



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA TERMOGRAFIA POR INFRAVERMELHO: APLICAÇÕES NA
ENGENHARIA E DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS
TERMOFÍSICOS E GEOMÉTRICOS DE MATERIAIS

RENATA NUNES TAVARES DA SILVA

Orientador: Fábio Santana Magnani
Co-Orientadora: Rita de Cássia Fernandes de Lima

[Dissertação Submetida à Universidade Federal de Pernambuco para a Obtenção
do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica]

Recife, fevereiro de 2007

S586e

Silva, Renata Nunes Tavares da.

Estudo da termografia por infravermelho: aplicações na engenharia e determinação de parâmetros termofísicos e geométricos de materiais. – Recife: O Autor, 2007.

xiii, 90 folhas. : il. ; fig., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Mecânica, 2007.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. 2. Termografia. 3. Infravermelho – Termografia - Uso. I. Título.

621 CDD (22.ed.)

UFPE
BCTG/2007-030

“ESTUDO DA TERMOGRAFIA POR INFRAVERMELHO: APLICADOS NA ENGENHARIA E DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS TERMOFÍSICOS E GEOMÉTRICOS DE MATERIAIS”.

RENATA NUNES TAVARES DA SILVA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

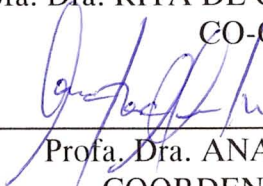
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EOP/UFPE



Prof. Dr. FÁBIO SANTANA MAGNANI
ORIENTADOR/PRESIDENTE



Profa. Dra. RITA DE CÁSSIA FERNANDES DE LIMA
CO-ORIENTADORA



Profa. Dra. ANA ROSA MENDES PRIMO
COORDENADORA DO CURSO

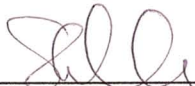
BANCA EXAMINADORA:



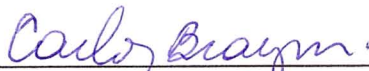
Prof. Dr. FÁBIO SANTANA MAGNANI (UFPE)



Profa. Dra. RITA DE CÁSSIA FERNANDES DE LIMA (UFPE)



Prof. Dr. SERGIO COLLE (UFSC)



Prof. Dr. CARLOS ALBERTO BRAYNER OLIVEIRA DE LIRA (UFPE)

À minha mãe Laura (*in memoriam*), por ter me ensinado a coragem no viver...
Ao meu pai Lourenço (*in memoriam*), pela eterna serenidade...
À Madrinha, pela força e pelo exemplo de vida.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos tios Pedro, Arlindo e Adejardo, às tias Lúcia e Ignez por estarem mais próximos e sempre me apoiando. Ao meu irmão Ricardo e à minha cunhada Silvana por terem me presenteado com o sobrinho Guilherme, que me trouxe alegria e esperança.

Ao Fábio, pela orientação desse trabalho, pela amizade, por sua sede de conhecimento ser fonte de motivação, pela disponibilidade, pelo exemplo de profissional que representa e por permitir o crescimento do outro.

À Rita, pela co-orientação desse trabalho, pela amizade e pela motivação da escolha da termografia como linha de pesquisa.

Ao Professores do GET, Ana Rosa, Jorge, Charamba e Ricardo, pelo convívio e pela experiência transmitida.

Ao Professor Dário do DEMEC/UFPE, pela confecção do cilindro de aço da amostra com inclusão.

Aos professores e funcionários do DEMEC/UFPE, pelo convívio.

À Eliane, pelo convívio e pela solicitude nos assuntos administrativos.

À Rose, pelo convívio e pelo grande apoio na aquisição da instrumentação adicional da câmera de infravermelho.

Ao Jacek pela doação das duas primeiras placas de gesso.

Aos colegas Douglas, Ney, Eduardo, Hélder, Carlos Henrique, Luciete, Darlan, Luís Carlos, Silvana, Carlos Alexandre e Gisele, pelo convívio. Em especial a Claudino, pela amizade e pelos momentos de estudo; e a Ângelo, pelo convívio e pela ajuda constante na realização dos experimentos desse trabalho.

Ao amigo Ivanildo, pelo constante estímulo para o ingresso no mestrado.

Ao Sr. João Batista, da empresa Decotetos Ltda., pela doação do molde para a confecção de placas de gesso.

Às empresas Gerdau/Açonorte e Fricolor, por terem concedido as visitas em suas instalações para a realização de inspeções termográficas e permitido a divulgação dos resultados.

Ao CNPq pela bolsa de mestrado concedida.

À FINEP pela aquisição da câmera de infravermelho.

RESUMO

A termografia por infravermelho permite a realização de imagens térmicas da distribuição de temperatura superficial de objetos. Essas informações de temperatura podem ser usadas em análises qualitativas ou quantitativas. O objetivo principal deste trabalho é mostrar algumas áreas em que a aplicação da termografia é bem sucedida.

São mostrados alguns exemplos onde as alterações na temperatura superficial de objetos podem ser usadas para a identificação de anomalias (seja em dispositivos, edificações, equipamentos ou no corpo humano). Esses exemplos incluem: a visualização de fenômenos térmicos básicos, a detecção de pontos quentes em instalações elétricas, um estudo preliminar sobre diagnóstico de doenças, a detecção de falhas em monumentos históricos e a detecção de perdas energéticas em equipamentos industriais.

Também é resolvido, neste trabalho, um problema inverso de condução de calor a partir dos dados obtidos por termografia. O método divide-se em três partes: (a) experimental, que consiste no aquecimento em estufa de amostras em forma de placa de gesso e na gravação de imagens térmicas das placas durante o período de resfriamento; (b) simulação numérica, onde o modelo matemático das amostras é discretizado e o problema numérico é resolvido computacionalmente; (c) comparação entre resultados experimentais e numéricos. Para o caso apresentado é possível determinar tanto parâmetros termofísicos (condutividade térmica e capacidade térmica) do gesso quanto parâmetros termofísicos e geométricos (capacidade térmica, raio, altura, centro) de uma inclusão metálica. Foram obtidos resultados com boa precisão a partir de um experimento simples.

Palavras-chave: termografia, infravermelho, determinação de parâmetros.

ABSTRACT

Infrared thermography is used to obtain the temperature distribution on the surface of objects. This information can be used for qualitative or quantitative analysis. The main objective of this work is to present fields where the use of thermography analysis is successful.

Several examples are shown in which changes on the superficial temperature distribution can be used to detect anomalies (in components, buildings, devices or human body). In those examples are included: visualization of basic thermal phenomena, detection of hot spots in electrical boards, a preliminary study on illness diagnoses, defects detection in historical buildings and the quantification of energy loss on industrial equipments.

