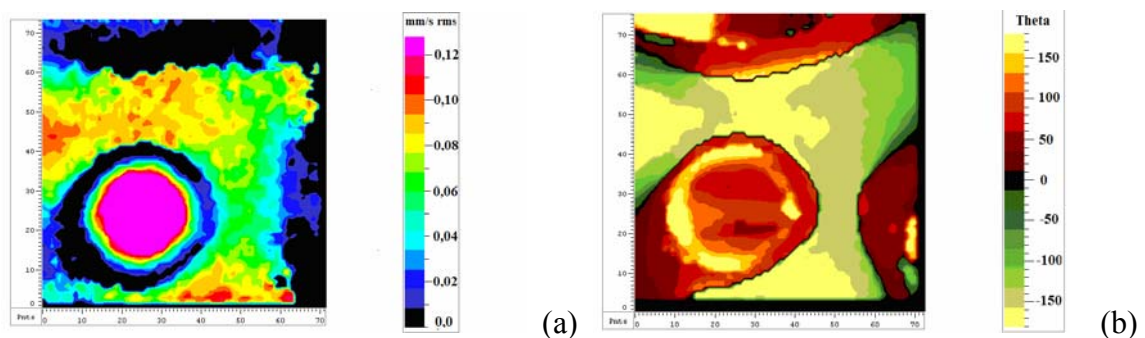


Figura 4.27 – Mapa de amplitude (a) e fase (b) de vibração de P1 (2750 Hz) – excitação com PZT

4.1.2 – Échantillons 1, 4 e 5

No caso das Échantillons 1, 4 e 5, após verificada e confirmada a uniformidade do aquecimento, analisou-se os efeitos da adoção da emissividade média quando do ajuste da termocâmara. Para isto, estudou-se o decaimento de temperatura da superfície da Échantillon 1 recoberta com tinta branca. A emissividade do pigmento, igual a $0,56 \pm 0,01$, foi considerada. A Figura 4.28 apresenta os resultados onde, novamente, a comparação de dados foi realizada incluindo-se, no mesmo gráfico, o resultado obtido quando a emissividade média, igual a $0,71 \pm 0,01$, foi adotada para toda a superfície da amostra. A escolha por se analisar a seção recoberta por tinta branca foi por ser esta considerada crítica, uma vez que apresenta o maior diferencial em relação à emissividade média. O valor da máxima incerteza expandida de medição da temperatura foi de $1,3^{\circ}\text{C}$, conforme visto na Tabela A.II.13.

Estes resultados demonstraram que embora existam diferenciais de temperatura entre a área da amostra recoberta de tinta branca em relação a quando analisada a superfície de forma global, os valores registrados são extremamente inferiores aos limites da incerteza de medição, o que valida o procedimento tradicional da adoção da média dos valores da emissividade no ajuste da termocâmara.

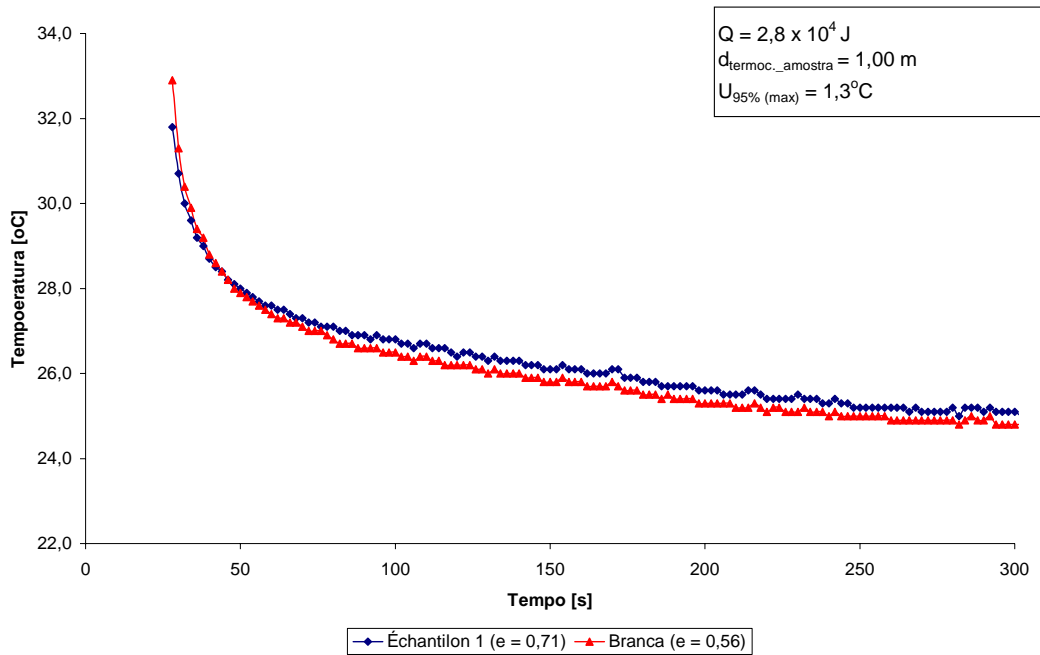
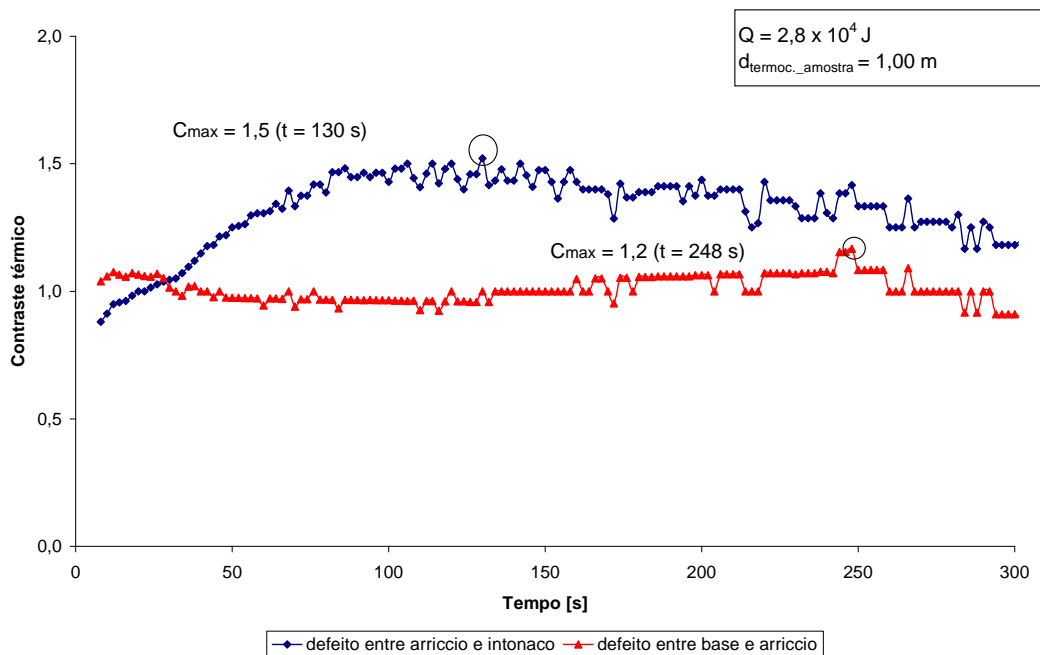


Figura 4.28– Decaimento de temperatura da Échantillon 1 – efeito das cores

A presença das duas falhas, localizadas em profundidades diferentes, fez com que se analisasse os resultados para a PT em dois momentos distintos, relativos ao $C(t)_{max}$ gerado na imagem devido à presença de cada um dos defeitos. Desta forma, a Figura 4.29 apresenta a evolução do contraste térmico durante o resfriamento da Échantillon 1. A energia absorvida pela amostra foi igual a $2,8 \times 10^4$ J e a distância entre a termocâmara e a amostra 1,00 m.



Figuras 4.29 – Contraste térmico da Échantillon 1

Em valores exatos, o contraste térmico calculado para a Échantillon 1 é mais baixo que os obtidos quando analisadas as amostras P1 a P3. Isto vem relacionado à constituição geométrica da Échantillon 1 e às suas propriedades térmicas que, em conjunto, oferecem maior resistência ao fluxo de calor. Pela mesma razão, o momento da ocorrência do máximo contraste encontra-se em posições mais avançadas no tempo.

Comparando, ainda, os valores registrados quando aplicada a Equação (2.5), utilizando-se as temperaturas obtidas para a falha localizada entre a base e arriccio, em relação a quando se utilizam as temperaturas obtidas para a falha posicionada entre o arriccio e o intonaco, nota-se que menores valores do contraste térmico máximo, em um maior transiente, são registrados no primeiro caso. Tal ocorrência se justifica na localização em posições mais profundas do defeito. Os termogramas referentes a estes instantes, tratados pelo ThermoCAM Researcher 2002 (a) e pelo IR View v1.2 (b), apresentados com a escala de cores que melhor possibilitou a individualização visual dos defeitos, podem ser observados na Figura 4.30.

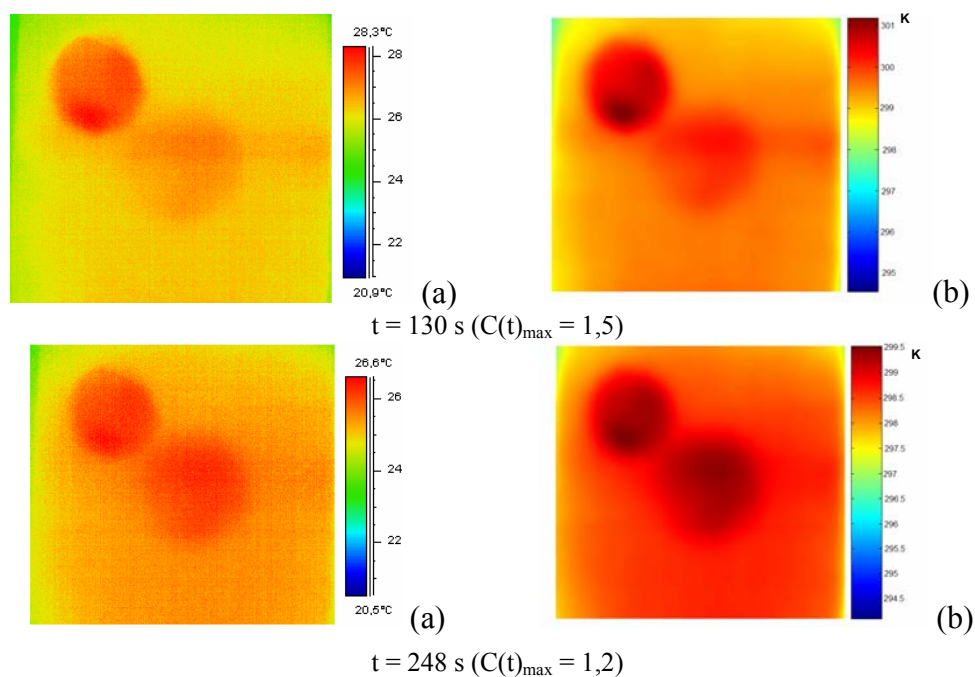


Figura 4.30 – Imagem térmica da Échantillon 1 – $C(t)_{\max}$

A aplicação da PT permitiu a identificação visual de ambos os defeitos no momento do contraste térmico máximo, embora diferenciais de temperatura, em relação a área sem defeito, muito próximos à incerteza de medição, que, conforme Tabela A.II.14, não superou $1,3^{\circ}\text{C}$, tenham sido registrados para a falha mais profunda. O desenvolvimento da temperatura superficial durante o resfriamento da amostra, obtido experimentalmente e através do modelo teórico, para a seção íntegra e com a presença de falhas, pode ser observado na Figura 4.31.

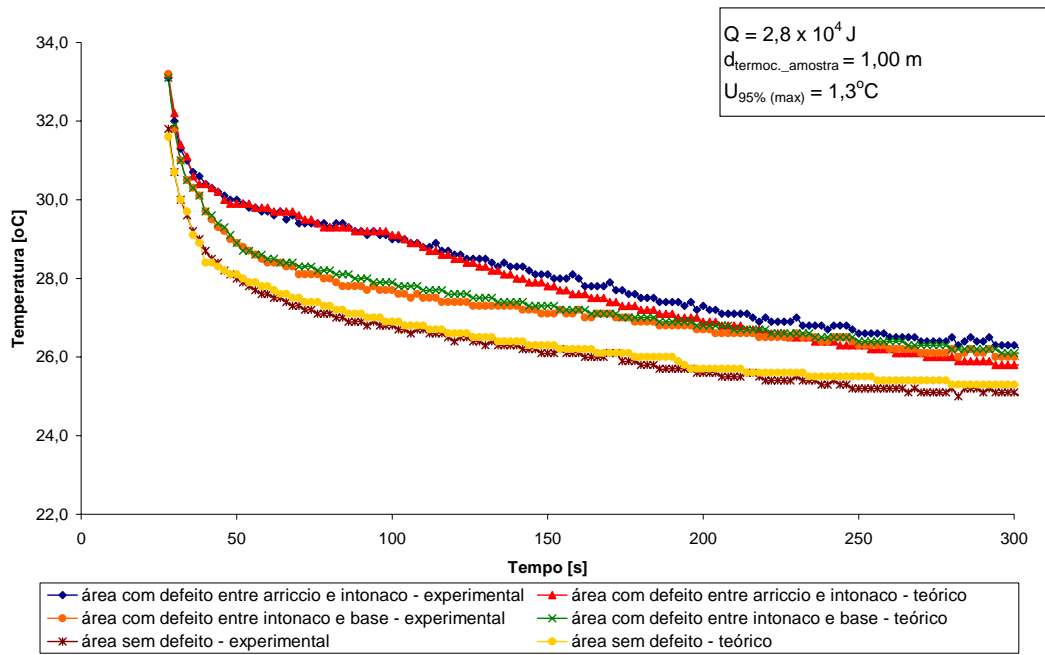


Figura 4.31 – Decaimento de temperatura da Échantillon 1 – experimental x teórico

Os resultados experimentais concordaram perfeitamente com os resultados fornecidos pela solução do modelo matemático, o que confirma a dificuldade da termografia em identificar em afrescos defeitos localizados além da camada de arriccio. Para defeitos localizados entre o arriccio e o intonaco, a técnica apresenta-se perfeitamente compatível às necessidades de um diagnóstico seguro.

Por outro lado, a vibrometria laser Doppler, já quando da análise em RMS, indicou a presença das duas falhas, conforme pode ser visto na Figura 4.32. Utilizou-se aqui a caixa acústica como fonte de excitação.

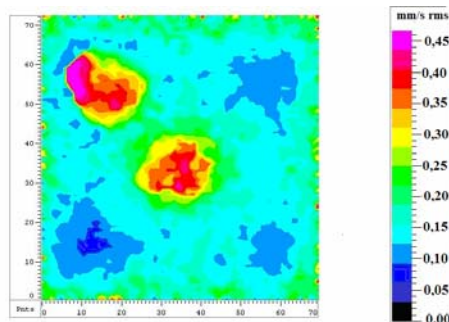


Figura 4.32 – Análise em RMS da Échantillon 1

A aplicação da transformada de Fourier forneceu a frequência de vibração dos defeitos. Empregaram-se então tais valores para excitar a amostra e realizar a análise em modo *lock-in*. A Figura 4.33 apresenta os mapas de amplitude (a) e fase (b) obtidos, onde as frequências de ressonância das falhas vem também discriminadas.

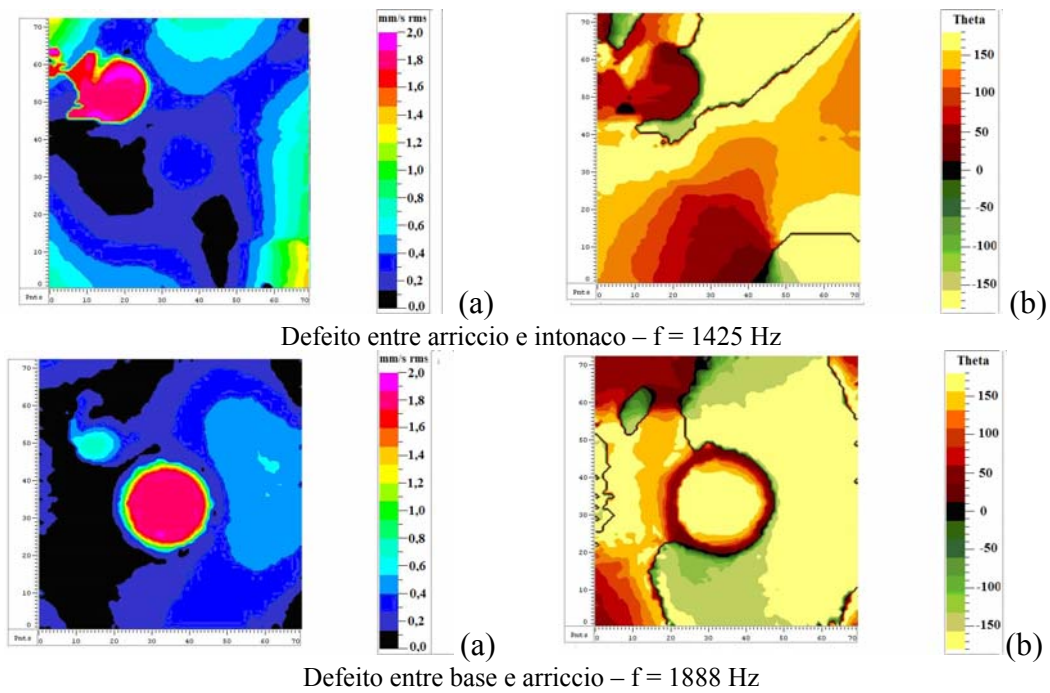


Figura 4.33 – Mapa de amplitude (a) e fase (b) de vibração da Échantillon 1

Uma observação retirada da Figura 4.33 é o aumento da frequência de ressonância do defeito com a profundidade. Embora se possa afirmar que tal relação realmente exista, ou seja, defeitos mais profundos vibram em frequências mais altas, também é verdade que defeitos de menores dimensões tendem a apresentar frequências de vibração superiores. Isto acaba gerando dúvidas e dificultando o diagnóstico através da vibrometria no que diz respeito a este parâmetro. De qualquer forma, é possível sim, através da vibrometria laser Doppler, estimar a profundidade do defeito na estrutura, porém, o procedimento de cálculo é complicado, e exige uma coleta preliminar de dados a fim de que se forme um conjunto de informações que permita, através de técnicas auxiliares, comparar os materiais envolvidos e as velocidades de vibração medidas com o aspecto dimensional da falha. No caso da termografia infravermelha, o procedimento é muito mais simples já que os dados fornecidos nos ensaios e as variáveis térmicas dos materiais envolvidos são implementados na Equação (2.7), fornecendo diretamente a profundidade do defeito.