Additionally, an inverse heat conduction problem based on thermographic data is solved. The method is divided in three parts: (a) experimental, consisted on the heating of gypsum plasterboards in a stove followed by thermographic register of the superficial temperature evolution during the natural cooling of those samples; (b) numerical simulation of the above cooling process; (c) comparison between the experimental and numerical temperature evolution in order to estimate the parameters. In the present case it was possible to determine thermophysical parameters of the gypsum (heat conductivity and thermal capacity) as well thermophysical and geometrical parameters (thermal capacity, radius, height, center) of a hidden metallic inclusion. The results were obtained with good accuracy using a simple experiment.

Keywords: thermography, infrared, parameter estimation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO DA TERMOGRAFIA NO BRASIL E NO MUNDO	1
1.2 APLICAÇÕES DA TERMOGRAFIA	2
1.3 A CÂMERA DE INFRATERMELHO E O GET – GRUPO DE ENGENHARIA TÉRMICA DA UFPE	3
1.4 HISTÓRICO DA DISSERTAÇÃO	5
1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2. TEORIA DO INFRATERMELHO.....	10
2.1 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.....	10
2.2 RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO	13
2.3 DEFINIÇÕES.....	18
2.4 DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DE UM OBJETO A PARTIR DA IRRADIAÇÃO NO SISTEMA DE MICROBOLÔMETRO	23
2.5 INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS NA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR INFRATERMELHO	25
3. APLICAÇÕES DA TERMOGRAFIA	27
3.1 VISUALIZAÇÃO DE FENÔMENOS BÁSICOS.....	27
3.2 APLICAÇÕES NA ENGENHARIA	31
3.3 APLICAÇÕES NA MEDICINA	34
3.4 DETECÇÃO DE FALHAS EM MONUMENTOS HISTÓRICOS	35
3.5 DETECÇÃO DE PERDAS ENERGÉTICAS EM FORNOS INDUSTRIAIS	36
3.6 RELATÓRIOS DE INSPEÇÕES TERMOGRÁFICAS	37
4. MODELO NUMÉRICO	39
4.1 VISÃO GERAL	39
4.2 PROBLEMA ANALÍTICO	40
4.3 PROBLEMA NUMÉRICO	42
4.4 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS DESENVOLVIDOS	57
4.5 ASPECTOS NUMÉRICOS.....	60
4.6 CORRELAÇÕES EMPÍRICAS	60
5. USO DA TERMOGRAFIA NA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS TERMOFÍSICOS E GEOMÉTRICOS	65
5.1 EXPERIMENTOS.....	65
5.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	72
5.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS TERMOFÍSICOS DO GESSO.....	73
5.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS TERMOFÍSICOS E GEOMÉTRICOS DA INCLUSÃO METÁLICA.....	74
5.5 OUTRO MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DO CENTRO DA INCLUSÃO METÁLICA	77

5.6 ANÁLISE NUMÉRICA DE PARES DE MATERIAIS INCLUSÃO/AMOSTRA	78
6. CONCLUSÃO	81
7. BIBLIOGRAFIA	83
7.1 LEITURA ADICIONAL	87
ANEXO 1	88

SIMBOLOGIA

SÍMBOLOS

	Denominação	Unidade (SI)
c	Calor específico	J/kg °C
e	Energia específica	J/kg
E	Energia do fóton	J
E	Energia no volume elementar	J
E	Irradiação	W/m ²
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
h	Coeficiente de transferência de calor	W/m ² °C
h _{convecção}	Coeficiente de transferência de calor por convecção	W/m ² °C
h _{radiação}	Coeficiente de transferência de calor por radiação	W/m ² °C
k	Condutividade térmica	W/m °C
q	Taxa de transferência de calor por unidade de tempo	W
q''	Fluxo de calor por unidade de área	W/m ²
U _{tot}	Tensão de saída medida pela câmara para o caso real	V
U _{obj}	Tensão de saída calculada pela câmara para um corpo negro de temperatura T _{obj}	V
U _{refl}	Tensão de saída teórica da câmara para um corpo negro de temperatura T _{refl}	V
U _{atm}	Tensão de saída teórica da câmara para um corpo negro inserido num meio de temperatura T _{atm}	V
W _b	Poder emissivo total do corpo negro	W/m ²
W _o	Poder emissivo total de um objeto real	W/m ²
W _{λb}	Poder emissivo espectral do corpo negro no comprimento de onda λ	W/m ² μm
W _{tot}	Poder emissivo total que alcança o sistema de microbolômetro	W/m ² μm
W _{refl}	Poder emissivo total emitido por todas as superfícies num hemisfério visto de um ponto do objeto	W/m ² μm
W _{atm}	Poder emissivo total emitido pela atmosfera entre a câmara e o objeto	W/m ² μm

SÍMBOLOS GREGOS

	Denominação	Unidade (SI)
α	Absortividade	
α	Difusividade térmica	m^2/s
β	Coefficiente de expansão volumétrica	K^{-1}
β	Peso que determina o ponto do intervalo de tempo onde serão calculados os valores característicos de temperaturas	
ε	Emissividade	
λ	Comprimento de onda	μm
ν	Frequência da onda	Hz
ν	Viscosidade cinemática	m^2/s
ρ	Massa específica	kg/m^3
ρ	Reflectividade	
τ	Transmissividade	
ϕ	Potência de radiação incidente	W

CONSTANTES

	Denominação	(SI)
c	Velocidade da luz no vácuo	$[2,998 \times 10^8 \text{ m/s}]$
h	Constante de Planck	$[6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}]$
k	Constante de Boltzmann	$[1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}]$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$[5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}^4]$

GRUPOS ADIMENSIONAIS

	Denominação	
Gr	Número de Grashof	
Nu	Número de Nusselt	
Pr	Número de Prandtl	
Ra	Número de Rayleigh	

SUBSCRITOS

	Denominação
P	Volume elementar em análise
W	Volume elementar à esquerda do volume em análise, sentido negativo do eixo x
E	Volume elementar à direita do volume em análise, sentido positivo do eixo x
N	Volume elementar ao norte do volume em análise, sentido positivo do eixo y
S	Volume elementar ao sul do volume em análise, sentido negativo do eixo y
F	Volume elementar à frente do volume em análise, sentido positivo do eixo z
B	Volume elementar atrás do volume em análise, sentido negativo do eixo z
w	Superfície limite com o volume à esquerda do volume em análise, sentido negativo do eixo x
e	Superfície limite com o volume à direita do volume elementar, sentido positivo do eixo x
n	Superfície limite com o volume ao norte do volume elementar, sentido positivo do eixo y
s	Superfície limite com o volume ao sul do volume elementar, sentido negativo do eixo y
f	Superfície limite com o volume à frente do volume elementar, sentido positivo do eixo z
b	Superfície limite com o volume atrás do volume elementar, sentido negativo do eixo z