Daí, no sentido de estimar a provável profundidade dos defeitos, aplicou-se a termografia modulada sobre a Échantillon 1. Os termogramas obtidos para algumas das frequências utilizadas podem ser vistos na Figura 4.34. No tratamento das imagens foi utilizado o programa IR View v1.2 que fornece escala de temperatura em Kelvin. A incerteza de medição máxima foi de $1,2^{\circ}\text{C}$. Seu cálculo vem apresentado na Tabela A.II.15.

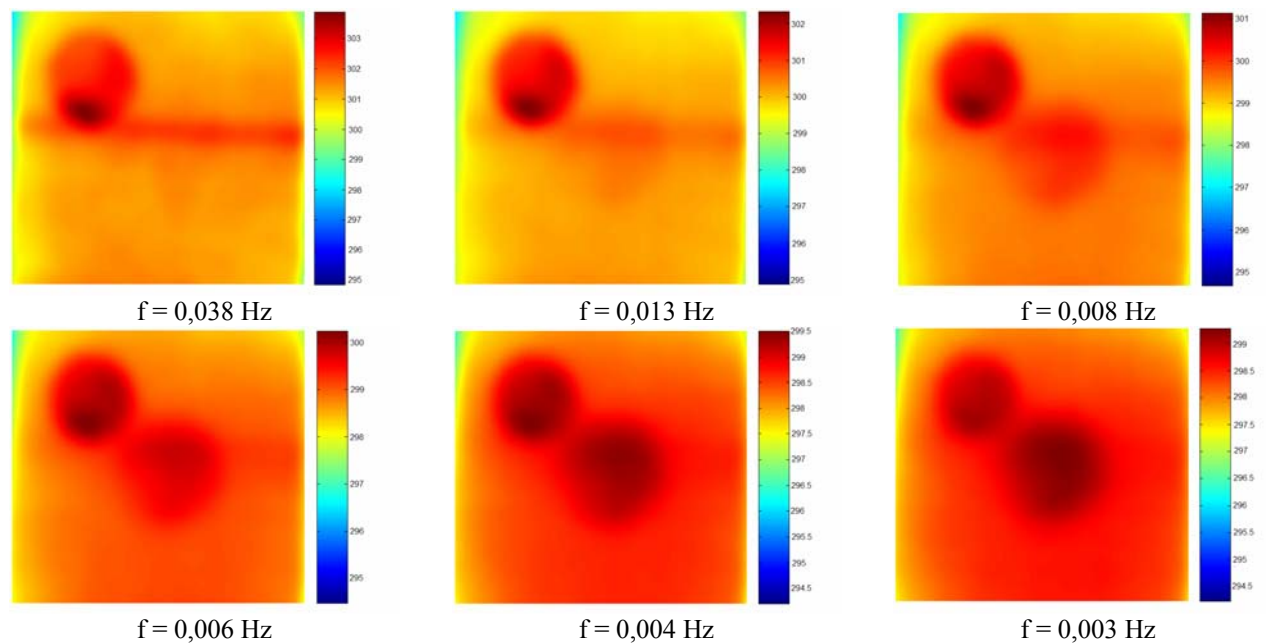


Figura 4.34 – Termografia modulada – Échantillon 1

Para a Échantillon 1, a profundidade estimada para a falha mais superficial foi de 2,4 mm, sendo sua espessura de 2,5 mm. Para o defeito mais profundo, estimou-se que estivesse localizado a 6,0 mm da superfície da amostra e com espessura de 4,0 mm. Estes dados condizem com as informações fornecidas pelo restaurador que confeccionou a peça. Vale salientar que algumas distorções são admitidas dado que o manuseio e a idade das amostras podem alterar as condições iniciais.

A problemática da Échantillon 4 consistia na individualização do diferencial de temperatura das duas áreas com presença de falhas em relação a área íntegra e, com isto, diferenciar a seção onde as falhas situadas entre o arriccio e o intonaco e entre o intonaco e a base se sobrepõem daquela onde somente a falha mais profunda encontrava-se presente. Aplicou-se sobre a peça energia igual a $1,7 \times 10^4$ J. A tomada de imagem foi realizada a 1,00 m da superfície da amostra. A Figura 4.35 apresenta os resultados teóricos e experimentais obtidos. A incerteza máxima de medição, cujo cálculo consta na Tabela A.II.16, foi igual a 1,2 °C.

Do decaimento de temperatura da Échantillon 4, pode-se constatar a completa concordância entre os ensaios e os resultados do modelo matemático; mas permanece a dificuldade em se individualizar a sobreposição das falhas por simples análise do resfriamento superficial, embora diferenças no formato das curvas indiquem que as seções estudadas apresentam características difusivas diversas. Por outro lado, conforme resultados já apresentados para a amostra P3, o diferencial de temperatura obtido entre a área íntegra e a área onde existe a

sobreposição das falhas é incompatível com o que seria obtido caso o defeito apresentasse toda a espessura que os resultados da MT sugerem (cerca de 5,9 mm, à 2,8 mm de profundidade). Isto é uma indicação da presença de mais de um defeito na mesma posição transversal. Os termogramas obtidos pela MT e tratados pelo IR View v1.2 (escala em Kelvin) com as frequências de excitação utilizadas, podem ser vistos na Figura 4.36. A incerteza de medição permaneceu em 1,2 °C e seu cálculo encontra-se na Tabela A.II.17.

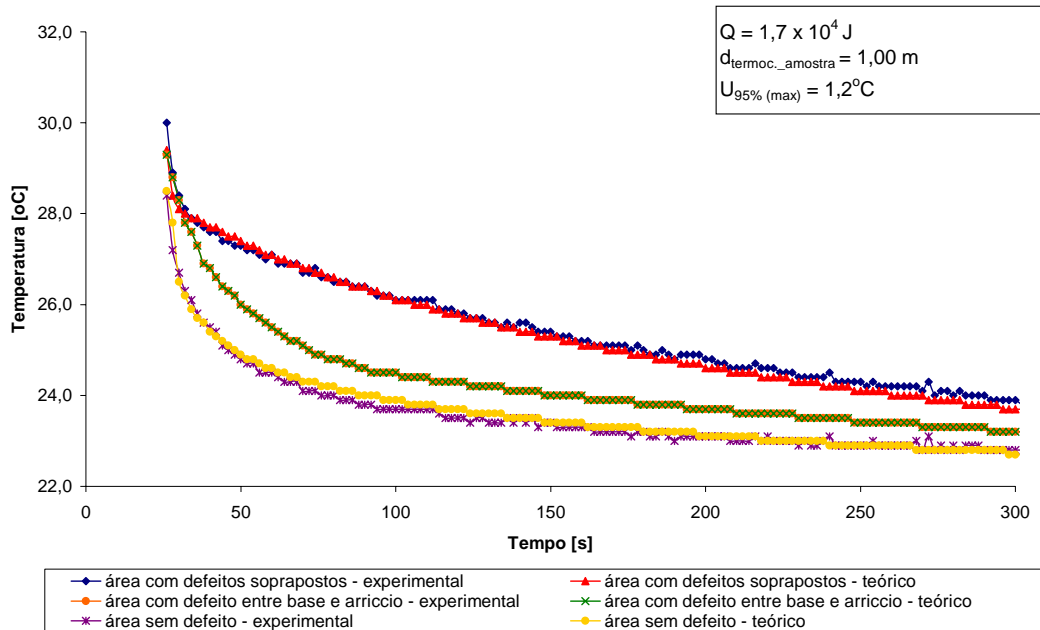


Figura 4.35 – Decaimento de temperatura da Échantillon 4 – experimental x teórico

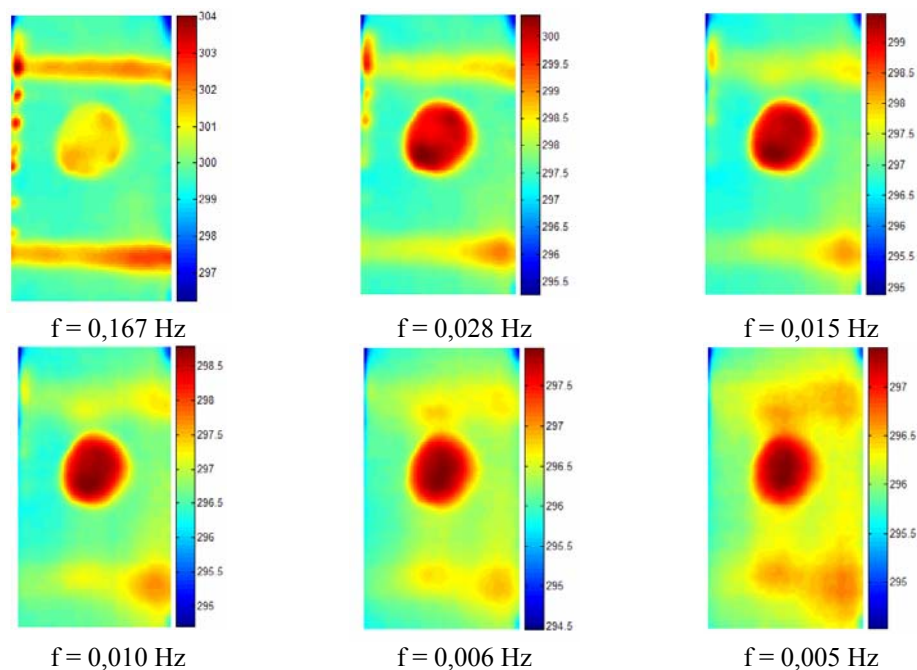


Figura 4.36 – Termografia modulada – Échantillon 4

No caso da Échantillon 4, pôde-se identificar, ainda que visualmente, a falha localizada entre a base e o arriccio, vista nos termogramas sob a forma de um anel de temperatura mais baixa ao redor do defeito localizado mais superficialmente. Rigorosamente, a presença desta ocorrência não pôde ser diagnosticado, visto que durante o transiente de resfriamento os diferenciais de temperatura apresentados para o setor em relação à área íntegra apresentavam-se menores que o dobro da incerteza de medição estimada.

Na série de testes vibrométricos, também não foi possível definir com clareza o defeito mais profundo: o mapa RMS apenas identificou a falha localizada entre o arriccio e o intonaco, enquanto a análise em FFT forneceu velocidades de vibração muito próximas para o setor onde as falhas encontravam-se sobrepostas e para o setor onde somente a falha localizada entre a base e o arriccio encontrava-se presente. Isto significa dizer que a SLDV não conseguiu diferenciar o defeito mais profundo daquele superficial. O mapa RMS e os mapas de amplitude e fase de vibração obtidos podem ser vistos na Figura 4.37. A frequência de ressonância do defeito, determinado pela aplicação da transformada de Fourier, foi igual a 1169 Hz.

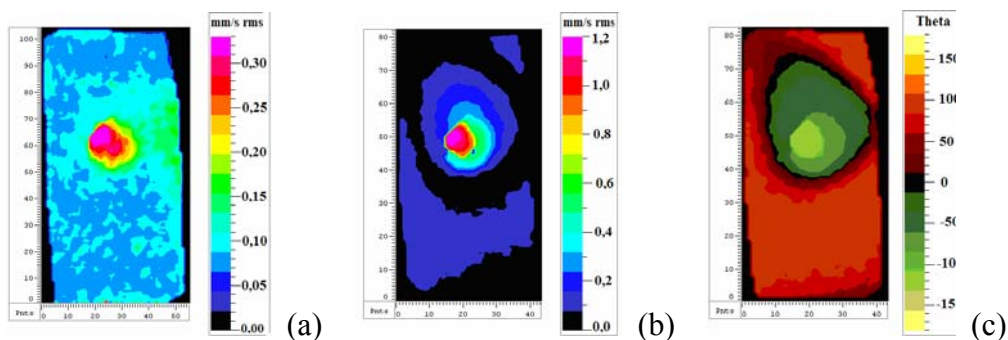


Figura 4.37 – Mapa RMS (a) e mapas de amplitude (b) e de fase (c) de vibração da Échantillon 4

A Échantillon 5 concentra em si as patologias apresentadas nas demais peças que compõem este segundo conjunto de amostras, ou seja, falha entre o arriccio e o intonaco, entre a base e o arriccio e sobrepostas. Isto permitiu uma análise bastante completa e conclusiva das irregularidades.

A Figura 4.38 apresenta o decaimento de temperatura superficial obtido experimentalmente para a região onde cada um dos citados defeitos encontrava-se presente. Manteve-se a distância de 1,00 m entre o sistema de medição e a amostra. A uniformidade do aquecimento foi previamente verificada e o tempo de acendimento das lâmpadas proporcionou à amostra

energia igual a $4,2 \times 10^4$ J. A incerteza máxima de medição durante os ensaios foi estimada em $1,3$ °C. A planilha de cálculo vem apresentada na Tabela A.II.18.

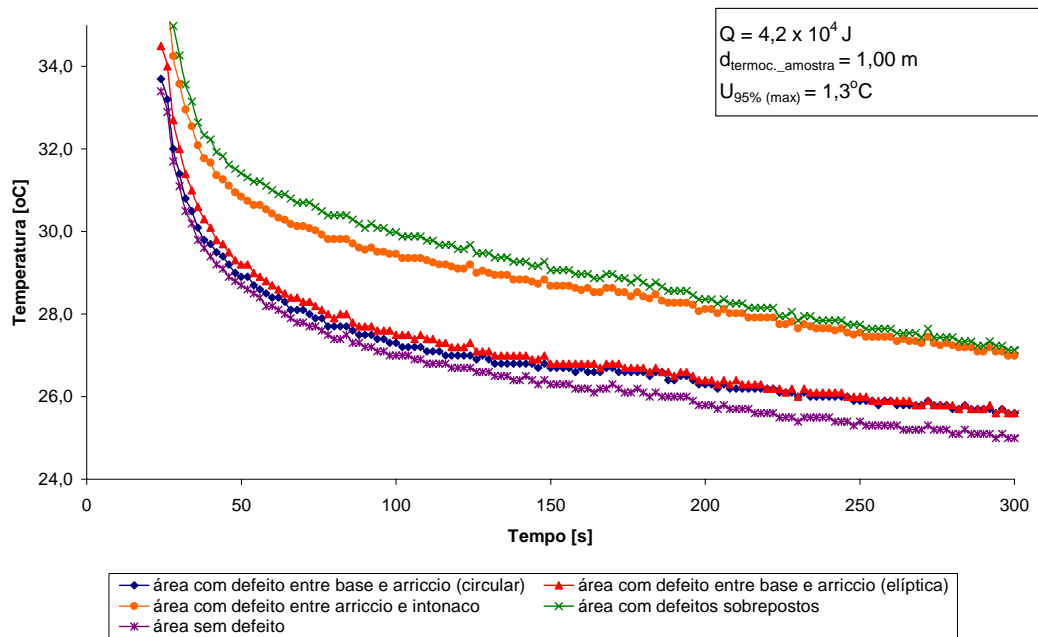


Figura 4.38 – Decaimento de temperatura da Échantillon 5 – experimental

Os resultados fornecidos na Figura 4.38 possibilitaram a identificação segura da presença de defeitos no setor onde os mesmos encontravam-se sobrepostos, assim como na área onde o restaurador simulou a falha entre as camadas de arriccio e intonaco. Para as falhas localizadas entre a base e o arriccio, a diferença de temperatura em relação ao setor íntegro encontra-se dentro de limites inferiores ao dobro da incerteza. Isto faz com que certa dúvida em relação à presença da irregularidade seja criada, embora a análise dos resultados obtidos, quando a amostra foi solicitada termicamente utilizando-se pulsos de energia, permita a identificação visual da ocorrência, conforme verificado na Figura 4.39. Os tempos indicados referem-se ao período decorrido, após a retirada da fonte térmica, no qual as imagens foram tomadas. No tratamento das imagens utilizou-se paleta de cores que maximizasse a análise dos dados.

O modelo matemático implementado para a análise teórica das condições da Échantillon 5, por sua vez, mostrou-se bastante eficiente no sentido de prever as respostas dos ensaios termográficos, já que a diferença em temperatura, durante todo o resfriamento da amostra e para todos os setores analisados, nunca superaram a incerteza de medição. A evolução da temperatura superficial no tempo, obtida pela solução do modelo matemático para as mesmas áreas analisadas nos testes, pode ser vista na Figura 4.40.