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Imagens de uma conexão elétrica	2
Figura 1.2	- Imagens do pavimento asfáltico de uma via	2
Figura 1.3	- Imagens de infiltração de água em teto	3
Figura 1.4	- Imagens de vazamento em tubulação de vapor	3
Figura 1.5	- Câmera de infravermelho FLIR Systems modelo S45	4
Figura 2.1	- Espectro eletromagnético	10
Figura 2.2	- Diferentes interações da onda com a matéria	11
Figura 2.3	- Interação do infravermelho com a matéria	13
Figura 2.4	- Potência emissiva espectral do corpo negro segundo a lei de Planck, representada graficamente para várias temperaturas absolutas	14
Figura 2.5	- Potência emissiva espectral de um corpo negro e de um corpo cinzento na mesma temperatura	15
Figura 2.6	- Emissividade espectral de um radiador seletivo	16
Figura 2.7	- Potência emissiva espectral de um radiador seletivo	16
Figura 2.8	- Valores de emissividade para alguns materiais	17
Figura 2.9	- Potência emissiva espectral do corpo negro para várias temperaturas	18
Figura 2.10	- Processos de reflexão, absorção e transmissão	19
Figura 2.11	- Radiosidade	20
Figura 2.12	- Esquema de um detector térmico, incluindo o absorvedor e o sensor de temperatura	21
Figura 2.13	- Elemento de um microbolômetro	22
Figura 2.14	- Sistema de microbolômetro de 320 por 240	22
Figura 2.15	- Processo de Medição pela Câmera de Infravermelho	23
Figura 2.16	- Transmitância do infravermelho no gás carbônico (CO_2) e na água (H_2O)	24
Figura 2.17	- Magnitudes relativas das fontes de radiação em condições de medição variáveis (câmera de LW)	26
Figura 3.1	- Secagem de uma folha de papel	28
Figura 3.2	- Trocador de calor	28
Figura 3.3	- Mistura de água quente num recipiente com água fria	29
Figura 3.4	- Estratificação de água quente e de água fria	29
Figura 3.5	- Secagem de uma placa de gesso	30
Figura 3.6	- Imagens da chama do gás natural	30
Figura 3.7	- Termogramas do grupo gerador	32
Figura 3.8	- Infiltração de ar quente em câmara frigorífica	32
Figura 3.9	- Visualização de descolamento de pastilhas em fachada	32
Figura 3.10	- Detecção de pontos quentes em instalações elétricas	33
Figura 3.11	- Detecção de umidade em edificações	33
Figura 3.12	- Termografia de paciente com carcinoma de Paget	34
Figura 3.13	- Termogramas da tireóide	34
Figura 3.14	- Imagens de detalhe de arco de uma igreja	35
Figura 3.15	- Imagens de detalhe de porta de uma igreja	35
Figura 3.16	- Imagens da parede externa de um forno industrial	36

Figura 3.17	- Termograma da área captada a 7 m do forno	37
Figura 3.18	- Termogramas das áreas captadas a 3 m do forno	37
Figura 3.19	- Modelo de relatório de inspeção termográfica	38
Figura 4.1	- Ferramentas para solução de problemas físicos e de engenharia	39
Figura 4.2	- Geometria da placa de gesso com um cilindro de aço incrustado	40
Figura 4.3	- Volume elementar e seus vizinhos. Situação bidimensional	42
Figura 4.4	- Volume elementar e seus vizinhos. Situação tridimensional	43
Figura 4.5	- Fluxograma do Método Iterativo de Jacobi	58
Figura 4.6	- Opções de comparação das imagens	60
Figura 4.7	- Comparação de malhas na evolução da temperatura média da superfície da placa de gesso com o cilindro de aço incrustado	61
Figura 5.1	- Ilustração da amostra com o cilindro de aço incrustado	66
Figura 5.2	- Medição do pó de gesso em balança digital	66
Figura 5.3	- Molde para gesso	67
Figura 5.4	- Amostras	67
Figura 5.5	- Disposição das amostras durante os experimentos	68
Figura 5.6	- Termogramas do resfriamento da amostra de gesso após aquecimento em estufa	69
Figura 5.7	- Termogramas do resfriamento da amostra com inclusão após aquecimento em estufa	69
Figura 5.8	- Tela do programa <i>ExtraiTermo</i>	70
Figura 5.9	- Áreas consideradas para o cálculo da temperatura média	70
Figura 5.10	- Evolução da temperatura média das superfícies do lado esquerdo e do lado direito da amostra de gesso e do lado direito da amostra com inclusão	71
Figura 5.11	- Evolução da temperatura média das superfícies do lado esquerdo e do lado direito da amostra com inclusão	71
Figura 5.12	- Não-homogeneidade lateral para as duas amostras	72
Figura 5.13	- Comparação entre as temperaturas médias experimentais e simuladas	73
Figura 5.14	- Desvio entre as temperaturas médias superficiais experimentais e simuladas (para o quadrante superior esquerdo) para a altura, o raio e o centro da inclusão metálica	75
Figura 5.15	- Desvio entre as temperaturas médias superficiais experimentais e simuladas (para o quadrante superior esquerdo) para a capacidade térmica da inclusão	76
Figura 5.16	- Termogramas do resfriamento da amostra com inclusão após aquecimento com pistola de ar quente	77
Figura 5.17	- Estimativa do centro do defeito a partir de termograma realizado após aquecimento com pistola de ar quente	78
Figura 5.18	- Evolução da temperatura média simulada das amostras de aço e da amostra com inclusão de gesso	79
Figura 5.19	- Evolução da temperatura média simulada da amostra de gesso e da amostra com inclusão de concreto	79
Figura 5.20	- Evolução da temperatura média simulada da amostra de concreto e da amostra de concreto com inclusão de aço	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Subdivisão para a faixa do infravermelho	12
Tabela 2.2	- Exemplos de detectores de temperatura	20
Tabela 4.1	- Descrição dos tipos de volumes da malha	43
Tabela 4.2	- Descrição dos tipos de superfícies do volume elementar	43
Tabela 5.1	- Resultados da determinação de parâmetros termofísicos do gesso	74
Tabela 5.2	- Resultados da determinação de parâmetros termofísicos e geométricos da inclusão metálica	76

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contexto da Termografia no Brasil e no Mundo

A termografia por infravermelho é uma técnica de ensaio não-destrutivo para a obtenção de imagens térmicas, ou termogramas, de objetos a partir de uma câmera de infravermelho, ou termovisor. Essa técnica permite a medição simultânea de milhares de pontos de temperatura através da detecção da radiação de infravermelho emitida por corpos que estejam numa temperatura acima do zero absoluto. O olho humano percebe radiações emitidas por corpos que estejam, aproximadamente, acima de 650 °C, e a realização de imagens térmicas de objetos tornou-se uma ferramenta importante na detecção precoce de anomalias.

Existem dois tipos de termografia: a ativa e a passiva. Na termografia passiva as imagens térmicas são realizadas com o objeto aquecido pelo próprio processo (e.g., corpo humano, fornos industriais e caldeiras). Na termografia ativa, o objeto a ser estudado é previamente aquecido artificialmente e os termogramas são realizados no período de resfriamento do objeto. Dessa forma pode-se analisar o comportamento térmico do objeto durante o resfriamento a partir do registro das distribuições de temperatura da superfície e identificar a presença de anomalias incrustadas (invisíveis a olho nu) caso sejam detectadas perturbações nessas distribuições.

Vem crescendo cada mais vez o campo de aplicação da termografia, desde a utilização para diagnósticos médicos até determinação de perdas energéticas em fornos industriais. Mundialmente é utilizada na área militar para detecção de pessoas, na área médica para detecção de algumas doenças que provocam alterações na perfusão sanguínea da pele humana, em manutenção de instalações elétricas e na detecção de infiltração de ar quente em edificações climatizadas em países de clima temperado.

No Brasil, em particular, a termografia é muito utilizada por empresas geradoras e distribuidoras de energia elétrica e por empresas especializadas em manutenção industrial preditiva para detecção de pontos quentes em dispositivos elétricos. Em escala menor de utilização situam-se indústrias que possuem equipamentos com temperatura de operação bem distante da ambiente como caldeiras, fornos e tubulações. Nos últimos anos, alguns laboratórios de universidades vêm adquirindo câmeras de infravermelho (e.g., UFMG, UFSC, UNICAMP, UFPE) ou desenvolvendo equipamentos nacionais (Departamento de Física da UFSCar).

Apesar de as câmeras de infravermelho modernas possuírem uma grande sensibilidade (0,08 °C), a sua baixa precisão (± 2 °C ou 2% da leitura, o que for maior) é bem inferior aos sensores de contato (e.g. termistores, $\pm 0,1$ °C). Essas duas características das câmeras de infravermelho levam à utilização da termografia em análises qualitativas. Na ausência de imagens térmicas, o homem dispõe apenas de modelos baseados num pequeno número de pontos de temperatura para a compreensão de processos de transferência de calor. Mas a termografia também pode ser usada em análises quantitativas, como na determinação de perdas energéticas em grandes equipamentos industriais.

1.2 Aplicações da Termografia

Nesta seção serão mostrados alguns exemplos de aplicações da termografia que fazem parte da galeria de imagens da FLIR Systems (fabricante de câmeras de infravermelho). A Figura 1.1(a) ilustra a imagem térmica de uma conexão que está muito aquecida. Provavelmente existe algum problema de mau contato na conexão ou de sobrecarga na instalação. Pode-se observar que na imagem óptica nenhuma problema aparente pode ser visualizado.

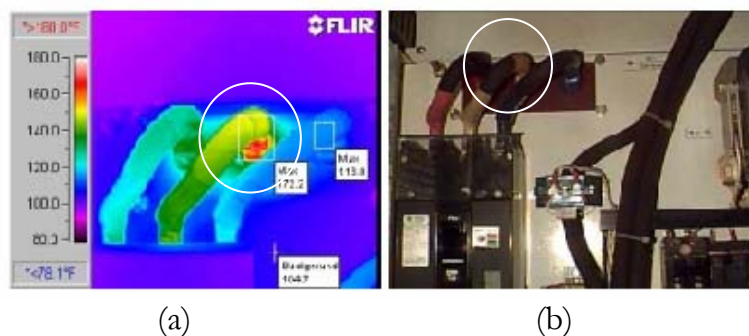


Figura 1.1 – Imagens de uma conexão elétrica (a) Termograma (b) Óptica [extraído de FLIR Systems (2006)]

Na Figura 1.2 são mostradas imagens de uma via pavimentada com asfalto. Informações a respeito da temperatura do asfalto durante o processo de cura são muito importantes. Quando o asfalto cura a uma temperatura em torno de 70 °C, a sua densidade é menor do que a temperaturas maiores, cerca de 100 °C, e isso pode provocar falhas prematuras no pavimento. Na Figura 1.2(a) podem ser observadas algumas áreas onde a temperatura do asfalto ficou baixa logo após a colocação do pavimento. Analisando a imagem óptica, Figura 1.2(b), as áreas correspondentes àquelas de temperatura de cura menor apresentam um desgaste precoce em relação ao restante da via.

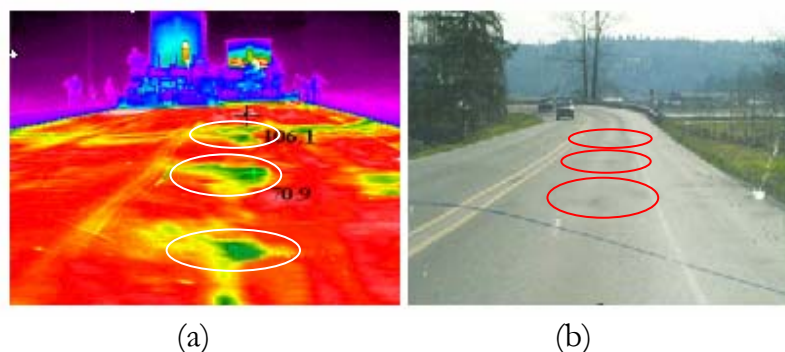


Figura 1.2 – Imagens do pavimento asfáltico de uma via (a) Termograma (b) Óptica [extraído de FLIR Systems (2006)]

A termografia pode ser usada na detecção de umidade em edificações num estágio inicial, quando ainda não é visível ao olho humano. A Figura 1.3 ilustra imagens do teto de um quarto com infiltração de água de um cômodo do andar superior.

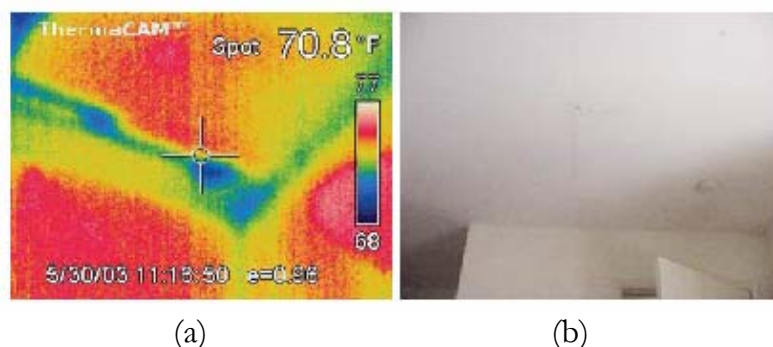


Figura 1.3 – Imagens de infiltração de água em teto (a) Termograma (b) Óptica [extraído de FLIR Systems (2006)]

Imagens térmicas também propiciam a identificação de vazamento de vapor em tubulações de equipamentos e de processos, num estágio em que não é possível ao homem a detecção do vazamento através da audição ou da visão. A Figura 1.4 mostra uma válvula com problema, onde se percebe um aquecimento anormal devido à perda de calor.