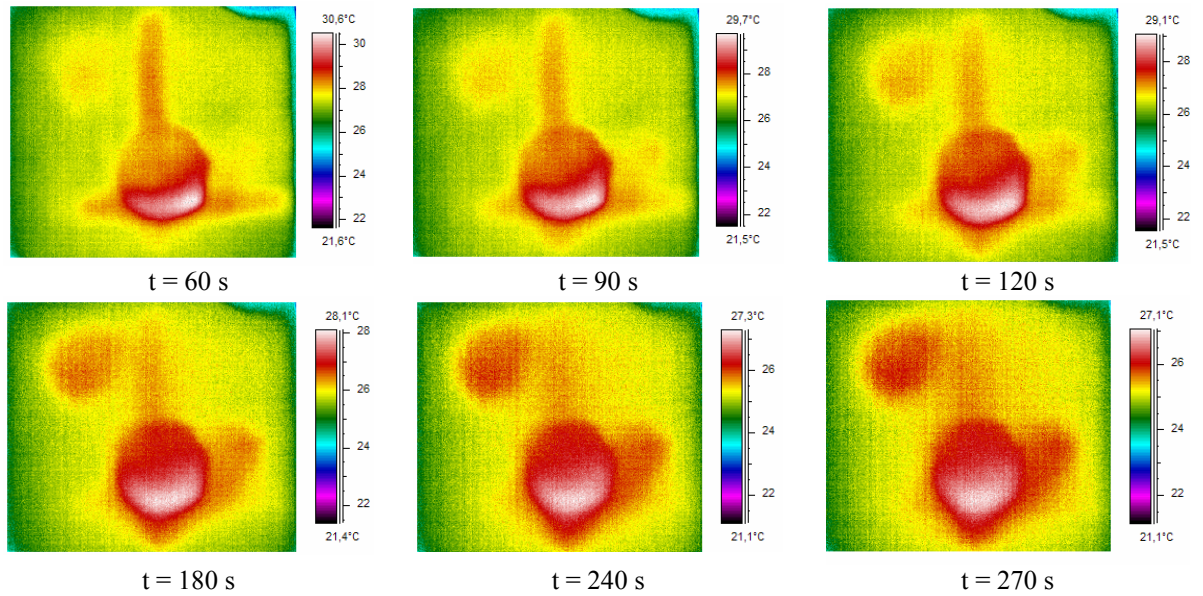


Figura 4.39 – Termografia pulsada – Échantillon 5

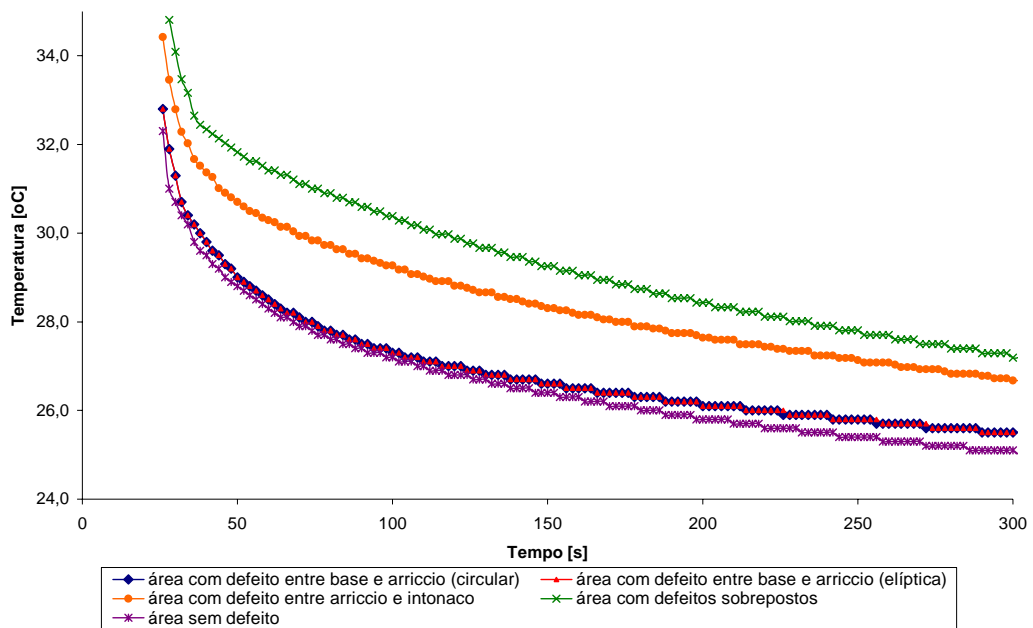


Figura 4.40 – Decaimento de temperatura da Échantillon 5 – teórico

Já a MT permitiu prever a localização em profundidade e a espessura de cada um dos defeitos, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Localização dos defeitos da Échantillon 5 fornecidos pela MT

Localização do defeito	Profundidade [mm]	Espessura [mm]
base e arriccio (circular)	4,7	2,5
base e arriccio (elíptico)	4,8	2,4
arriccio e intonaco	2,5	2,6

Para a vibrometria laser Doppler, a identificação dos defeitos presentes na Échantillon 5 foi bastante difícil: as falhas mais profundas não foram nem mesmo registradas e a análise em FFT não conseguiu diferenciar, um do outro, os defeitos localizados na mesma posição longitudinal. A Figura 4.41 apresenta estes resultados.

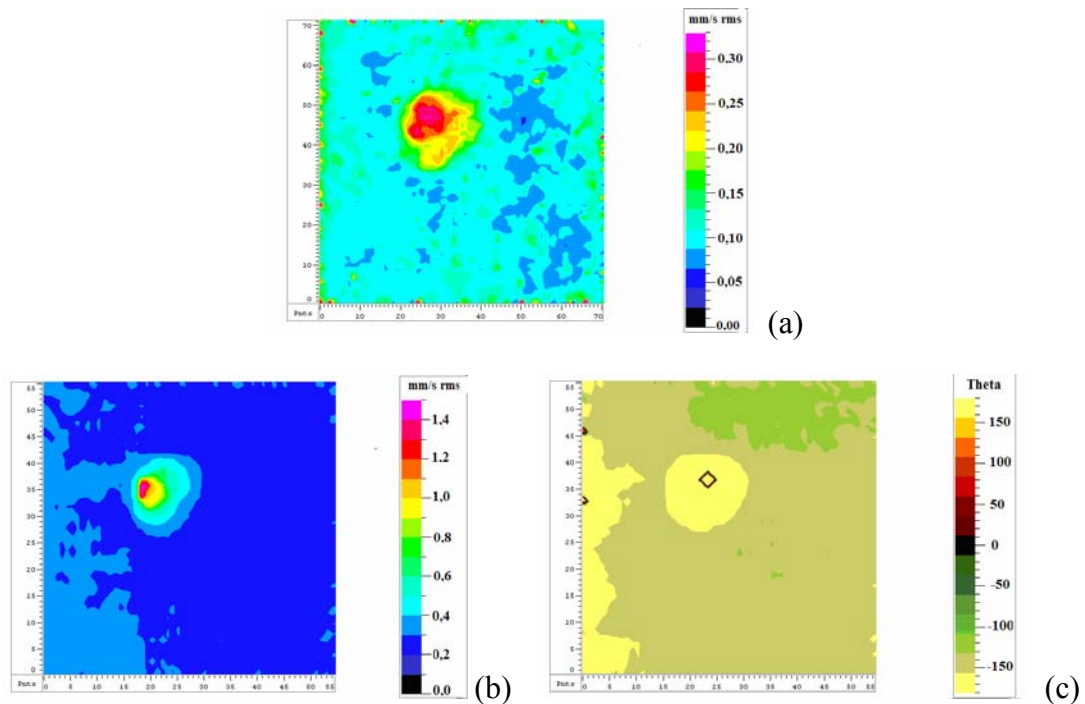


Figura 4.41 – Mapa RMS (a) e mapas de amplitude (b) e de fase (c) de vibração da Échantillon 5

Da análise destes resultados pode-se dizer que a termografia apresentou, para a Échantillon 1 e para a Échantillon 5, maior capacidade na identificação, ao menos que visual, de todos os defeitos. Para os defeitos simulados em posições entre o arriccio e o intonaco e para a seção onde existia sobreposição das falhas, as exigências metrológicas para a identificação das ocorrências foram atendidas. Para a vibrometria, a presença de sobreposição não foi absolutamente sentida e não se conseguiu individualizar a frequência de vibração de uma e de outra falha. Já para a Échantillon 4, a qualidade das respostas fornecidas por cada metodologia não permitiu, a princípio, que se apontasse vantagens significativas de uma sobre a outra. Já a análise paralela das respostas fornecidas pela termografia pulsada e pela termografia modulada permitiu supor a existência de mais de um defeito sobreposto e não de um único de maior espessura.

4.2 – OBRAS EM MADEIRA

4.2.1 – Amostras 1/2 e 3/2

Em função da similaridade geométrica das peças e dos defeitos inclusos entre as camadas, as amostras 1/2 e 3/2 apresentaram resultados muito semelhantes. Portanto, serão estes apresentados de forma a evitar a repetição das informações.

A primeira análise realizada foi no sentido de verificar como a presença da camada de verniz, aplicada como acabamento final das peças, influenciava os valores registrados pelo sistema de medição. Para tanto, analisou-se o decaimento de temperatura da amostra 1/2 em seções com e sem presença do produto. O valor da emissividade adotado foi o médio identificado para toda a superfície. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.42. A energia imposta à amostra foi igual a $3,2 \times 10^4$ J e manteve-se a termocâmara distanciada em 0,60 m da peça. A incerteza máxima de medição não superou $1,3^\circ\text{C}$. Seu cálculo vem expresso na Tabela A.II.19.

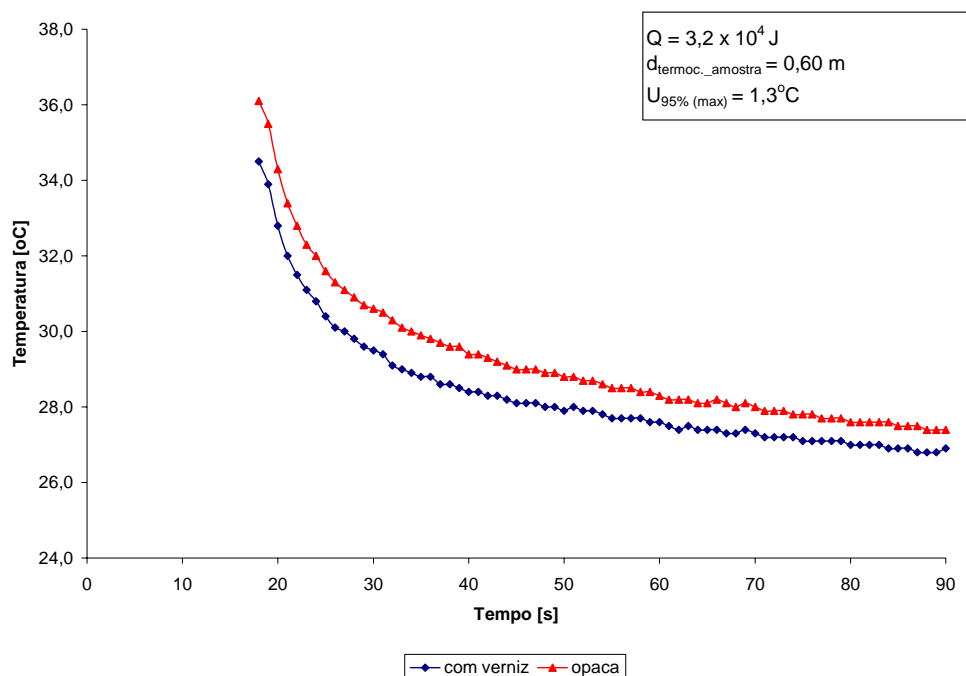


Figura 4.42 – Decaimento de temperatura da amostra 1/2 – emissividade média

Ao contrário das amostras anteriores, onde a adoção de valores médios não representou grande preocupação, a utilização da emissividade média no conjunto de amostras em madeira fez com que as temperaturas registradas pela termocâmara, para a seção recoberta de verniz em relação àquela opaca, apresentassem diferenças próximas ou ligeiramente superiores à incerteza. Esta situação confirma que a presença de verniz influencia as respostas à medida que torna a superfície mais refletiva, levando ao registro de temperaturas inferiores a real e à diminuição da relação sinal-ruído. Baseando-se nestes dados, aconselha-se, nestes casos, a utilização do procedimento padrão de adoção de valores médios para a emissividade durante

os ensaios e, posteriormente, durante o processamento dos dados, associar, a cada seção estudada, o efetivo valor da variável. Isto foi realizado neste estudo e corrigiu as variações no sinal de saída da termocâmara, conforme pode ser visto na Figura 4.43.

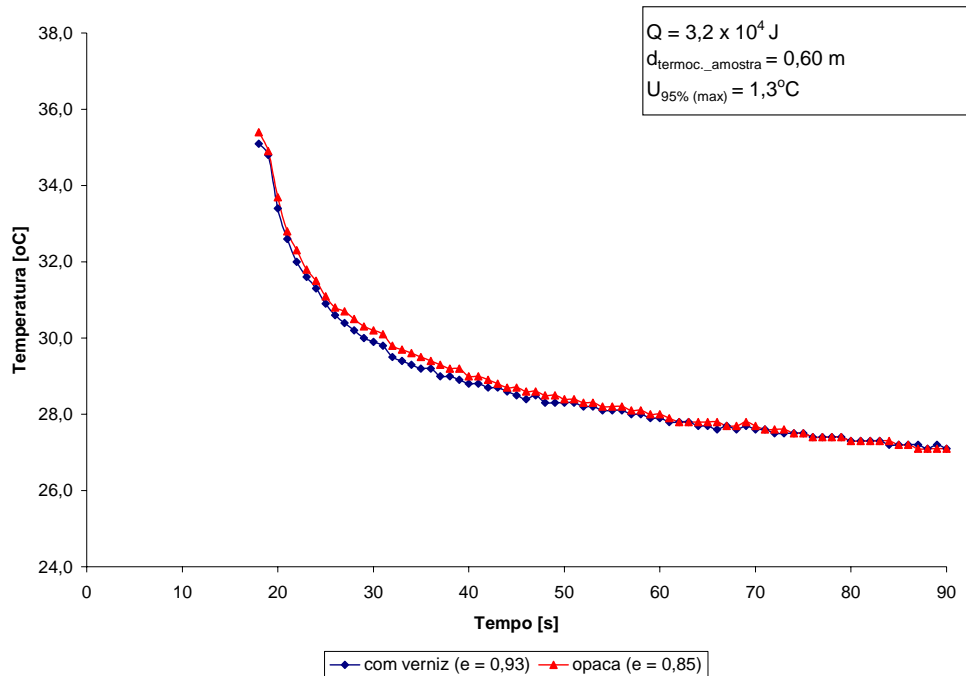


Figura 4.43 – Decaimento de temperatura da amostra 1/2 – emissividade local

Resolvido o problema de variações no sinal de saída do sistema, procurou-se validar as respostas obtidas. Para tanto, comparou-se os resultados experimentais com os obtidos pela análise teórica para as seções com e sem defeito. Realizou-se o estudo sobre a amostra 3/2 quando submetida à termografia pulsada com energia de excitação igual a $4,8 \times 10^4$ J. A incerteza máxima deste conjunto de dados, apresentados na Figura 4.44, foi de $1,3^\circ\text{C}$. Seu cálculo vem discriminado na Tabela A.II.20.

De posse destes resultados concluiu-se que existe concordância dos dados experimentais com os valores obtidos através do modelo matemático, o que leva a validação das respostas. Já a caracterização do defeito interno foi plenamente possível, uma vez que o diferencial de temperatura registrado para as seções com e sem falha apresentou-se, no momento do máximo contraste térmico obtido ($t = 30$ s, $C(t)_{\text{max}} = 1,4$) e em durante quase todo o transiente de resfriamento da amostra, bem superior ao dobro do valor da incerteza estimada.

Já a aplicação da MT permitiu estimar a localização em profundidade do defeito. A Figura 4.45 apresenta, para algumas das frequências de excitação utilizadas, os termogramas obtidos, onde foi utilizado o programa IR View v1.2 no tratamento das imagens.

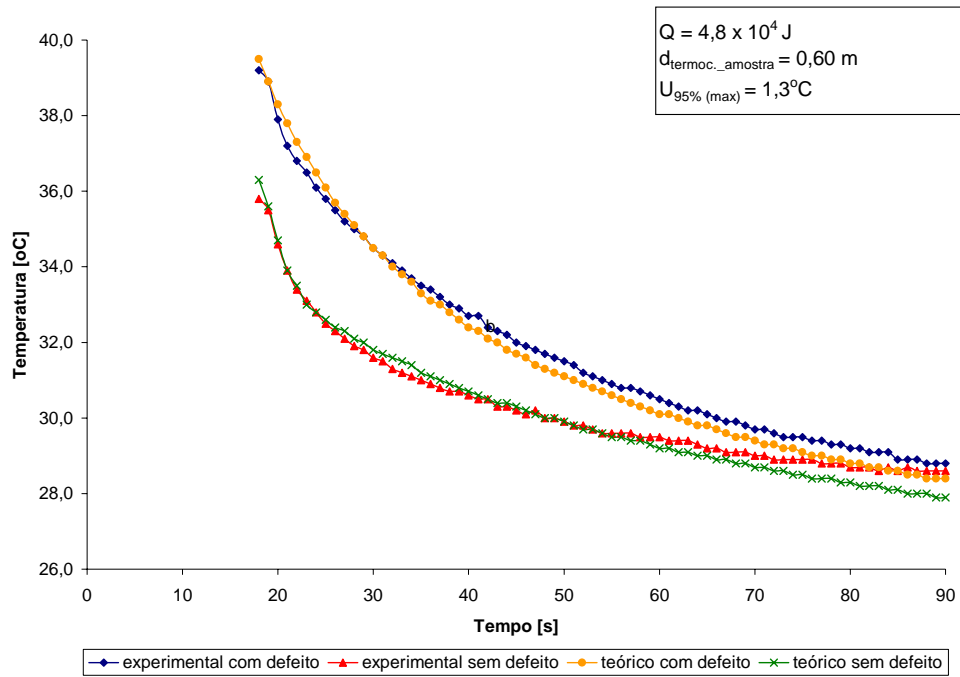


Figura 4.44 – Decaimento de temperatura da amostra 3/2 – experimental x teórico

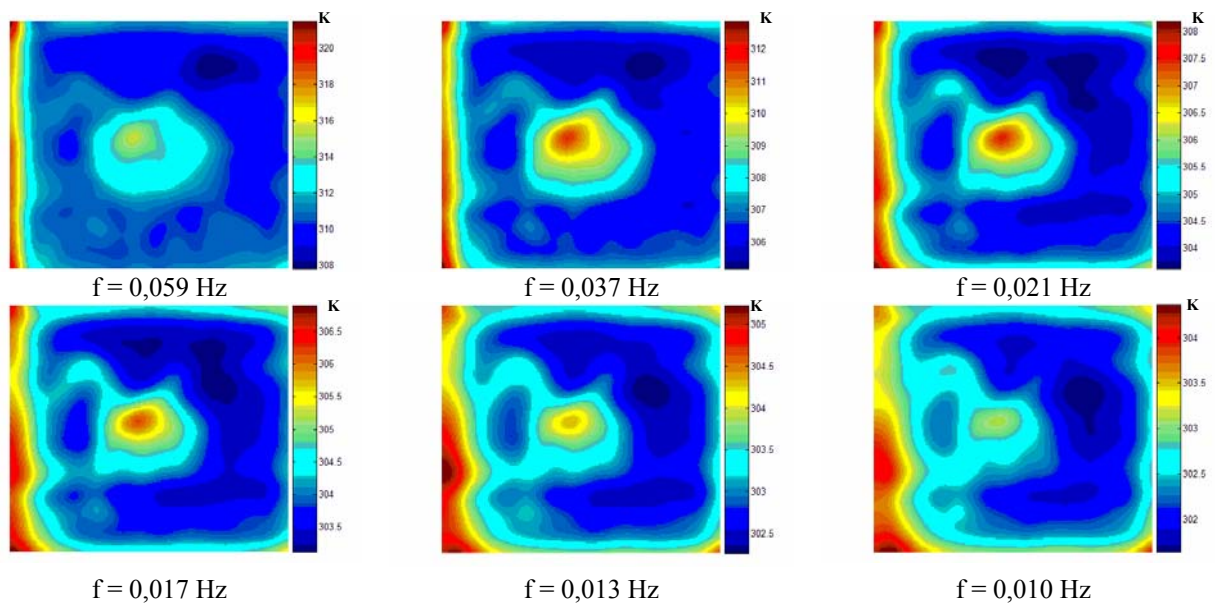


Figura 4.45 – Termografia modulada – amostra 3/2

Dos termogramas obtidos pela MT, o defeito começa a ficar visível em frequências próximas a 0,060 Hz, assim mantendo-se até quando utilizado valores de excitação próximos a 0,012 Hz. Com isto, a MT caracterizou a falha como havendo 1,4 mm de espessura, localizada a 1,0 mm de profundidade.

Quando analisadas as peças através da vibrometria laser Doppler, utilizou-se, na amostra 1/2, excitação acústica. Devido à qualidade dos resultados obtidos quando da análise em RMS,

decidiu-se por utilizar, quando do estudo da amostra 3/2, não só a caixa acústica, mas também o PZT, o que maximizou as respostas e a identificação do defeito, conforme pode ser visto na Figura 4.46.

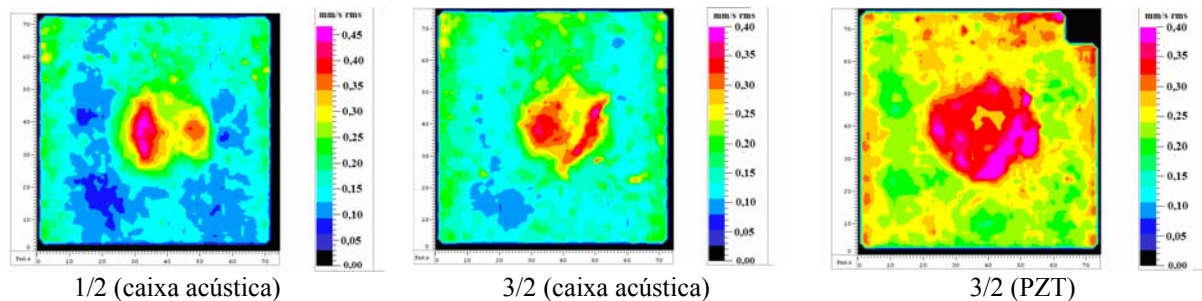


Figura 4.46 – Mapa RMS – amostras 1/2 e 3/2

A melhor visualização do defeito incluso na amostra 1/2 foi possível através da implementação da SLDV em modo *lock-in*, aplicável após a utilização da transformada de Fourier que identificou a frequência de ressonância da falha como sendo igual a 1338 Hz. Os mapas de amplitude e fase de vibração podem ser visualizados na Figura 4.47.

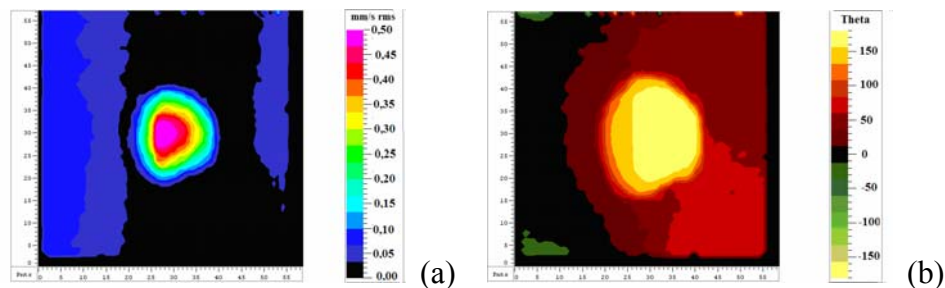


Figura 4.47 – Mapas de amplitude (b) e de fase (c) de vibração da amostra 1/2

4.2.2 – Ícone Bizantino

O estudo efetuado sobre a amostra que representa a constituição multi-laminar de um ícone Bizantino ajudou na compreensão do comportamento térmico deste tipo de obra quando submetida a ensaios termográficos.

Dentre o conjunto de informações fornecidas pelos resultados das provas executadas, pôde-se observar que as características espelhadas, conferidas à superfície pela aplicação da camada de douramento, a exemplo da camada de verniz, influenciam bastante a temperatura registrada pelo sistema de medição, o que, em situações de estudo de obras reais, pode acarretar em erros caso a emissividade não seja corretamente ajustada durante os ensaios e/ou tratamento de dados.

Na Figura 4.48, o decaimento de temperatura apresentado para o setor da amostra que recebeu a camada de douramento vêm registrada de duas formas: com a emissividade associada ao material de acabamento durante a calibração do sistema ($0,15 \pm 0,01$) e com emissividade um pouco acima deste valor, porém ainda inferior à da média superficial. Incluíram-se, na mesma figura, os valores encontrados para os setores recobertos com a fina camada protetiva de verniz e para o setor onde se aplicou unicamente os pigmentos necessários à composição do motivo. A incerteza dos valores de emissividade foi de $\pm 0,01$. A distância entre a amostra e sistema de medição foi de 0,70 m. A incerteza máxima de medição da temperatura, explicitada na Tabela A.II.21, foi de $1,3^{\circ}\text{C}$, para energia de excitação igual a $3,0 \times 10^4$ J.

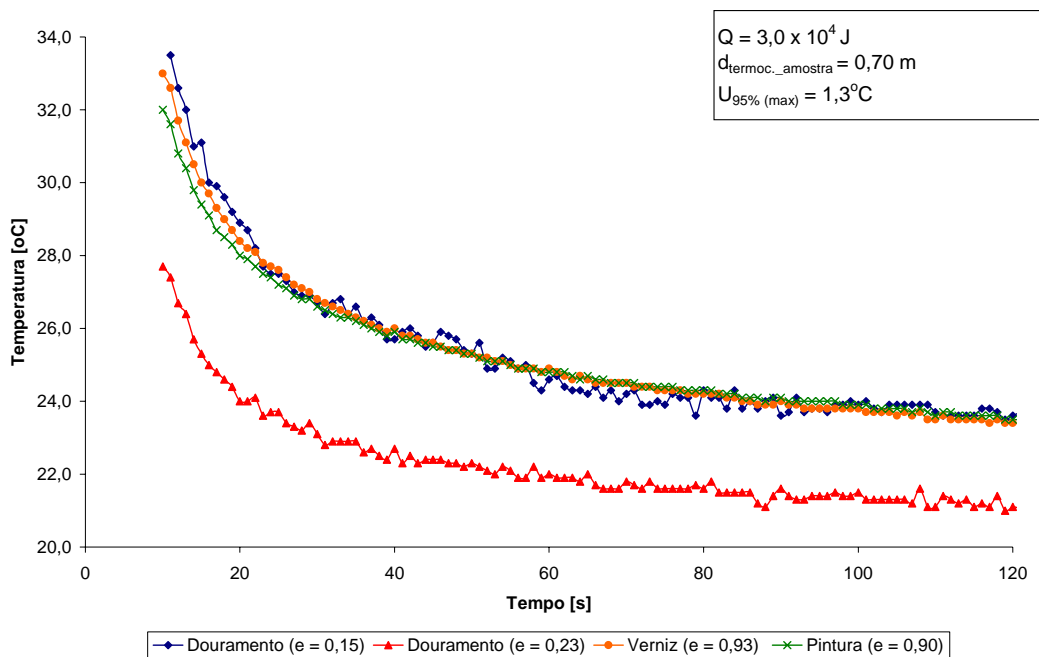


Figura 4.48 – Decaimento de temperatura – ícone Bizantino

Ao se utilizar valores de emissividade, para o setor que recebeu o douramento, diferentes do determinado na calibração do sistema de medição, os pontos de temperatura registrados deslocam a curva de resfriamento. Porém, embora subestimados, os valores de temperatura reportam ao mesmo formato de curva obtido com o valor de emissividade considerado correto, e, no caso de análise de descolamentos na interface das camadas, o diagnóstico poderia não ser afetado caso o acabamento estivesse presente em toda a superfície. Porém, em casos convencionais, convém sempre empregar a calibração como ponto de referência na escolha desta variável, já que o mesmo deslocamento da curva pode portar, em setores onde existam potenciais falhas, a valores tais que a diferença de temperatura entre a área íntegra e com o provável defeito supere a incerteza da medição, configurando em diagnóstico positivo

de uma ocorrência inexistente. O espelhamento produzido pela presença do verniz não influenciou os resultados, a ponto de configurar um problema para o diagnóstico, somente porque se utilizou, durante o tratamento de dados, a emissividade característica do acabamento.

A este ponto, empregaram-se os dados obtidos experimentalmente para avaliar a eficácia do modelo matemático desenvolvido em descrever o comportamento da amostra quando submetida a provas térmicas de diagnóstico. O decaimento de temperatura obtido pela análise teórica e durante os ensaios pode ser vista na Figura 4.49.

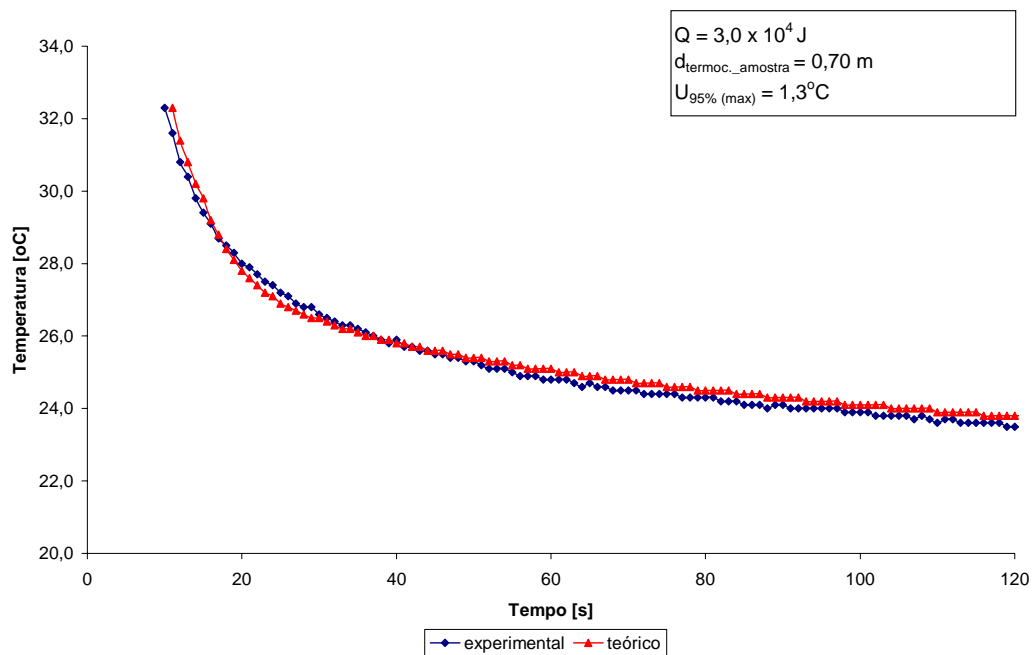


Figura 4.49 – Decaimento de temperatura – ícone Bizantino (experimental x teórico)

Comprovada a capacidade do modelo em reproduzir o comportamento térmico da peça em condições íntegras, e com o objetivo de prever a resposta da amostra caso verdadeiras falhas estivessem presentes, introduziu-se no código FORTRAN[®], utilizado na solução do modelo, as características e posições de supostos descolamentos, de espessuras iguais a 0,5 mm, intercalados entre as camadas de base e tela e entre as camadas de tela e gesso. Os resultados da simulação podem ser observados na Figura 4.50.

Da solução do modelo matemático observa-se que a diferença de temperatura entre a área íntegra e as áreas com supostos descolamentos entre as camadas encontra-se bem acima da incerteza de medição obtida experimentalmente. Com isto, as falhas seriam perfeitamente identificáveis caso realmente estivessem presentes na amostra.

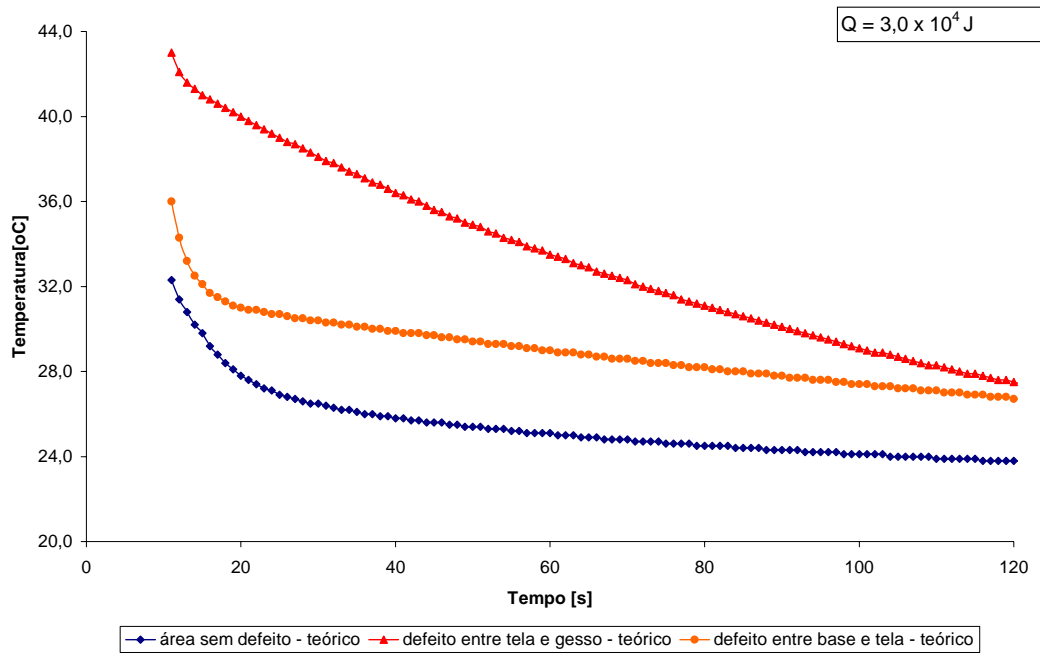


Figura 4.50 – Decaimento de temperatura – ícone Bizantino (teórico – $3,0 \times 10^4$ J)

Por outro lado, menores quantidades de energia seriam já capazes de indicar a presença de defeitos. Identificou-se, então, através da análise teórica, a menor quantidade de energia capaz de individualizar as falhas. Os primeiros resultados positivos foram obtidos quando energia de excitação igual a $1,8 \times 10^4$ J foi utilizada no modelo: diferenças de temperatura entre as áreas com e sem defeitos maiores que o dobro da incerteza de medição experimental foram fornecidas para os dois descolamentos simulados, conforme pode ser visto na Figura 4.51

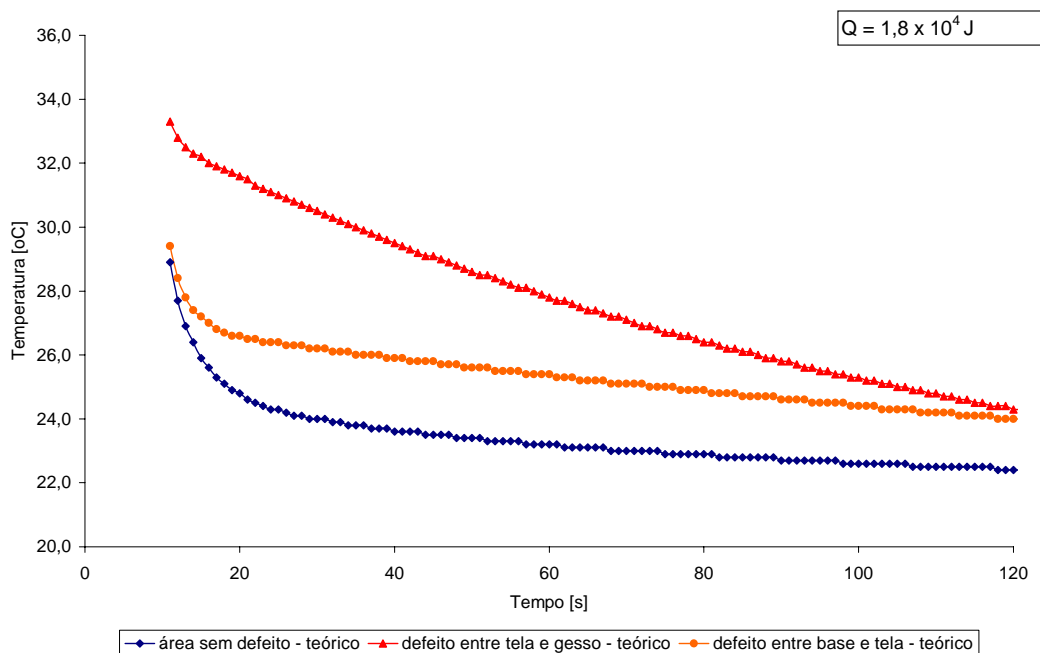


Figura 4.51 – Decaimento de temperatura – ícone Bizantino (teórico – $1,8 \times 10^4$ J)

Após a análise em laboratório, onde foi possível identificar a capacidade da termografia em avaliar a presença de defeitos entre as camadas que compõem a estrutura de afrescos e obras realizadas sobre madeira, estabelecendo, através da comparação de respostas obtidas, vantagens e limitações em relação à SLDV, utilizou-se a metodologia proposta para avaliações *in situ*.

4.3 – ESTUDO *IN SITU*

A aplicação de NDTE e da SLDV em obras reais vem complementar este estudo. A análise através da termografia assumiu, por requisição dos restauradores, um escopo mais qualitativo quantitativo, sendo utilizada na avaliação da presença de umidade, estruturas não visíveis e inclusões presentes na alvenaria que constitui os monumentos. Já à SLDV coube a identificação de descolamentos nos afrescos presentes nos locais.