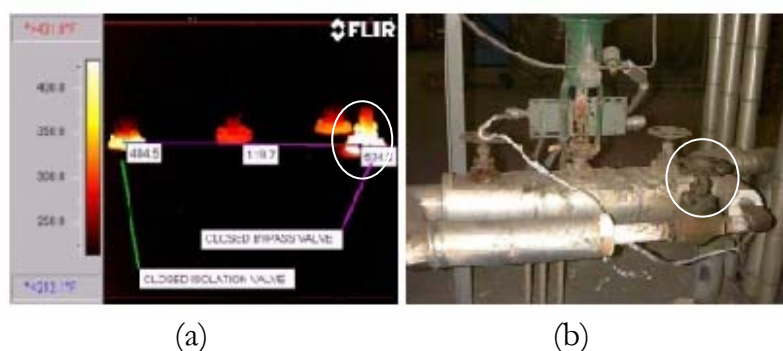


Figura 1.4 – Imagens de vazamento em tubulação de vapor (a) Termograma (b) Óptica [extraído de FLIR Systems (2006)]

1.3 A Câmera de Infravermelho e o GET – Grupo de Engenharia Térmica da UFPE

O Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da UFPE adquiriu, em janeiro de 2005, uma câmera de infravermelho da FLIR Systems modelo S45, ilustrada na Figura 1.5, dentro do Edital Finep CT-Infra04/2004. Como a termografia por infravermelho pode ser usada em aplicações militares, conforme citado na seção anterior, a compra de equipamentos que realizam imagens térmicas através da detecção da radiação de infravermelho precisa de uma autorização do Governo norte-americano. Existe um cadastro desses equipamentos onde o destino e o objetivo da utilização são identificados.

Foram adquiridos também um sistema de aquisição de dados na *National Instruments* e dois pacotes para *LabView* que permitirão o controle total da câmera e a manipulação de dados das imagens térmicas.



Figura 1.5 – Câmera de infravermelho FLIR Systems modelo S45 [extraído de ThermaCam S45, Manual do Operador (2005)]

O GET vem desenvolvendo vários trabalhos com a câmera de infravermelho, que podem ser divididos em: (a) visualização de fenômenos básicos (secagem, resfriamento, mistura e estratificação de fluidos em temperaturas diferentes, chama do gás natural), (b) análise de equipamentos industriais e determinação de perdas energéticas (e.g. Gerdau S.A. e Leon Heimmer Grupo Motogeradores), e (c) desenvolvimento de *softwares* para aquisição e tratamento das imagens térmicas.

Desde janeiro de 2005, o GET já publicou sete trabalhos em congressos: Magnani et al. (2005); Lima et al. (2006); da Silva et al. (2006a); Almeida et al. (2006); da Silva et al. (2006b); da Silva e Magnani (2006) e Bezerra et al. (2006). Em outubro de 2006 foi aceito com modificações um trabalho em periódico: Magnani e da Silva (2006a).

Em outubro de 2006, foi aprovado um projeto do GET dentro do Edital CNPq 02/2006 – Edital Universal 2006. O objetivo do projeto é generalizar e aprimorar o método para determinação de parâmetros apresentado nesse trabalho. Serão testados outros pares de materiais de amostra e de inclusão e será ampliado o uso da termografia em análises quantitativas.

Adicionalmente, ainda sobre os trabalhos do GET, existem quatro dissertações de mestrado na área de termografia sendo desenvolvidas, a saber: (a) o presente trabalho (já finalizado), onde são estudadas as aplicações da termografia em análises de fenômenos térmicos e na determinação de parâmetros termofísicos e geométricos, (b) o desenvolvimento de um aplicativo sobre o *LabView* para que as informações do microbolômetro da câmera possam ser acessadas diretamente, (c) uma comparação entre valores simulados do campo de temperatura de tumor mamário e dados experimentais obtidos através de termogramas, e (d) o desenvolvimento de um banco de dados para análise de imagens térmicas de pacientes do ambulatório de mastologia de um hospital público da região.

Além dos trabalhos citados, foram desenvolvidos três programas computacionais sendo um para a determinação da taxa de transferência de calor a partir de informações extraídas de termogramas; outro para o processamento das imagens térmicas e para a comparação com resultados de simulações numéricas de amostras; e o terceiro para a simulação numérica tridimensional e transiente do processo de resfriamento de uma amostra em forma de placa.

A termografia tem sido usada em dissertações realizadas dentro de indústrias, como no caso da simulação e análise energética de um forno de reaquecimento de tarugos da Gerdau S.A. Nos próximos meses também serão realizados termogramas na White Martins, para a parte prática de uma dissertação sobre análise exergetica de plantas de separação de ar por criogenia. Adicionalmente, em relação a disciplinas específicas da pós-

graduação do DEMEC/UFPE, com a participação de alunos foram realizadas várias análises preliminares em indústrias de cerâmica, de injeção de plástico e de produção de vidro.

O desenvolvimento dos trabalhos do GET vem trazendo o uso da termografia na análise energética quantitativa para o setor industrial da região, ampliando o campo de aplicação que antes estava concentrado em análises preditivas de instalações elétricas.

1.4 Histórico da Dissertação

A idéia inicial do presente trabalho era estudar a teoria de infravermelho e as aplicações da termografia na engenharia. O conhecimento que se tinha das aplicações era restrito às apresentadas pelo fabricante do equipamento (FLIR Systems), e limitado a análises qualitativas de equipamentos ou processos. À medida que os estudos evoluíam, foram encontradas aplicações em estudos quantitativos a partir de dados de termogramas. Por isso, o trabalho tornou-se um misto de teoria, aplicações e análise quantitativa.

Foram realizados experimentos com amostras em forma de placa. A termografia ativa foi utilizada, sendo as amostras previamente aquecidas numa estufa. Os termogramas foram realizados durante o período de resfriamento das placas. Após o tratamento das imagens térmicas e a simulação numérica do resfriamento das amostras, foi possível a determinação de parâmetros termofísicos do gesso (condutividade térmica e capacidade térmica) e termofísicos e geométricos da inclusão metálica (capacidade térmica, centro, raio, altura). O ajuste dos parâmetros foi feito de forma a minimizar os desvios entre os resultados experimentais e numéricos. Os resultados finais foram muito bons para um experimento que utilizou um equipamento com baixa precisão e uma bancada simples.

Foi resolvido um problema inverso, onde a partir das distribuições de temperatura superficiais das amostras determinaram-se parâmetros termofísicos e geométricos. Não foi aplicada a teoria de métodos inversos, que é usada quando se deseja obter o fluxo de calor a partir de informações de temperatura de amostras.

Este trabalho tem dois objetivos: (a) apresentar as áreas onde a termografia por infravermelho pode ser usada qualitativa e quantitativamente; e (b) ser uma referência, para os trabalhos de futuros alunos, com informações sobre a teoria de infravermelho, o processo de medição da radiação, os procedimentos experimentais e a simulação numérica do modelo.