4.3.1 – Igreja de São Nicolau (Bălinești)

O estudo termográfico da igreja de São Nicolau iniciou-se pelo setor externo leste do portal de entrada. Efetuou-se tomadas de imagens em dois momentos. Os resultados obtidos para o setor superior podem ser vistos na Figura 4.52, juntamente com as fotos que identificam a área analisada e condições de sombreamento no momento do registro da imagem térmica. Na imagem termográfica vêm também assinaladas as ocorrências identificadas.

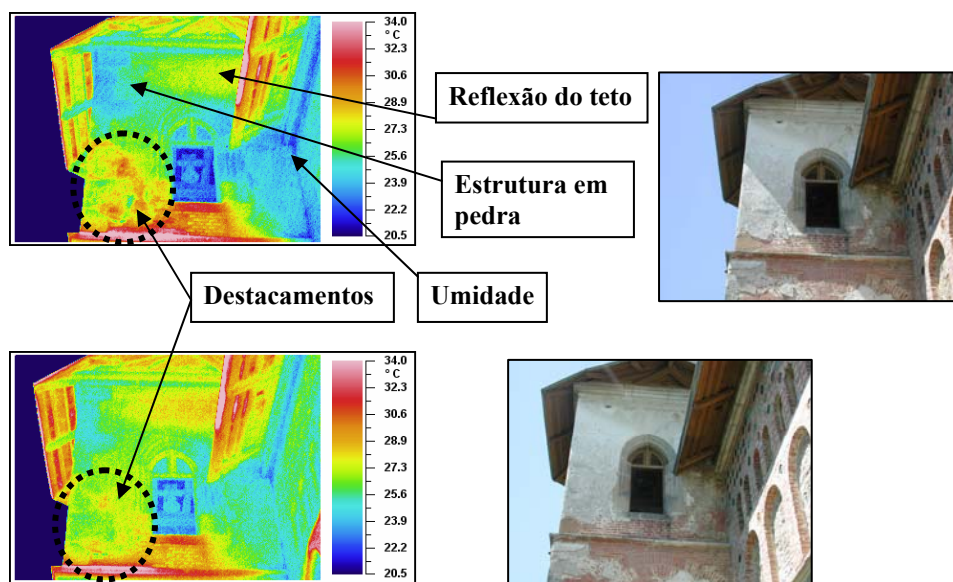


Figura 4.52 – Igreja de São Nicolau (Bălinești) – portal de entrada (setor leste superior)

A presença de umidade, caracterizada por área de menor temperatura, foi identificada nas regiões próximas à junção das paredes. Esta ocorrência é muito comum e favorecida aqui pela

presença de vegetação que impede a chegada de radiação solar direta. Para os restauradores, a identificação destes pontos foi interessante à medida que a ocorrência se refletia no interior da parede, favorecendo destacamentos nos afrescos que, atualmente, encontram-se em processo inicial de restauração. Embora simples, o diagnóstico foi decisivo na adoção de medidas naquele setor. Além da umidade, pôde-se verificar a presença de alguns destacamentos em pontos específicos do reboco, utilizado externamente para a recuperação da parede, e a característica estrutural da construção que, embora utilizasse, na maior parte, tijolos de alvenaria, empregava também pedras para a sustentação dos vértices. Uma área com maior temperatura foi verificada na parte superior da construção. Porém aqui não se tratava de destacamentos, mas simples reflexão dos raios solares incidentes sobre o teto que, como na arquitetura típica de região, vem constituído de placas de metal.

A parte inferior do portal foi também observada durante o ciclo de aquecimento e resfriamento. A Figura 4.53 apresenta os resultados obtidos e fotos, em detalhe, do local no momento analisado.

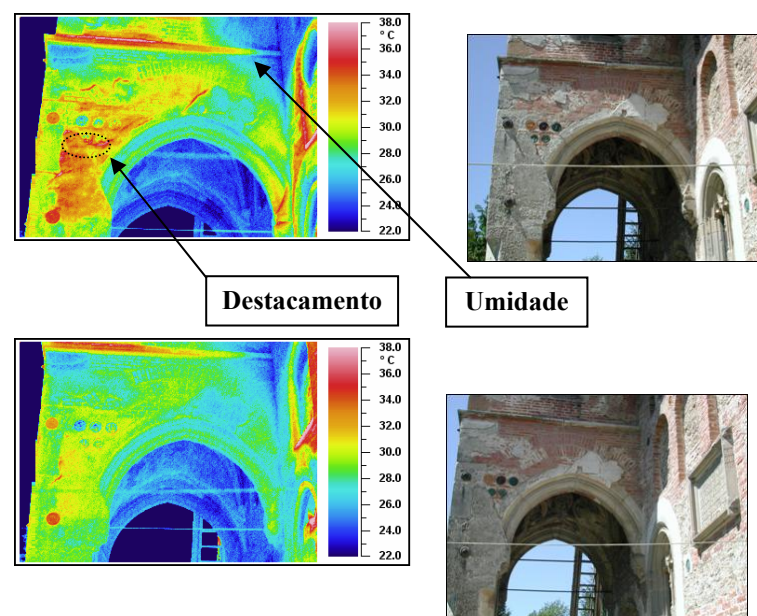


Figura 4.53 – Igreja de São Nicolau (Bălinești) – portal de entrada (setor leste inferior)

A presença de umidade continuava, portanto, no setor inferior, na região de junção das paredes. Foram identificados também alguns pequenos destacamentos em área recoberta por reboque e a estrutura em pedra. A menor condutividade das pedras retardava o seu processo de aquecimento, representando no termograma áreas de menor temperatura.

Já no setor oeste superior do portal, foi possível identificar temperaturas pontuais mais altas,

relacionadas a algumas peças de cerâmica que começavam a se desprender da estrutura de base, conforme assinalado na Figura 4.54.

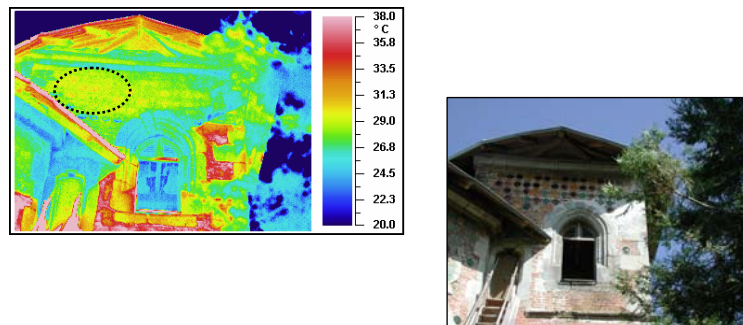


Figura 4.54 – Igreja de São Nicolau (Bălinești) – portal de entrada (setor oeste superior)

Em painéis localizados no setor sul da igreja, os ensaios termográficos identificaram que, durante os trabalhos de restauração, foi utilizado, em um pequeno campo, material de características diversas do empregado no restante da área, o que não vinha relatado nos relatórios. Análises estão sendo realizadas a fim de identificar as causas e o tipo de resina utilizada. A Figura 4.55 sinaliza tais ocorrências.

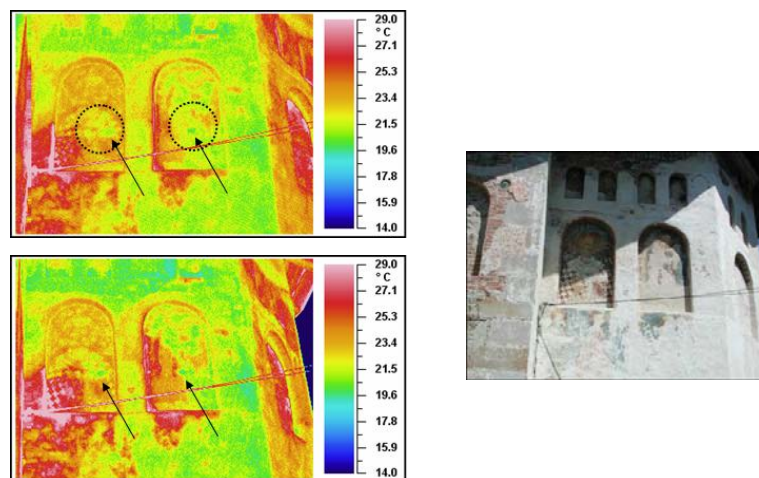


Figura 4.55 – Igreja de São Nicolau (Bălinești) – painéis (setor sul)

Tendo como objetivo a identificação de destacamentos das camadas de afrescos localizados no interno do átrio de entrada, a implementação da SLDV contou como método de excitação a caixa acústica. Os resultados vieram sempre apresentados sob a forma de mapa RMS da área analisada.

Foram estudadas duas áreas do afresco localizado na parede leste, conforme destacado na Figura 4.56 que também apresenta os mapas RMS correspondentes, evidenciando as principais ocorrências verificadas.

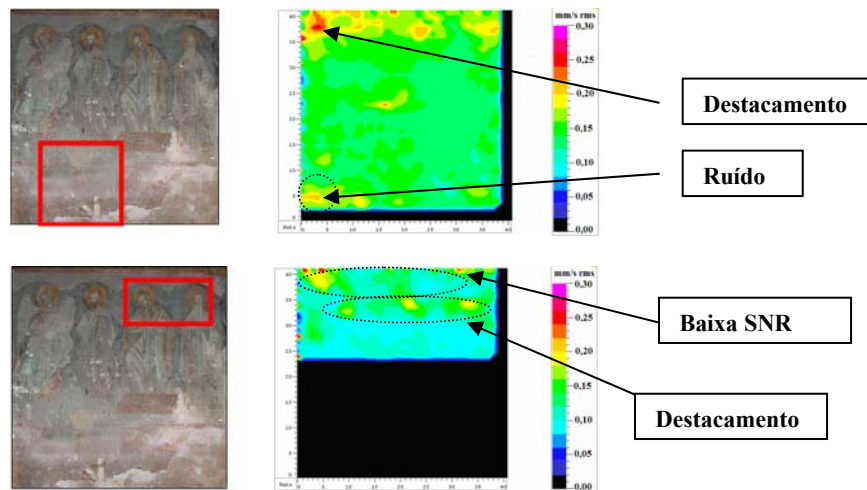


Figura 4.56 – Igreja de São Nicolau (Bălinești) – afrescos (parede leste)

Durante a realização dos ensaios, o transito de pessoas pelo piso de madeira, onde também se apoiava o vibrômetro de varredura, gerou um sinal que poderia configurar falso alarme de irregularidade. A ocorrência deste tipo de ruído de medição pode ser tornar um problema à SLDV em locais de alta visitação, o que não ocorre com a termografia. Por outro lado, os destacamentos foram identificados, mesmo em área onde existia baixa relação sinal-ruído.

Os resultados referentes aos outros dois afrescos estudados, localizados, respectivamente, nas paredes norte e oeste do átrio de entra de Bălinești, apresentaram respostas semelhantes: destacamentos, caracterizados no mapa RMS por maior velocidade de vibração, baixa relação sinal-ruído em alguns setores, o que dificulta a análise, e áreas consolidadas. Tais resultados vêm apresentados na Figura 4.57.

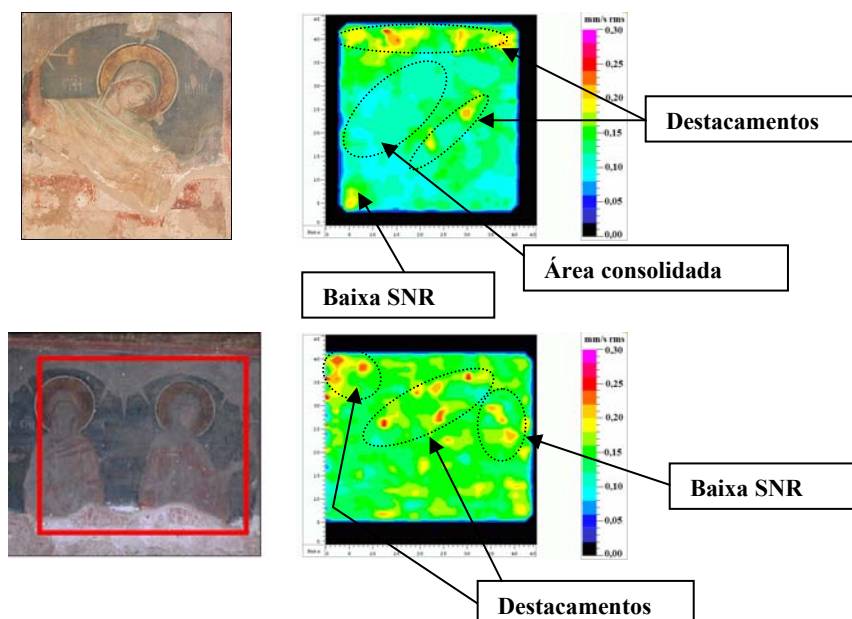


Figura 4.57 – Igreja de São Nicolau (Bălinești) – afrescos (paredes norte e oeste)

4.3.2 – Igreja do Monastério Popăuți (Botoșani)

Através dos ensaios termográficos realizados em Popăuți foi possível identificar alterações efetuadas durante intervenções ocorridas ao longo do tempo na estrutura da parede que divide o nártex da nave principal. A Figura 4.58 apresenta a análise efetuada naquele setor.

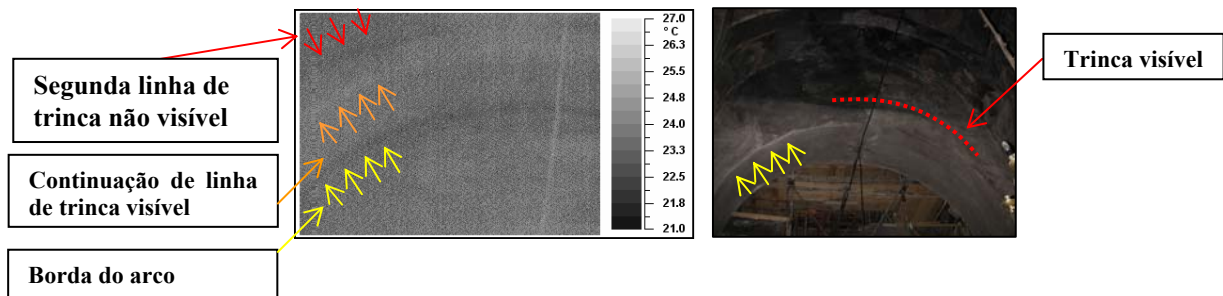


Figura 4.58 – Igreja do Monastério de Popăuți (Botoșani) – arco do nártex

Em estilo moldavo, o arco que dividia o átrio de entrada da nave da igreja apresentava já linha de trinca visível no seu exterior. A termografia identificou que tal linha continua não visível do lado oposto do arco e que refletia reforma anterior que veio a completar a estrutura, antes de menor dimensão. Além desta intervenção, confirmada pelos restauradores através dos registros históricos, o NDTE identificou uma segunda linha, possivelmente associada a fases diversas na criação do arco. Isto mereceu a atenção dos responsáveis pela recuperação do monumento a fim de evitar que nova trinca surgisse, sobretudo porque os trabalhos de restauro dos afrescos localizados na parte interna do arco encontram-se já concluídos.

Originalmente, a entrada principal da igreja localizava-se no setor norte do nártex. Em intervento ocorrido no início do século XX, esta entrada foi substituída por outra, localizada na direção sul (Sinigalia e Vetros, 2006). Através da termografia pôde-se identificar visualmente a primeira e localizar os materiais diferentes empregados no fechamento da porta, conforme visto na Figura 4.59.

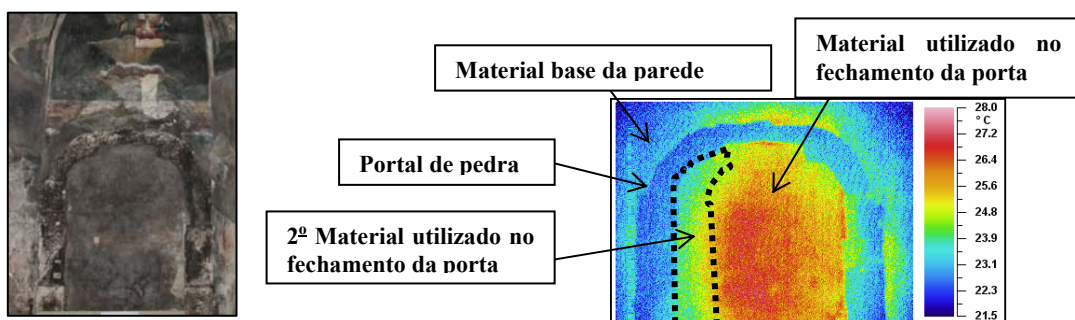


Figura 4.59 – Igreja do Monastério de Popăuți (Botoșani) – antiga entrada do nártex

Já a vibrometria, empregada no diagnóstico dos afrescos, confirmou os problemas já apontados pelos restauradores: grandes áreas de descolamentos que, senão tratadas com presteza, podem causar a perda total dos painéis. Os mapas RMS obtidos para dois afrescos e apresentados na Figura 4.60 vêm a confirmar estas informações, já que amplas áreas de maior velocidade de vibração, relacionadas, justamente, aos descolamentos, foram localizadas.

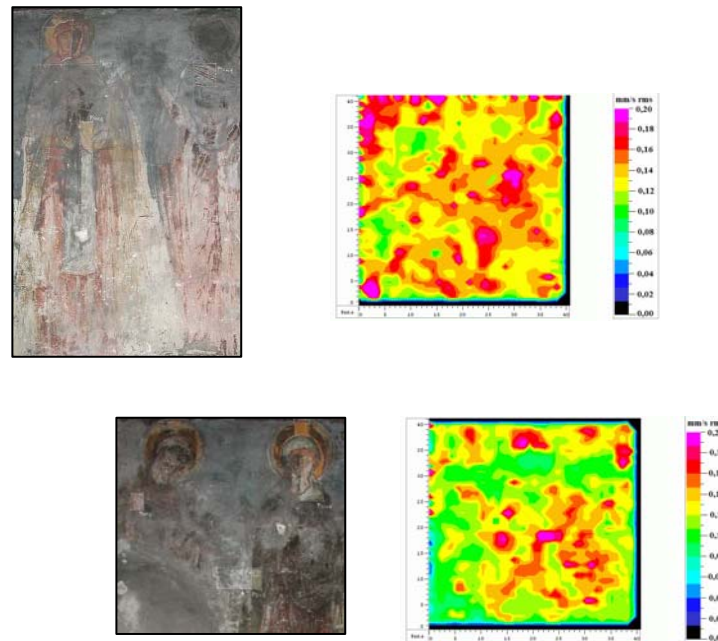


Figura 4.60 – Igreja do Monastério de Popăuți (Botoșani) – afrescos do nártex

4.3.3 – Igreja da Ressurreição (Monastério de Sucevița)

Os testes termográficos realizados no externo da igreja do Monastério de Sucevița revelaram estruturas não visíveis e ainda não identificadas por outras técnicas ou pelos restauradores. A mais interessante delas localizava-se sob os painéis da parede norte, analisados também pela vibrometria. Trata-se de uma pequena janela, recoberta por material de alvenaria. Esta ocorrência chamou muita atenção do pessoal que trabalhava na recuperação dos murais internos, localizados justamente sobre a tal janela. Vale ressaltar que, nem no projeto original, nem nos registros das modificações realizadas no local ao longo dos anos, vinha relatada qualquer informação relacionada à sua presença ou ao seu fechamento. Segundo os restauradores, pode-se tratar de um erro de execução, corrigido já pelos operários que ergueram a igreja ou corrigido posteriormente. Isto porque a presença destas pequenas janelas é extremamente simétrica ao longo da construção e esta estaria fora da tal simetria. A imagem termográfica que a identificou pode ser vista na Figura 4.61 juntamente com as fotos do local.

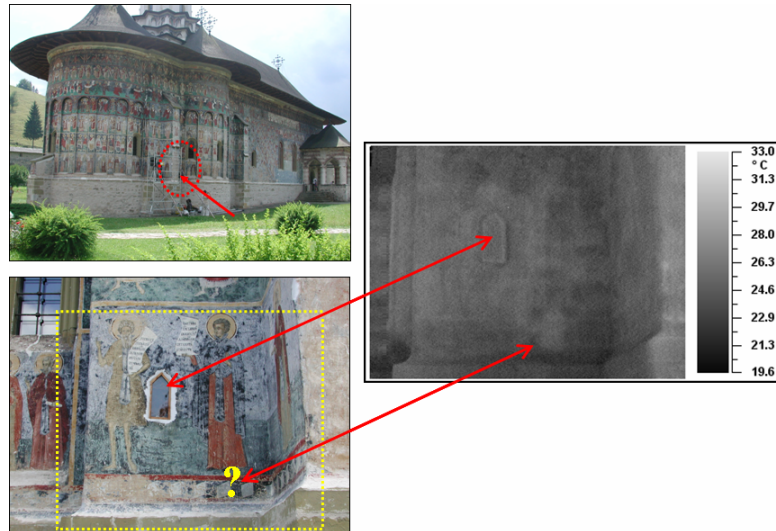


Figura 4.61 – Igreja da Ressurreição (Mosteiro de Sucevița) – afresco da parede norte avaliado pela termografia

Já na parede sul, foi possível identificar perfeitamente o material de base, constituído de tijolos de alvenaria, presente abaixo dos afrescos. A Figura 4.62 apresenta estes resultados.

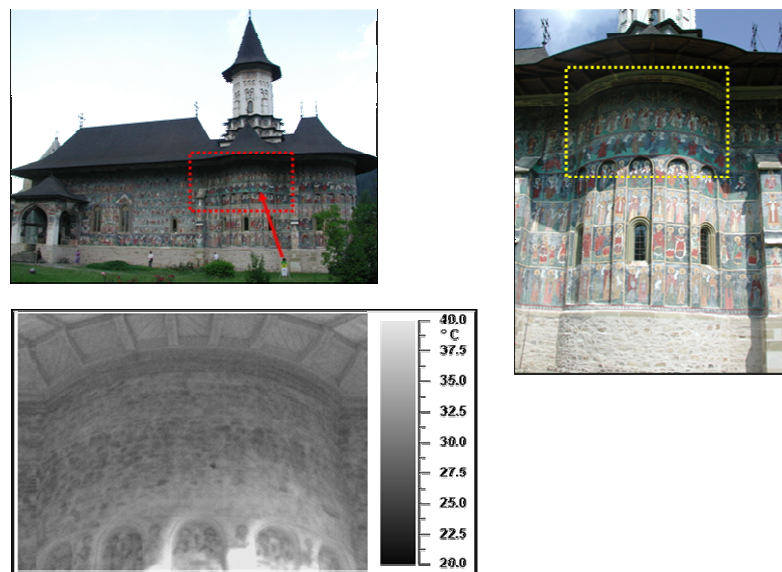


Figura 4.62 – Igreja da Ressurreição (Mosteiro de Sucevița) – parede sul avaliada pela termografia

Por estarem constantemente expostos a modificações climáticas e a intempéries, os afrescos externos presentes em Sucevița e típicos da região da Moldavia são mais sujeitos aos danos, merecendo atenção especial dos restauradores. Através da SLDV constatou-se que alguns dos afrescos externos da parede sul da Igreja da Ressurreição apresentavam tanto destacamentos difusos quanto localizados, conforme pode ser visto através dos mapas RMS obtidos e

apresentados na Figura 4.63. As fotos apresentam em destaque as áreas sobre as quais se focaram os estudos.

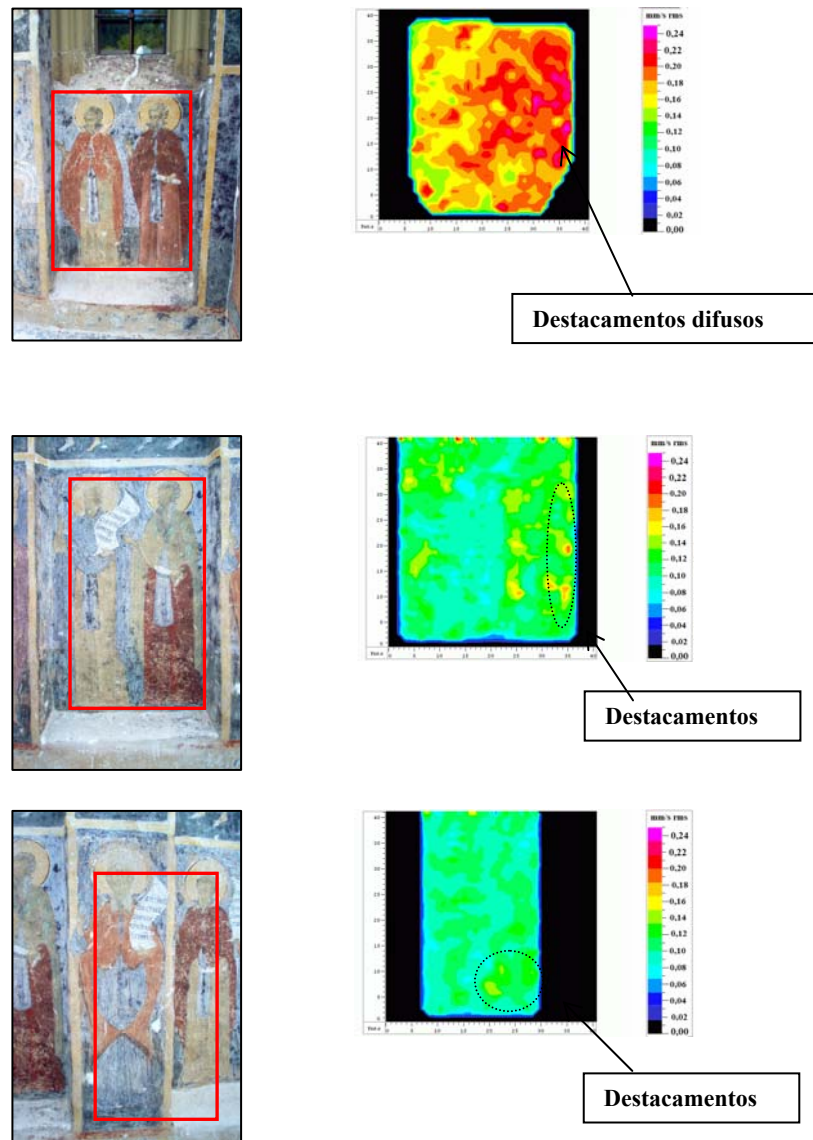


Figura 4.63 – Igreja da Ressurreição (Mosteiro de Sucevița) – afrescos da parede sul avaliados pela SLDV

Ao contrário dos afrescos externos, os painéis internos analisados apresentavam boas condições de conservação, apresentando destacamentos de dimensões mínimas. Por outro lado, foram constatados alguns problemas relacionados ao baixo sinal Doppler causado pela presença de ruídos na medição. Os resultados obtidos para dois painéis, localizados na câmara mortuária, podem ser vistos na Figura 4.64.

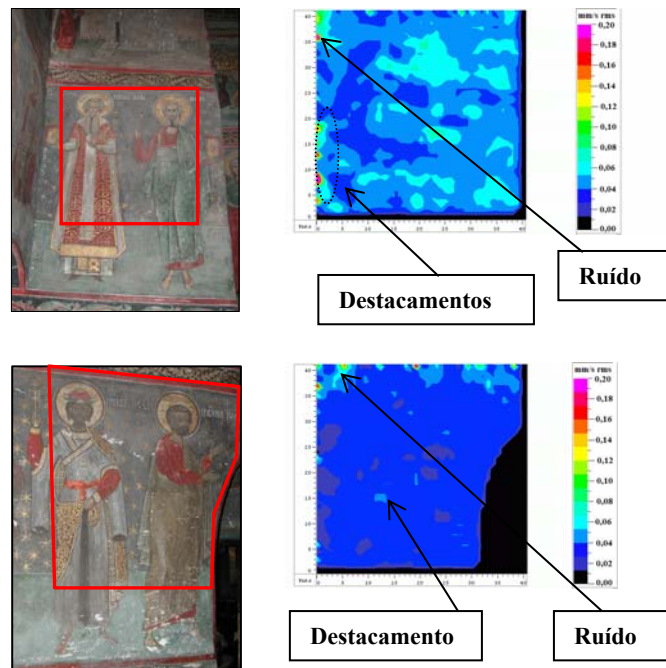


Figura 4.64 – Igreja da Ressurreição (Mosteiro de Sucevița) – afrescos internos (câmara mortuária) avaliados pela SLDV

Embora qualitativa, a avaliação *in situ* permitiu conferir o poder da termografia na identificação de estruturas não visíveis e, mesmo que não tenha sido utilizada preponderantemente no diagnóstico de descolamentos entre as camadas dos afrescos, função que coube á SLDV, foi possível identificar sua importância no programa de restauro, à medida que forneceu informações ainda desconhecidas aos restauradores, incrementando o conhecimento que se tinha até então das estruturas.

4.4 – CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos em laboratório, realizados no *Laboratorio di Misure Meccaniche e Termiche* do *Dipartimento di Meccanica* da *Università Politecnica delle Marche* – na cidade de Ancona, Itália, e dos ensaios *in situ*, realizados no norte da Romênia. A metodologia proposta para o diagnóstico de obras de arte através de ensaios térmicos não destrutivos foi implementada.

Em laboratório, foram utilizados conjuntos de amostras que reproduzem a estrutura e composição empregada na confecção de afrescos e obras sobre madeira. Tais amostras possuíam falhas internas simuladas de forma a representar descolamentos entre as camadas que as compõem.

Os resultados laboratoriais foram comparados com os obtidos através da solução numérica do modelo matemático desenvolvido e com as respostas fornecidas pela implementação da vibrometria laser Doppler que confirmou a presença de defeitos na mesma posição da apresentada pela termografia.

A intensidade e a homogeneidade da energia lançada sobre as peças, na forma de excitação térmica, foram controladas, a fim de que temperaturas superficiais, consideradas nocivas à manutenção da integridade das amostras, não fossem alcançadas. Por outro lado, a uniformidade do aquecimento evita falsos alarmes de irregularidades que podem estar relacionados a este fator.

Avaliaram-se os efeitos da adoção de valores incorretos para a emissividade superficial durante os ensaios termográficos. Os resultados demonstram que mesmo pequenas variações na especificação da variável podem acarretar em erros no registro da temperatura, em alguns casos, superiores à incerteza.

Os efeitos da adoção da emissividade média da superfície quando do ajuste da termocâmara foram, também, analisados. A concentração de cores mais fortes na superfície do primeiro conjunto de amostras elevou o valor da emissividade média, determinada em $0,78 \pm 0,01$. Porém, mesmo quando analisada a seção de P0 pintada em branco ($\varepsilon = 0,56 \pm 0,01$), as diferenças de temperatura registradas quando a emissividade efetiva da área foi utilizada em relação à quando se empregou a emissividade média obtida para toda a superfície da peça apresentavam-se próximas ou menores que a incerteza de medição, calculada em $1,3^\circ\text{C}$. Para o segundo conjunto de amostras, os valores de temperatura registrados para a seção da Échantillon 1 pintada em branco ($\varepsilon = 0,56 \pm 0,01$) em relação aos valores obtidos quando se utilizou a emissividade média de toda a superfície ($\varepsilon = 0,71 \pm 0,01$) foram inferiores aos limites da incerteza de medição que não ultrapassaram $1,3^\circ\text{C}$. Tais resultados validam, no caso de afrescos, o procedimento tradicional da adoção da média dos valores da emissividade no ajuste da termocâmara.

Para as amostras em madeira, a presença da camada de verniz e de douramento influenciou mais fortemente as respostas, pois tornaram a superfície mais refletiva, levando à diminuição da relação sinal-ruído. Isto fez com que as temperaturas registradas para a seção recoberta de verniz e pelo douramento em relação as temperaturas obtidas para a superfície opaca fossem próximas ou superiores à incerteza de medição calculada para cada caso. Aconselha-se, então, a utilização do procedimento padrão de adoção de valores médios para a emissividade durante

os ensaios e, posteriormente, durante o processamento dos dados, associarem a cada seção estudada, o efetivo valor da variável. Isto foi realizado neste estudo e corrigiu as variações no sinal de saída da termocâmara: foram registradas diferenças de temperatura entre os diversos setores menores que a incerteza de medição.

A termografia pulsada foi capaz de identificar, de forma segura, os defeitos nas obras em madeira, já que os diferenciais de temperatura entre as áreas com e sem falha apresentou-se, pelo menos, no momento do máximo contraste térmico, maior que a incerteza de medição. O mesmo ocorreu nos afrescos; porém, foi possível identificar apenas as falhas localizadas entre o arriccio e o intonaco. Os defeitos mais profundos, localizados entre a base e a camada de arriccio, embora em alguns casos visualmente perceptíveis, não foram bem caracterizados, uma vez que o diferencial de temperatura obtido para a área com defeito em relação à área íntegra apresentou-se nos limites ou inferiores à incerteza de medição. Nestes casos, a SLDV, sobretudo no seu modo *lock-in*, apresentou resultados mais concretos.

Por outro lado, a SLDV apresenta limitações quanto à identificação da profundidade e da espessura do defeito. Tal estimativa é muito mais fácil através da implementação da termografia modulada que, neste estudo, permitiu estimar a profundidade e espessura da falha através da relação existente entre a frequência de excitação e a difusividade térmica com o comprimento de difusão térmica.

Adicionalmente, os resultados da termografia pulsada e modulada em conjunto permitiram identificar a sobreposição dos defeitos presentes em algumas amostras. Em P3, por exemplo, o defeito começa a ficar perfeitamente reconhecível em frequências superiores a 0,045 Hz e o contraste térmico se perde em frequências abaixo de 0,002 Hz. A análise destes dados permitiu estimar que o início do defeito encontrava-se a, aproximadamente, 2,0 mm da superfície e se mantinha até quase 10,0 mm de profundidade. A questão é que falhas de espessura total igual a 8,0 mm gerariam diferenciais de temperatura mais altos daqueles registrados, além de já serem suficientes para provocar o descolamento total das camadas. Isto faz com que se possa afirmar que existe realmente uma sobreposição de defeitos. Seguindo o mesmo raciocínio, foi possível indicar a sobreposição das falhas nas demais amostras de afrescos, quando a ocorrência encontrava-se presente.

Em todos os casos apresentados, o modelo matemático validou as respostas experimentais. Daí, com o objetivo de prever a resposta da amostra que representava as camadas e técnicas de produção de um ícone Bizantino, caso verdadeiras falhas estivessem presentes, introduziu-

se no código FORTRAN[®] utilizado na solução do modelo matemático as características e posições de supostos descolamentos, de espessuras iguais a 0,5 mm, intercalados entre as camadas de base e tela e entre as camadas de tela e gesso. As falhas ficaram perfeitamente identificáveis quando utilizadas energias de excitação superiores a $1,8 \times 10^4$ J, já que a diferença de temperatura entre a área íntegra e as áreas com supostos descolamentos entre as camadas encontrava-se acima da incerteza de medição determinada em 1,3°C.

A aplicação de NDTE e da SLDV *in situ* permitiu a identificação de uma série de patologias presentes na alvenaria que constitui a Igreja de São Nicolau em Bălinești, a Igreja do Monastério Popăuți em Botoșani e a Igreja da Ressurreição localizada no interno dos muros do Monastério de Sucevița.

Este conjunto de informações permitiu validar a metodologia proposta.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma metodologia para a aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte onde são levados em consideração mecanismos de avaliação e redução de incertezas.

A metodologia proposta foi implementada nos ensaios laboratoriais realizados no *Laboratorio di Misure Meccaniche e Termiche* do *Dipartimento di Meccanica* da *Università Politecnica delle Marche* – Itália. Foram utilizados conjuntos de amostras, elaboradas por especialistas em restauração, que reproduzem a estrutura e composição dos materiais empregados na confecção de afrescos e obras sobre madeira. Falhas internas foram simuladas de forma a reproduzir reais descolamentos entre as camadas. Os resultados experimentais foram comparados com os obtidos através da solução numérica do modelo matemático desenvolvido e com as respostas fornecidas pela implementação da vibrometria laser Doppler.

A adoção de valores incorretos para a emissividade superficial pode gerar erros no registro da temperatura superiores à incerteza de medição. Isto justifica uma maior atenção que deve ser destinada a este fator quando do ajuste da termocâmera, já que diferenças nos valores de temperatura decodificados pelo sistema de medição, mesmo que pequenas, podem levar aos falsos alarmes de irregularidades.

No caso de afrescos, validou-se o procedimento tradicional da adoção da emissividade média da superfície no ajuste da termocâmera. Isto porque as diferenças de temperatura apresentavam-se próximas ou menores que a incerteza máxima calculada quando se utilizou a emissividade efetiva presente no setor para as áreas recobertas por cada um dos pigmentos em relação à quando se empregou, no ajuste do sistema de medição, a emissividade média obtida para toda a superfície da peça.