1.5 Revisão Bibliográfica

Vários trabalhos foram publicados com a utilização da termografia. Clark et al. (2003) apresentaram a utilização da termografia para inspeções em pontes de concreto e alvenaria. Foi possível detectar problemas de umidade e áreas de provável descamação do concreto. Ressaltam a dificuldade da realização de termografias nessas estruturas em regiões de clima temperado, onde há uma baixa exposição das pontes à radiação solar dificultando a detecção dos problemas. Porém, com equipamentos mais sensíveis, que detectam diferenças de temperatura da ordem de $0,08^{\circ}\text{C}$, o estudo torna-se viável.

González et al. (2005) apresentaram a utilização da termografia para detecção de defeitos em geradores de radiação. A termografia pode ser utilizada na linha de produção de tais equipamentos para um melhor controle de qualidade, já que ela pode detectar defeitos de fabricação.

Barreira e de Freitas (2005) apresentaram a avaliação de materiais de construção usando a termografia, analisando os comportamentos dos mesmos. Os estudos revelaram que a emissividade é um parâmetro essencial, pois tem grande influência nas medições termográficas e pode restringir o uso da tecnologia em edificações. Se a análise for qualitativa, a seleção da emissividade não é tão importante. Nos estudos de hidratação e secagem é possível diferenciar as áreas úmidas das secas devido à diferença de temperatura entre elas durante o período de secagem. Foi possível determinar o tempo aproximado de secagem do material através da análise da variação de temperatura superficial do material. Nesse trabalho foi realizado um estudo de sensibilidade para avaliar como a emissividade, condições ambientais, cores e refletâncias das superfícies podem afetar as medições. Variações em condições ambientais (temperatura e umidade relativa) também levam a alterações nas imagens, não só porque as condições ambientais podem interferir na detecção infravermelha, mas especialmente porque a evaporação superficial é muito sensível a essas influências.

Büyüköztürk (1998) apresenta as principais técnicas de obtenção de imagens de estruturas de concreto em ensaios não-destrutivos para detecção de anomalias e fala do desafio de obter imagens de estruturas de concreto, já que este é um material não-homogêneo. Ensaios não-destrutivos são importantes para detectar os efeitos da idade e da deterioração das estruturas de concreto (pontes, rodovias, sistemas de água e esgoto, portos, aeroportos e edificações em geral), e o principal objetivo de qualquer técnica de ensaio não-destrutivo é detectar e localizar anomalias em meios opacos através de imagens. As técnicas citadas foram raios-X, ultra-som, tomografia e termografia. Ressalta que a termografia possibilita imagens remotas, rápidas e seguras. Suas limitações são a sensibilidade ao meio onde as medições estão sendo realizadas, às condições da superfície analisada e a não informação a respeito da profundidade da anomalia, sendo necessário utilizar o ultra-som para isso.

Dattoma et al. (2001) apresentaram um procedimento experimental para detectar defeitos em estruturas do tipo sanduíche através da utilização de termografia. O procedimento foi aplicado a uma lâmina de uma turbina e a resposta térmica do material foi analisada para diferentes tipos de defeitos inseridos em algumas amostras. Três defeitos típicos foram detectados: infiltração de cola e de água e descolamento de material.

Al-Kassir et al. (2005) apresentaram a utilização da termografia no estudo de sistema de ventilação e ar-condicionado de edificações. Foram analisados padrões térmicos das paredes, instalações elétricas, influência da umidade no comportamento dos materiais de construção e a relação entre evaporação de água e porosidade dos materiais da estrutura.

Legrand et al. (2002) mostraram a utilização de termografia ativa na detecção de obstruções por cola na montagem de tampas plásticas. Foi apresentado um sistema de controle em tempo real na linha de montagem das tampas. Elas são aquecidas por uma lâmpada halógena de 1000W de potência e em seguida têm suas superfícies analisadas por uma câmera de infravermelho. Se a obstrução por a cola for detectada, a tampa é descartada antes de chegar no ponto de embalagem. Antes de a termografia ser utilizada para a detecção de obstruções, o controle era realizado através da análise dos pesos das amostras. Mas, cerca de 15% da produção era descartada desnecessariamente através do processo de pesagem.

Guerrero et al. (2005) realizaram estudos experimentais para verificar quais fatores influenciavam as medições termográficas quando aplicadas a materiais de construção civil. Foram analisados três materiais comumente utilizados em construções rurais da Espanha: adobe, tijolo vermelho e granito. A temperatura dos objetos também foi medida através de termistores para comparação com os valores de temperatura medidos pela câmera de infravermelho. Os resultados mostraram que a emissividade, a cor e o tipo de acabamento influenciaram na temperatura medida pela câmera de infravermelho. A incidência direta de raios solares nas construções fez com que a temperatura aumentasse muito. Outra recomendação é que a superfície do objeto analisado seja plana e perpendicular ao eixo de medição da câmera e do objeto. As amostras com superfícies irregulares apresentaram resultados bastante ruins de interpretar.

Técnicas de ensaios não-destrutivos podem ser utilizadas no monitoramento das características físicas de revestimentos de construções, na verificação do estado de preservação de elementos arquitetônicos ou no entendimento da composição de uma obra de arte. Meola et al. (2004) apresentaram alguns experimentos visando a discriminação de materiais a partir de seu comportamento térmico distinto detectado via termografia. Foram realizados experimentos com uma amostra composta de vários materiais (cortiça, teflon, lexan, plexiglas, glass/epóxi, madeira, PVC, borracha, poliestireno e carbono/epóxi). A amostra foi aquecida artificialmente por uma fonte de calor de 1 kW e as imagens térmicas foram realizadas enquanto a amostra era aquecida. Os resultados mostraram que a técnica permitiu a discriminação de materiais bastante parecidos como o lexan e o plexiglas. A partir disso, a termografia pode ser usada para avaliar modificações em materiais (de estruturas ou de objetos) devido à idade, a tratamentos especiais nas superfícies e a condições ambientais adversas.

Devido à relativa baixa precisão das termografias, existe uma grande preocupação com a importância do processamento das informações. Técnicas de filtragem têm sido aplicadas para a superação dos problemas de incerteza das medições de temperatura destinadas a problemas inversos de condução de calor. Rainieri e Pagliarini (2002) apresentaram e validaram uma técnica de filtragem a ser aplicada em dados grosseiros para a solução de problemas inversos de condução de calor. O procedimento consiste em aplicar duas vezes o filtro de *Wiener* à uma distribuição temperatura. Primeiramente os dados são pré-processados e o ruído é removido, tornando a distribuição de temperatura homogênea para encontrar o Laplaciano correto.