Já para superfícies com presença de camadas de verniz e/ou douramento aconselha-se a utilização do procedimento padrão de adoção de valores médios para a emissividade durante os ensaios (ajuste do sistema de medição) e, posteriormente, durante o processamento dos dados, associar a cada seção estudada, o efetivo valor da variável. A presença destas substâncias, utilizadas extensivamente em obras sobre madeira, tornam a superfície mais refletiva, levando à diminuição da relação sinal-ruído. Isto faz com que as temperaturas registradas para as seções recobertas de verniz e pelo douramento em relação àquela opaca possam apresentar, como neste estudo, diferenças próximas ou superiores à incerteza de medição calculada.

Para as amostras em afrescos, a termografia pulsada foi capaz de identificar de forma segura os defeitos localizados entre o arriccio e o intonaco uma vez que, em todos os casos, diferenças de temperatura entre as áreas com e sem defeito duas vezes maior que a incerteza de medição foram obtidas, pelo menos, no momento do máximo contraste térmico. Para as amostras em madeira foi possível identificar claramente o defeito incluso entre as camadas de base e acabamento. No caso da amostra que representava as camadas e técnicas de produção de um ícone Bizantino, as falhas simuladas no modelo teórico ficaram perfeitamente identificáveis quando utilizadas energias excitação superiores a $1,8 \times 10^4$ J, já que a diferença de temperatura entre a área íntegra e as áreas com supostos descolamentos entre as camadas encontrava-se acima da incerteza de medição experimental.

A aplicação da termografia modulada permitiu, além da identificação do defeito, estimar a sua profundidade, correlacionando a frequência de excitação e a difusividade térmica com o comprimento de difusão térmica.

No caso da vibrometria é interessante salientar que existe uma relação entre a frequência de ressonância do defeito e a sua profundidade: defeitos mais profundos vibram em frequências mais altas. Mas também é verdade que defeitos de menores dimensões tendem a apresentar frequências de vibração superiores. Isto acaba gerando dúvidas e dificultando o diagnóstico através da vibrometria no que diz respeito à profundidade da falha. De qualquer forma, é possível estimar a profundidade do defeito na estrutura através da SLDV, porém, o procedimento de cálculo é complicado, e exige uma coleta preliminar de dados a fim de que se forme um conjunto de informações que permita, através de técnicas auxiliares, comparar os materiais envolvidos e as velocidades de vibração medidas com o aspecto dimensional da falha. No caso da termografia, o procedimento é muito mais simples.

Por outro lado, defeitos mais profundos, localizados entre a base e a camada de arriccio, embora, em alguns casos, tenham sido visualmente perceptíveis, não foram bem caracterizados pela termografia, uma vez que o diferencial de temperatura obtido para a área com defeito em relação à área íntegra apresentou-se nos limites ou mesmo inferiores à incerteza de medição. Nestes casos, a SLDV, sobretudo no seu modo *lock-in* apresentou resultados mais concretos.

A SLDV, por sua vez, foi mais eficaz na localização de defeitos mais profundos, porém, apresenta ainda limitações no sentido de identificar defeitos sobrepostos. Mesmo quando da aplicação da transformada de Fourier, com fins à aplicação da vibrometria em modo *lock-in*, a

influência do defeito mais superficial sobre os resultados se sobrepôs à do defeito mais profundo, que não foi nem mesmo percebido. Já a análise dos resultados da termografia pulsada e modulada em conjunto permitiu identificar a sobreposição.

Já o modelo matemático validou, em todos os casos, os dados experimentais, constituindo ferramenta valiosa para previsão das respostas fornecidas por sistemas termográficos.

A termografia modulada identificou a profundidade e a espessura da falha e o modelo matemático validou as respostas experimentais. A aplicação da SLDV levou a resultados semelhantes aos obtidos pela termografia. Neste caso, a excitação utilizando-se o PZT maximizou as respostas.

A aplicação de NDTE e da SLDV *in situ*, onde se analisou ocorrências específicas em três mosteiros ortodoxos localizadas no norte da Romênia, veio complementar este estudo. A análise através da termografia admitiu, por requisição dos restauradores, um escopo mais qualitativo que propriamente quantitativo. Através dela foi possível identificar presença de umidade, estruturas não visíveis, inclusões não aparentes, materiais de origens diversas, alguns destacamentos das camadas superficiais e características da alvenaria que constitui a Igreja de São Nicolau em Bălinești, a Igreja do Monastério Popăuți em Botoșani e a Igreja da Ressurreição localizada no interno dos muros do Monastério de Sucevița. Já a SLDV foi capaz de identificar descolamentos nos afrescos internos e externos presentes nos locais.

Embora a metodologia proposta colabore na medida em que confere aos resultados confiabilidade metrológica que permita uma análise mais consistente do monumento e dos problemas que, por ventura, possa apresentar, em momento algum, teve-se a intenção que este estudo desvalorizasse o trabalho dos antigos restauradores na fase de diagnóstico. Ao contrário, o elemento humano é essencial e insubstituível na análise e a sua ausência faz com que qualquer método, por mais sofisticado que seja, torna-se inútil quando operado por avaliador inexperiente.

Ainda no sentido de ampliar as possibilidades de implementação da termografia como ferramenta de diagnóstico, sugere-se alguns estudos que trariam contribuições relevantes ao setor. São eles:

- a análise comparativa entre a incerteza de medição e a tolerância característica de problemas como descolamentos entre as camadas de afrescos e obras sobre madeira. Tal tolerância é tida como o menor diferencial de temperatura superficial gerado entre uma

área íntegra e uma área com a menor falha indicada pelos especialistas em restauração como característica da existência de problemas;

- adequação e aplicação da metodologia desenvolvida para a avaliação da integridade de obras de arte à realidade mineira e brasileira;
- otimização da avaliação de incerteza de medição em imagens termográficas através da análise pixel a pixel do termograma e da identificação e quantificação de novas fontes de incerteza;
- adequação e aplicação da metodologia desenvolvida para o diagnóstico em outros setores como o da construção civil e elétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, A. K., Gill, A. S., Ek, J. R., Nelson, R. A., “*Contribution of conduction to total infant energy expenditure*”, *Journal of Thermal Biology*, vol. 23, pp. 267-272, 1998.
- Andrade, R. M., “*Tecniche di misura non invasiva per il controllo di processo e di qualità nella produzione ceramica*”, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Ancona, 1999.
- ASTM standard E 1213-92, “*Standard test for minimum resolvable temperature difference for thermal imaging systems*”, 1992.
- ASTM standard E 1311-89, “*Standard test for minimum detectable temperature difference for thermal imaging systems*”, 1989.
- ASTM standard E 154313-94, “*Standard test for noise equivalent temperature difference of thermal imaging systems*”, 1994.
- Avdelidis, N. P., Meropoulou, A., “*Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures*”, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 5, pp. 119-127, 2004.
- Balaras, C. A., Argiriou, A. A., “*Infrared thermography for building diagnostics*”, *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 171-183, 2002.
- Boras, I., Svaic, S., “*Determination of the Defect Parameters in Specimen by Means of Thermography and Numerical Methods*”, *Proceedings of SPIE*, vol. 3396, 1998.
- Busse, G., “*Nondestructive evaluation of polymer materials*”, *NDT&E International*, vol. 27, pp. 253-262, 1994.
- Busse, G., Wu, D., Karpen, W., “*Thermal wave imaging whit phase sensitive modulated thermography*” *Journal of Applied Physics*, vol. 71, no. 8, pp. 3962-3965, 1992.
- Can, M., “*Simultaneous convective heat and mass transfer in impingement ink drying*”, *International Comm Heat Mass Transfer*, vol. 25, n^o 6, pp. 863-874, 1998.
- Carlomagno, G. M., Meola, C., “*Comparison between thermographic techniques for frescoes NDT*”, *NDT&E International*, vol. 35, pp. 559-565, 2002.
- Carlomagno, G. M., Meola, C., “*Infrared thermography in the restoration of cultural properties*”, *Conference 4360 Thermosense XXIII Proceedings of SPIE*, vol. 4360, 2001.
- Casadio, F., Toniolo, L., “*The analysis of polychrome works of art: 40 years of infrared spectroscopic investigations*”, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 2, pp 71-78, 2001.
- Castellini, P., Esposito, E., Paone, N., Tomasini, E. P., “*Conservation of frescoes paintings and icons; non-invasive measurement of damage by a laser scanning vibrometer*”, *SPIE – The International Society for Optical Engineering*, vol.3396, 1998.
- Castellini, P., Paone, N., Tomasini, E. P., “*A laser based measurement technique for the diagnostics of detachment in frescoes and wooden works of art*”, oral presentation, LACONA II, 2nd International Conference on Lasers in the Conservation of Artworks, Liverpool (UK), 1997.
- Cennini, C., “*Il libro dell’Arte*”, Neri Pozza Editore, Vicenza, Italy, 1982.

- Cesareo, R., “*Non-destructive EDXRF-analysis of the golden haloes of Giotto’s frescoes in the Chapel of the Scrovegni in Padua*”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B211, pp. 133-137, 2003.
- Cesareo, R., Castellano, A., Buccolieri, G., Quarta, S., Marabelli, M., Santopadre, P., Leole, M., Brunetti, A., “*Portable equipment for energy dispersive X-ray fluorescence analysis on Giotto’s frescoes in the Chapel of the Scrovegni*”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B 213, pp. 703-706, 2004.
- Chrzanowski, K., “*Evaluation of thermal cameras in quality systems according to ISO 9000 or EN45000 Standards*”, Proceedings of SPIE, vol. 4360, pp. 387-401, 2001a.
- Chrzanowski, K., “*Influence of measurement conditions and system parameters on accuracy of remote temperature measurement whit dualspectral IR systems*”, Infrared Physics & Technology, vol. 37, pp. 295-306, 1996.
- Chrzanowski, K., “*Non-contact thermometry – measurement errors*”, Research & Development Treatises, vol. 7, Polish Chapter of SPIE, Warsaw, 2001b.
- Chrzanowski, K., Fischer, J., Matyszekiel, R., “*Testing and evaluation of thermal cameras for absolute temperature measurement*”, Journal of Optical Engineering vol. 39, no 9, pp. 2535-2544, 2000.
- Chrzanowski, K., Fischer, J., Matyszekiel, R., Barela, J., “*Evaluation of uncertainty of temperature measurement whit thermal cameras*”, Journal of Optical Engineering vol. 40, no 6, 2001.
- Chrzanowski, K., Jankiewicz, Z., “*A method for influence correction of radiation emitted by filters on MIR dualspectral pyrometers accuracy*”, Infrared Physics & Technology, vol. 37, pp. 221-229, 1996.
- Chrzanowski, K., Park, S. N., “*Evaluation of thermal cameras for non-destructive thermal testing applications*”, Infrared Physics & Technology, vol. 42, pp. 101-105, 2001.
- Chrzanowski, K., Szulim, M., “*A measure of influence of detector noise on temperature measurement accuracy whit IR systems*”, Applied Optical, vol. 37, pp 5051-5057, 1998.
- Ciliberto, A., Cavaccini, G., Salvetti, O., Chimenti, M., Azzarelli, L., Bison, P. G., Marinetti, S., Freda, A., Grinzato, E., “*Porosity detection in composite aeronautical structures*”, Infrared Physics & Technology, vol. 43, pp. 139-143, 2002.
- 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, vol.36, pp. 265-275, 2003.
- Cushman, R. J., “*Film-type infrared photonconductors*”, Proceedings IRE, vol. 47, pp.1471-1475, 1959.
- Darabi, A., Maldague, X., “*Neural network based defect detection and depth estimation in TNDE*”, NDT&E International, vol. 35, pp. 165-175, 2002.
- Del Conte, A., Tavares, S. G., Esposito, E., Andrade, R. M., “*Infrared thermographic investigation of Basilica della Salute floor*”, in publication, 2006.

- Dowling, M. J., Kinsella, T. E., Bartels, K. A., Light, G. M., “*Radiographic image processing for industrial applications*”, Proceedings of SPIE, vol. 3396, 1998.
- Engelbert, P. J., Hotchkiss, R. H., Kelly, W. E., “*Integrated remote sensing and geophysical techniques for locating canal seepage in Nebraska*”, Journal of Applied Geophysics, vol. 38, pp. 143-154, 1997.
- Esposito, E., “*Sistemi d’indagine e tecniche di misura non distruttive applicati alla diagnostica dello stato di conservazione delle opere d’arte*”, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Ancona, 2002.
- Feligiotti, M., “*Sviluppo di modelli numerici per la simulazione di difettosità in beni artistici e verifica sperimentale*”, Tesi di Laurea, Università Politecnica delle Marche, 2004.
- Giorleo, G., Meola C., “*Comparison between pulsed and modulated thermography in glass-epoxy laminates*”, NDT&E International, vol. 35, pp. 287-292, 2002.
- Grinzato, E., “*Stato dell’Arte sulle tecniche termografiche per il controllo non distruttivo e principali applicazioni*”, Conferenza Nazionale PND-MD, Associazione Italiana Prove non Distruttive, vol. 1, 1997.
- Grinzato, E., Bison, P. G., Bressan, C., Mazzolidi, A., “*NDE of frescoes by infrared thermography and lateral heating*”, QIRT 98, D. Balageas, G. Busse and G. M. Carlomagno Eds. EETI editions pp. 64-70, 1998.
- Grinzato, E., Bison, P. G., Marinetti S., “*Monitoring of ancient buildings by thermal method*”, Journal of Cultural Heritage, vol. 3, pp. 21-29, 2002.
- Grinzato, E., Bressan, C., Marinetti, S., Bison, P. G., Bonacina, C., “*Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared*”, Infrared Physics & Technology, vol. 43, pp. 165-169, 2002a.
- Grinzato, E., Marinetti, S., Vavilov, V., Bison, P. G., “*Non-destructive testing of wooden painting by IR thermography*”, 8th ECNDT, Barcelona, España, 2002b.
- Grinzato E., Rosina E., “*Infrared and Thermal Testing for Conservation of Historic Building*”, Chapter 18, Part 5, Non Destructive Handbook, third edition, vol. 3, Infrared and Thermal Testing, ASNT Columbus (OH) USA., 2001.
- Grinzato, E., Rosina, E., Vavilov, V., Grimoldi, A., Di Flumeri, E., Papetti, V., Roche, G., “*Capturing the building history by quantitative IR thermography*”, 2001.
- “*Guide to the expression of uncertainty in measurement*”, International Organization for Standardization - International Electrotechnical Commission, International Organization of Legal Metrology-International, Bureau of Weights and Measures, TAG 4/WG 3, 1993.
- Haller, E. E., “*Advanced far-infrared detectors*”, Infrared Physics & Technology, vol. 35, No 2/3, pp. 127-146, 1994.
- Herschel, W., “*Experiments of the invisible rays of the sun*”, Philos. Trans. of Royal Society, London 90 (1800) 284, 1800.
- Horny, N., “*FPA camera standardization*”, Infrared Physics & Technology, vol. 44, 2003.

- Inagaki, T., Ishii, T., Iwamoto, T., “*On the NDT and E for the diagnosis of defects using infrared thermography*”, NDT&E, vol. 32, pp. 247-257, 1999.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., “*Fundamentals of heat and mass transfer*”, Fifth edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2003.
- Kozlowski, L. J., Vural, K., Arias, J. M., Tennant, W. E., DeWames, R. E., “*Performance of HgCdTe, InGaAs and quantum well GaAs/AlGaAs staring infrared focal plane arrays*”, Proceedings of SPIE 3182, pp 2-13, 1997.
- Krapels, K., Driggers, R., Vollmerhausen, R., Halford, C., “*Minimum resolvable temperature difference (MRTD) procedure improvements and dynamic MRTD*”, Infrared Physics & Technology, vol. 43, pp. 17-31, 2002.
- Krapez, J. C., Balageas, D., Deom, A., Lepoutre, F., “*Early detection by stimulated infrared thermography. Comparison whit ultrasonics and holo/shearography*”, Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Material, Ed. X. Maldague, Nato ASI Series E., Kluwer Academic Publishers, vol. 262, pp. 303-321, 1994.
- Kruse, P. W., McGlauchlin, L. D., McQuistan, R. B., “*Elements of infrared technology*”, Wiley, New York, 1962.
- Luong, M. P., “*Infrared thermographic scanning of fatigue in metals*”, Nuclear Engineering and Design, vol. 158, pp. 363-376, 1995.
- Maldague, X., “*Applications of infrared thermography in non destructive evaluation*”, Trends in Optical Nondestructive Testing (invited chapter), Pramod Rastogi Ed., pp. 591- 609, 2000.
- Maldague, X., “*Introduction to NDT by active infrared thermography*”, Materials Evaluation, vol. 6, pp. 1060-1073, 2002.
- Maldague, X., Largouët, Y., Couturie, J., “*A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography: modeling, noise, experiments*”, Ver. Gén, Therm, vol. 37, pp. 704-717, 1998.
- Maldague, X., Marinetti, S., “*Advances in pulse phase infrared thermography*”, Infrared Physics & Technology, vol. 43, pp. 175-181, 2002.
- Maldague, X., Marinetti, S., “*Pulse phase infrared thermography*”, Journal App. Phys., vol. 79, pp. 2694-2698, 1996.
- Mecca, F. J. M., Sanchez, F. J. R., Sanchez, P. M., “*Calculation and optimization of the maximum uncertainty in infrared temperature measurements taken in conditions of high uncertainty in the emissivity and environment radiation values*”, Infrared Physics & Technology, vol. 43, pp. 345-351, 2002.
- Meinlschmidt, P., Bothe, T., Hinsch, K., Mehlhorn, L., “*Nondestructive Testing and Evaluation of Historical Monuments Using Thermography and Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI)*”, Proceedings of SPIE, vol. 3396, 1998.
- Meola, C., Carlomagno, G. M., “*Geometrical limitation to detection of defects in composites by means of infrared thermography*”, Journal of Nondestructive Evaluation, 2004a.