Algumas vezes, os defeitos em materiais aparecem sutilmente em termogramas. A não uniformidade do infravermelho e as propriedades da superfície analisada contribuem para a degradação das imagens térmicas. Ibarra-Castanedo et al. (2004) apresentaram vários métodos de análise de dados nas etapas de pré-processamento e de processamento de imagens. Esses métodos tornaram os defeitos aparentes, aumentando a capacidade da termografia na detecção e na caracterização de anomalias.

Huang e Tsai (2005) apresentaram a resolução de um problema de condução de calor inversa, tri-dimensional e transiente, para obter uma estimativa do coeficiente local de transferência de calor da chapa de um trocador de calor, aplicando o método dos volumes finitos e utilizando a termografia infravermelha para obter a distribuição de temperaturas da superfície da chapa do trocador que foi usada para calcular a condição de contorno de fluxo prescrito na equação do balanço de energia.

Kim et al. (2003) apresentaram a resolução de um problema de condução de calor inversa, bidimensional e transiente, para estimar as propriedades termofísicas de um composto termoplástico. A amostra foi aquecida quando em contato com dois eletrodos e

as medições de temperatura foram realizadas em pontos do contorno da amostra através de termopares.

Venkatesan et al. (2001) apresentaram um método para a resolução de problemas de condução de calor inversa, unidimensional e transiente, para estimar a condutividade e a capacidade térmica de uma espuma de poliuretano utilizada como isolante. Duas placas de poliuretano foram aquecidas através de um aquecedor elétrico localizado entre as mesmas, e as medições de temperatura foram realizadas em pontos das placas através de termopares.

Douzane et al. (1999) apresentaram um experimento simples e um modelo matemático para a determinação de parâmetros de materiais. No experimento, um sinal foi produzido na face de entrada da amostra e a resposta térmica foi medida em outro ponto através de termopares. A partir de dados experimentais e de simulação numérica foi possível estimar com grande precisão a difusividade térmica e a efusividade de alguns materiais de construção.

Alguns dados nominais de propriedades do gesso e uma explicação das transformações que ocorrem no gesso durante o seu aquecimento são mostradas por Ang e Wang (2004).

Para este trabalho as correlações empíricas utilizadas para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção natural foram extraídas de Raithby e Hollands em Kreith (2000) e de Raithby e Hollands em Roshenow et al (1998).

A teoria de métodos inversos não foi aplicada neste trabalho. Mas, os métodos clássicos para a determinação de parâmetros e solução de problemas inversos são apresentados por Carlslaw e Jaeger (1959), Beck et al (1996,1985) e Özisik (2000).

Os três próximos trabalhos citados têm uma grande proximidade com o método apresentado nessa dissertação. Niliot e Callet (1998) apresentaram a aplicação da termografia na resolução de um problema de condução de calor inversa, bidimensional e transiente, para estimar a potência de fontes de calor lineares (fio de aquecimento) e para a identificação de condições de contorno desconhecidas. Foram realizadas medições da distribuição de temperaturas das superfícies das amostras através de termografias, tanto para serem usadas como condição de contorno de Dirichlet (no caso da estimativa da potência de fontes de calor lineares) quanto para identificação das condições de contorno desconhecidas no domínio da amostra.

Inagaki et al (1999) se baseiam na computação numérica para discutir o mecanismo de detecção de defeitos e o limite quantitativo das técnicas com a ajuda da investigação experimental usando termografia infravermelha. A aplicabilidade da termografia infravermelha foi validada para ensaios não-destrutivos através de uma série de experimentos e computação numérica. Foram avaliadas várias amostras compostas de acrílico, aço e cobre com uma falha incrustada de fibra de vidro. Foram feitas várias simulações para diferentes condições de aquecimento e altura da falha.

Huang e Chin (2000) apresentaram um problema inverso de condução de calor bidimensional onde foi determinada a condutividade térmica de uma placa a partir de informações de termogramas. Foram realizadas imagens térmicas de algumas amostras heterogêneas. O método do gradiente conjugado foi utilizado com sucesso para a estimativa da condutividade térmica pela minimização do erro entre os resultados experimentais e os numéricos.

1.6 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco partes: (a) o presente Capítulo 1, onde estão a revisão bibliográfica e a apresentação do trabalho, (b) o Capítulo 2, onde são apresentados a teoria de infravermelho e de que forma essa radiação interage com a matéria, (c) o Capítulo 3, que contém a revisão bibliográfica dos trabalhos realizados pelo GET, (d) o Capítulo 4, onde são mostrados o modelo matemático e a discretização das equações, e (e) o Capítulo 5, que apresenta os resultados obtidos na determinação dos parâmetros termofísicos do gesso e termofísicos e geométricos da inclusão metálica.

2. TEORIA DO INFRAVERMELHO

Este capítulo tem dois objetivos específicos: o primeiro é apresentar a teoria básica do infravermelho e de que forma essa faixa do espectro eletromagnético interage com a matéria; e o segundo é mostrar como a temperatura é determinada a partir da irradiação no sensor da câmera de infravermelho e os parâmetros que influenciam nesta determinação.

Neste trabalho, a nomenclatura das propriedades será aquela adotada por Siegel e Howell (2002), onde a terminação *-ividade* é aplicada a propriedades radiativas de materiais opacos (tanto para superfícies opticamente lisas quanto para determinada condição de superfície); e a terminação *-ância* é aplicada a propriedades extensivas de materiais transparentes que variam em função da espessura da camada do material.

2.1 Espectro Eletromagnético

O espectro eletromagnético representa as faixas de frequência e de comprimento de onda das ondas eletromagnéticas. A Figura 2.1 ilustra as diferentes bandas de todo o espectro, que vai dos raios gama até as ondas de rádio e apresentam características distintas.

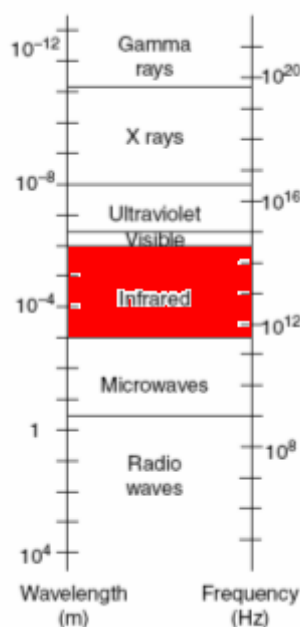


Figura 2.1 – Espectro eletromagnético [adaptado de Kotlarchyk (2002)]

As ondas de rádio possuem energia suficiente para provocar a ressonância magnética nos *spins* nucleares. Elas são usadas em sistemas de transmissão de rádio e televisão, sendo geradas por oscilações de cargas em antenas e circuitos elétricos.

As microondas são muito usadas em comunicações (radares e satélites) devido à facilidade com que são transmitidas através de nuvens, e estão numa faixa de energia que produz rotações moleculares e também ressonância no *spin* dos elétrons.

O infravermelho é a faixa do espectro eletromagnético compreendida entre $0,75\ \mu\text{m}$ e $1000\ \mu\text{m}$ de comprimento de onda.