- Meola, C., Carlomagno, G. M., “*Recent advances in the use of infrared thermography*”, Measurement Science Technology, vol. 15, pp. R24-R58, 2004b.
- Meola, C., Carlomagno, G. M., Giorleo, L., “*The use of infrared thermography for materials characterization*”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 155-156, pp. 1132-1137, 2004.
- Mikina, W., Dudzik, S., “*Simulation analysis of uncertainty of infrared camera measurement and processing path*” Measurement, vol. 39, pp. 758-763, 2006.
- Military standard MIL-I-24689 (SH), “*Infrared thermal imaging systems*”, Department of Defense, 1988.
- Military standard MIL-STD-1859, “*Thermal imaging devices, performance of parameters*”, U. S. Department of Defense, 1989.
- Military standard MIL-STV-2194, “*Infrared thermal imaging survey producer for electrical equipment*”, U. S. Department of Defense, 1992.
- Military standard MIL-T-49381 Test set “*Thermal sight TS-3681/VSG*” USAERADCOM, 1980.
- Minelli, E., Veratti, A. B., “*A termografia aplicada à eficiência energética de plantas geradoras*”, www.termonautas.com.br, consultado em Maio de 2004.
- Patankar, S. V., “*Computation of Conduction and Duct Flow Heat Transfer*” Innovative Research, Inc., 7846 Ithaca Lane North, Maple Grove, MN 55369-8549, USA, 1991.
- Patankar, S. V., “*Numerical heat transfer and fluid flow*”, Hemisphere Publishing Corporation, McGraw-Hill Book co., Washington, USA, 1980.
- Pilla, M., Maldague, X., Klein, M., “*IR View Copyright (C)*”, Free Software Foundation, Inc., Boston, MA, USA, 2003.
- Progetto LASERACT “*Laser multitask non-destructive technology in conservation diagnostic procedures*” contract EVK4-CT-2002-00096, Energy, Environment and Sustainable Development - EESD programme of the Research DG, 2002 – 2005.
- Progetto LASERART “*Non-intrusive laser measurement techniques for diagnostics of the state of conservation of frescoes, paintings and wooden icons*” SMT Programme, IV FP, SMT4962062, 1996 – 2000.
- “*Projeto 02:135.07-001/2 – Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*”, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.
- Rainieri, S., Pagliarini, G., “*Data processing technique applied to the calibration of a high performance FPA infrared camera*”, Infrared Physics & Technology, vol. 43, pp. 345-351, 2002.
- Rogalski, A. “*New trends in infrared detector technology*”, Infrared Physics & Technology, vol. 35, no. 1, pp. 1-21, 1994.

- Rogalski, A., *"Infrared detectors"*, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 2000.
- Rogalski, A., *"Infrared detectors: an overview"*, *Infrared Physics & Technology*, vol. 43, pp. 187-210, 2002.
- Rosina, E., Grinzato, E., *"Infrared and thermal testing for conservation of historic Buildings"*, *American Society for Nondestructive Testing Journal*, vol. 59, No 8, 2001.
- Saintey, M. B., Almond, D. P., *"An artificial neural network interpreter for transient thermography image data"* *NDT&E International*, vol. 30, no. 5, pp. 291-295, 1997.
- Sakagami, T., Kubo, S., *"Applications of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative nondestructive evaluations"*, *Infrared Physics & Technology*, vol. 43, pp. 211-218, 2002.
- Sampath, S. G., *"National aging aircraft research program"*, *International Conference on Nondestructive Inspection AAAF Proceedings*, Paris, 1991.
- Sanor, S., *"Cost/Benefit analysis of infrared programs"*, *Maintenance Technology Magazine*, July, 2001.
- "Saving Sacred Relics of European Medieval Cultural Heritage"*, European Commission, Directorate General for Education and Culture, CULTURE 2000 Program, <http://inoe.inoe.ro/moldavia>, 2006.
- Silva, N.S., Carvalho, H. G., Tavares, S. G., Andrade, R. M., *"Metodologia para ensaios térmicos não destrutivos aplicados a equipamentos elétricos energizados"*, *Anais do 7º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica*, México D.F., 12 al 14 de Octubre, 2005.
- Sinigalia, T., Vretos, A., *"CD Saving Sacred Relics of European Medieval Cultural Heritage"*, European Commission, Directorate General for Education and Culture, CULTURE 2000 Program, 2006.
- Talwar, D. N., Jogai, B., Loehr, J. P., *"Novel type II strained layer superlattices for long wavelength infrared detectors"*, *Mater Science Engineering*, vol. B51, pp. 12-17, 1998.
- Tavares, S. G., Agnani, A., Esposito, E., Feligiotti, M., Rocchi, S., Andrade, R. M., *"Comparative study between infrared thermography and laser Doppler vibrometry applied to frescoes diagnostic"*, *Proceedings of QIRT 2006*, Padova, 27-29 June, 2006.
- Tavares, S. G., Andrade, R. M., *"Metodologia de aplicação da termografia na avaliação da integridade estrutural de obras de arte"*, *Anais do III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – COBEM 2004*, Belém, PA, Brasil, 2004.
- Tavares, S. G., Andrade, R. M., *"Metodologia de ensaio e análise de incerteza na aplicação da termografia"*, *Anais do III Congresso Brasileiro de Metrologia*, Recife, PB, Brasil, 2003.
- Tavares, S. G., Cunha, A. M., Andrade, R. M., *"Ensaio térmico não destrutivo para avaliação de defeitos e inclusões não aparentes em materiais"*, *Anais do 7º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica*, México D.F., 12 al 14 de Octubre, 2005a.
- Tavares, S. G., Cunha, A.M., Andrade, R. M., *"Theoretical and experimental study of heat*

diffusion in structures whit internal flaws”, Anais do 18th International Congress of Mechanical Engineering, 6-11 November , Ouro Preto, MG, Brasil, 2005b.

Tavukçuoğlu A., Düzgünes, A., Caner-Saltik, E. N., Demirci, Ş., “*Use of IR thermography for the assessment of surface-water drainage problems in a historical building, Ağzikarkarahan (Aksaray), Turkey*”, NDT&E International, vol. 38, pp. 402-410, 2005.

The Grund Company Inc., “*Material data sheet – Melinex Polyester Film Type 226*”, St Lous, Missouri, 2006.

Titman, D. J., “*Applications of thermography in non-destructive testing of structures*”, NDT&E International, vol. 34, pp. 149-154, 2001.

Vallerand, S., Maldague, X., “*Defect characterization in pulsed thermography: a statistical method compared whit Kohonen and Perceptron neural networks*” NDT&E Internacional, vol. 33, pp. 307-315, 2000.

Vavilov, V. P., “*A termografia na Rússia*”, Manutenção y Qualidade, Novo Polo Publicações e Assessoria Ltda, edição 42, ano 9, 2002.

Veratti, A. B., “*A Revolução Infravermelha*”, www.termonautas.com.br/art21.asp, consultado em Dezembro de 2003.

Vieira, L. R., “*A termografia na análise de patologias da coluna vertebral*”, www.termonautas.com.br, consultado em Maio de 2005.

“*VPI 4000 Scanning Laser Vibrometer Operator’s Manual*”, Ometron, Sterling, VA, July 1997.

Wiggenhauser, H., “*Active IR-applications in Civil Engineering*”, *Infrared Physics & Technology*, vol. 43, pp. 233-238, 2002.

Willemann, D. P., “*Enhanced Measurement Methodology for Damage Detection in Composite Materials by Laser Doppler Vibrometry*”, Tesi di Dottorato, Università Politecnica delle Marche, 2005.

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 NDT, vol. 22, May 1980.

Wolfe, N. L., Zissis, G., “*The infrared handbook*”, Office of Naval Research, Department of Bavy, 1978.

Wu, D., Busse, G., “*Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials*”, Ver. Gén. Therm., vol. 37, pp. 693-703, 1998.

Zweschper, Th., Dillenz, A., Riegert, G., Busse, G., “*Lockin Thermography methods for NDT of aircraft components*”, Proceedings of the NDE Workshop, Cape Town, April, 2002.

ANEXO I

Trecho do Livro “*Le vite de’ più eccellenti pittori, scultori et architettori*” descrendo a técnica de produção de afrescos (Fegliotti, 2004).

“Del dipingere in muro: come si fa e perchè si chiama lavorare in fresco. Di tutti gli altri modi che i pittori faccino, il dipingere in muro è più maestrevole e bello, perchè consiste nel fare in un giorno solo quello che nelli altri modi si può in molti ritoccare sopra il lavorato. Era dagli antichi molto usato il fresco, et i vecchi moderni ancora l’hanno poi seguitato. Questo si lavora sulla calce che sia fresca, né la si lascia mai sino a che sia finito quanto per quel giorno si vuol lavorare. Perchè allungando punto il dipingerla, fa la calce una certa crosterella per caldo, pel freddo, pel vento e pe’ ghiacci, che muffa e macchia tutto il lavoro. E per questo vuole essere continovamente bagnato il muro che si dipigne, et i colori che vi si adoperano, tutti di terre e non di miniere, et il bianco di travertino, cotto. Vuole ancora una mano destra resoluta e veloce, ma sopra tutto un giudizio saldo et intero; perchè i colori, mentre che il muro è mole, mostrano una cosa in un modo, che poi in secco non è più quella. E però bisogna che in questi egli abbia per guida una pratica più grandissima, essendo sommamente difficile il condurlo a perfezione. Molti de’ nostri artefici vagliano assai negl’altri lavori, cioè a olio o a tempera, e in questo poi non riescono, per essere egli veramente il più virili, più sicuro, più risoluto e durabile di tutti gli altri modi, e quello che, nello stare fatto, di continuo acquista di bellezza e di unione più degli altri infinitamente. Questo all’aria si purga, e dall’acqua si difende, e regge di continuo ad ogni percossa. Ma bisogna guardarsi di non avere a ritoccarlo co’ colori che abbiano colla di carnicci, o rosso d’uovo o gomma o draganti come fanno molti pittori; perchè, oltre che il muro non fa il suo corso di mostrare la chiarezza, vengono i colori apannati da quello ritoccar di sopra, e con poco spazio di tempo diventano neri. Però quello che cercano lavorar in muro, lavorino virilmente a fresco, e non ritocchino a secco; perché, oltre l’esser cosa vivissima, rende più corta la vita alle pitture, come in ogni altro luogo s’è detto.”

Giorgio Vasari, Firenze, 1550

ANEXO II

Tabela A.II.1 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P0

$$(d_{\text{termoc. amostra}} = 0,50 \text{ m})$$

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	6,252	°C	0,023	11
Temperatura	0,2	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,291	–	0,026	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	46,291	°C	0,144	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,569	12,61
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,78$; $T = 24,6 \text{ °C}$; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.2 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P0

$$(d_{\text{termoc. amostra}} = 0,66 \text{ m})$$

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	5,025	°C	0,019	11
Temperatura	0,1	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,289	–	0,019	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	45,455	°C	0,142	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,568	12,52
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,78$; $T_{\text{ba}} = 22,9 \text{ °C}$; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.3 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P0

(Q = $1,4 \times 10^4$ J; $d_{\text{termoc. amostra}} = 0,50$ m)

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	3,788	°C	0,014	11
Temperatura	0,2	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,287	–	0,033	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	45,180	°C	0,141	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,569	12,55
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,78$; $T = 24,2$ °C; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.4 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P0

(variação da emissividade; Q = $2,8 \times 10^4$ J; $d_{\text{termoc. amostra}} = 0,50$ m)

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	8,670	°C	0,033	11
Temperatura	0,2	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,295	–	0,026	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	47,395	°C	0,148	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,571	12,7
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,78$; $T = 24,6$ °C; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.5 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P0

(efeito das cores; $Q = 2,8 \times 10^4$ J; $d_{\text{termoc. amostra}} = 0,50$ m)

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	6,252	°C	0,023	11
Temperatura	0,2	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,291	–	0,026	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	46,291	°C	0,144	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,569	12,61
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,78$; $T = 24,6$ °C; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.6 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P2

(Q = 2,8 x 10⁴ J; d_{termoc. amostra} = 0,50 m)

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	7,467	°C	0,028	11
Temperatura	0,1	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,293	–	0,023	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	46,844	°C	0,146	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,570	12,66
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,78$; $T = 24,6$ °C; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.7 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P2

$$(Q = 1,4 \times 10^4 \text{ J})$$

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	5,025	°C	0,019	11
Temperatura	0,2	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,289	–	0,025	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	45,737	°C	0,142	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,569	12,56
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,78$; $T = 24,8 \text{ °C}$; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.8 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P2

$$(Q = 2,8 \times 10^4 \text{ J}; d_{\text{termoc. amostra}} = 0,66 \text{ m})$$

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	7,465	°C	0,028	11
Temperatura	0,1	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,293	–	0,015	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	46,561	°C	0,145	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,569	12,61
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,78$; $T = 23,0 \text{ °C}$; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.9 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P2
(termografia modulada)

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	8,670	°C	0,033	11
Temperatura	0,1	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,295	–	0,024	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	47,395	°C	0,148	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,570	12,72
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,78$; $T = 24,6$ °C; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.10 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P3
($Q = 2,4 \times 10^4$ J; $d_{\text{termoc.}_\text{amostra}} = 0,50$ m)

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	8,670	°C	0,033	11
Temperatura	0,1	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,295	–	0,024	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	47,395	°C	0,148	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,571	12,72
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,78$; $T = 24,6$ °C; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.11 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P1

(Q = 5,6 x 10⁴ J; d_{termoc._amostra} = 0,55 m)

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	5,026	°C	0,019	11
Temperatura	0,1	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,289	–	0,024	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	45,737	°C	0,142	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,569	12,55
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,78$; T = 27,9 °C; $\tau = 0,99$

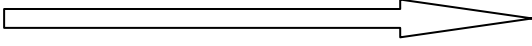
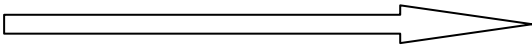
Tabela A.II.12 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra P1

(termografia modulada)

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	15,671	°C	0,059	11
Temperatura	0,1	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,306	–	0,025	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	50,669	°C	0,158	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,576	13,14
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

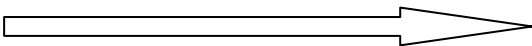
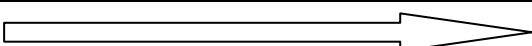
Média das indicações: $\varepsilon = 0,78$; T = 24,6 °C; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.13 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Échantillon 1
(efeito das cores; $Q = 2,8 \times 10^4$ J; $d_{\text{termoc.}_\text{amostra}} = 1,00$ m)

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	15,939	°C	0,047	11
Temperatura	0,0	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,441	–	0,010	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	42,601	°C	0,133	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,568	12,46
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,71$; $T = 20,9$ °C; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.14 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Échantillon 1
($Q = 2,8 \times 10^4$ J; $d_{\text{termoc.}_\text{amostra}} = 1,00$ m)

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	15,939	°C	0,047	11
Temperatura	0,0	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,441	–	0,010	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	42,601	°C	0,133	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,568	12,46
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

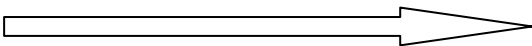
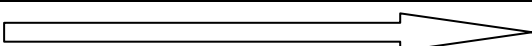
Média das indicações: $\varepsilon = 0,71$; $T = 20,9$ °C; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.15 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Échantillon 1
(termografia modulada)

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	12,121	°C	0,036	11
Temperatura	0,0	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,443	–	0,010	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	40,780	°C	0,127	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,565	12,28
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,2	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,71$; $T = 20,9$ °C; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.16 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Échantillon 4
($Q = 1,7 \times 10^4$ J; $d_{\text{termoc.}_\text{amostra}} = 1,00$ m)

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	12,121	°C	0,036	11
Temperatura	0,1	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,433	–	0,025	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	40,780	°C	0,127	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,566	12,33
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,2	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,71$; $T = 20,9$ °C; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.17 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Échantillon 4
(termografia modulada)

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	9,517	°C	0,028	11
Temperatura	0,1	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,427	–	0,024	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	30,552	°C	0,095	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,559	11,77
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,2	2,201

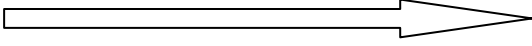
Média das indicações: $\varepsilon = 0,71$; $T = 20,9$ °C; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.18 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Échantillon 5
($Q = 4,2 \times 10^4$ J; $d_{\text{termoc.}_\text{amostra}} = 1,00$ m)

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	18,430	°C	0,054	11
Temperatura	0,0	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,447	–	0,007	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	43,803	°C	0,136	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,569	12,59
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

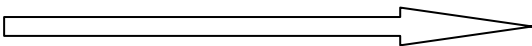
Média das indicações: $\varepsilon = 0,71$; $T = 21,5$ °C; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.19 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra 1/2
(emissividade média; $Q = 3,2 \times 10^4 \text{ J}$; $d_{\text{termoc.}_\text{amostra}} = 0,60 \text{ m}$)

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	16,282	°C	0,058	11
Temperatura	0,1	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,109	–	0,008	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	60,342	°C	0,188	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,584	13,83
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,91$; $T = 20,0 \text{ °C}$; $\tau = 0,99$

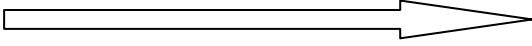
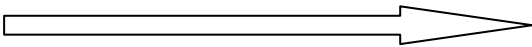
Tabela A.II.20 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Amostra 3/2
($Q = 4,8 \times 10^4 \text{ J}$; $d_{\text{termoc.}_\text{amostra}} = 0,60 \text{ m}$)

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	19,090	°C	0,068	11
Temperatura	0,1	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,111	–	0,004	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	61,686	°C	0,192	11
Intrínseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,586	14,04
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,91$; $T = 19,9 \text{ °C}$; $\tau = 0,99$

Tabela A.II.21 – Planilha para cálculo da incerteza de medição – Ícone Biantino

$$(Q = 3,0 \times 10^4 \text{ J}; d_{\text{termoc.}_\text{amostra}} = 0,70 \text{ m})$$

Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de probabilidade	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		u/°C	v _i /v _{eff}
Descrição	Valor	Unidade				Valor	Unidade		
Emissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	13,405	°C	0,048	11
Temperatura	0,0	°C	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	0,107	–	0,003	11
Transmissividade	0,01	–	A	Uniforme	$\sqrt{3}$	59,000	°C	0,184	11
Intrinseca	1,10	°C	B	Normal	2		–	0,550	11
INCERTEZA PADRÃO COMBINADA								0,582	13,63
INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)								1,3	2,201

Média das indicações: $\varepsilon = 0,91$; $T = 19,9 \text{ °C}$; $\tau = 0,99$

Em todos os casos apresentados neste anexo, a incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,201$, o qual para uma distribuição normal com graus de liberdade efetivos, v_{eff} , conforme descrito em cada uma das tabelas corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.