A luz visível é a faixa do espectro eletromagnético capaz de causar sensibilidade ao olho humano. A energia dessa banda de frequência é capaz de excitar elétrons para níveis mais altos de energia em átomos e moléculas.

A faixa do ultravioleta possui energia suficiente para causar ionização e dissociação molecular. O sol é uma poderosa fonte de radiação ultravioleta, onde as subdivisões em UV-A ($0,32 - 0,38\ \mu\text{m}$), UV-B ($0,28 - 0,32\ \mu\text{m}$), e UV-C (abaixo de $0,28\ \mu\text{m}$) foram feitas para distinguir os efeitos biológicos que cada uma delas provoca no ser humano. A radiação UV-A é adjacente ao espectro visível e não é saudável à pele, a UV-B pode levar a um dano significativo em células, e os efeitos da UV-C podem ser piores ainda. O gás que absorve mais eficientemente essa radiação ultravioleta proveniente do sol é o ozônio (O_3).

Os raios-X, altamente penetrantes, são emanados quando elétrons de alta energia colidem com um alvo de metal e são classificados como radiação ionizante. Também são produzidos quando elétrons fazem transições entre níveis atômicos de energia baixos em elementos pesados. A ionização pode ocorrer através de toda a energia dada a um elétron (fotoionização) ou de parte da energia para o elétron e o restante para um fóton de baixa energia (*Compton scattering*).

Os raios gama são de origem nuclear e, como possuem alta energia, detêm um altíssimo poder de penetração. A emissão de raios gama acompanha muitos dos processos de decaimento nuclear de núcleos radioativos. A energia dessa radiação produz ionização e podem dar início a reações fotonucleares.

As diversas faixas do espectro eletromagnético interagem distintamente com a matéria. Desde a rotação molecular provocada pelas microondas até a ionização por raios-X, como ilustra a Figura 2.2.

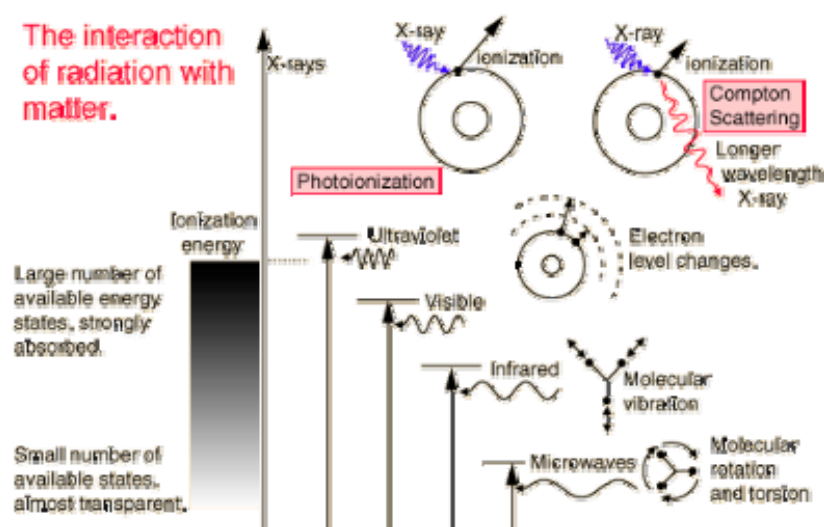


Figura 2.2 – Diferentes interações da onda com a matéria [extraído de *Department of Physics & Astronomy of Georgia State University* (2006)]

Em relação aos efeitos da radiação provocados no corpo humano tem-se que para as ondas de rádio e televisão o corpo é transparente, sendo penetrado facilmente pela radiação dessa faixa. Já para as microondas, o corpo é quase transparente e a pequena absorção que ocorre provoca rotação molecular e contribui para o aquecimento, mas nada, além disso, é observado.

A luz visível é fortemente absorvida, levando elétrons a níveis mais altos de energia, mas não tem poder de ionização. O ultravioleta é mais fortemente absorvido do que a luz visível, mas não penetra na pele e tem energia para ionização apenas na faixa adjacente aos raios-X. O corpo volta a ser quase transparente para os raios-X e os raios gama.

Infravermelho

O infravermelho é energia que se propaga no espaço na forma de ondas eletromagnéticas de comprimento de onda entre 0,75 μm e 1000 μm . Essa radiação pode ser utilizada para determinar a temperatura superficial de objetos a partir da sensibilização de detectores de infravermelho.

A subdivisão para a faixa do infravermelho adotada neste trabalho é a mesma utilizada por Hudson (1969), e a Tabela 2.1 apresenta um resumo dessa subdivisão.

Designação	Abreviação	Comprimento de Onda (μm)
Infravermelho próximo	NIR	0,75 – 3
Infravermelho médio	MIR	3 – 6
Infravermelho distante	FIR	6 – 15
Infravermelho extremo	XIR	15 - 1000

Tabela 2.1 – Subdivisão para a faixa do infravermelho [extraído de Hudson (1969)]

Também é comum a notação SWIR – *Short Wave Infrared*, MWIR – *Middle Wave Infrared* e LWIR – *Long Wave Infrared* para as faixas NIR – *Near Infrared*, MIR – *Middle Infrared* e FIR – *Far Infrared*, respectivamente.

A faixa de 8 - 14 μm costuma ser chamada de infravermelho térmico, pois compreende a região onde se encontra o pico de emissão de qualquer corpo numa temperatura entre -50°C a 50 °C.

A radiação de infravermelho possui fótons de energia que são associados ao movimento térmico das moléculas. Todos os objetos a uma temperatura acima do zero absoluto emitem radiação de infravermelho, que pode ser utilizada para obtenção de imagens térmicas superficiais dos objetos através de detectores de infravermelho.

Interação Infravermelho-Matéria

A energia dos fótons de infravermelho é capaz de provocar vibrações moleculares, como ilustra a Figura 2.3, resultando em aquecimento do tecido devido ao aumento da atividade vibracional das moléculas.

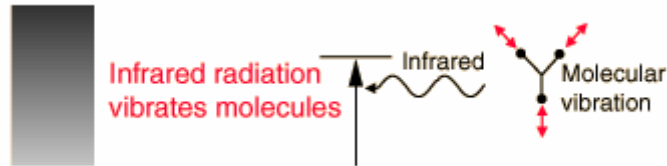


Figura 2.3 – Interação do infravermelho com a matéria, [extraído de *Department of Physics & Astronomy of Georgia State University* (2006)]

2.2 Radiação do Corpo Negro

Um corpo negro é um objeto ideal que absorve toda a radiação incidente sobre ele em qualquer comprimento de onda. Em relação a um objeto real e para determinada temperatura, o corpo negro emite o máximo de radiação em todos os comprimentos de onda.

Na hipótese de Planck, o comprimento de onda se relaciona com dois outros parâmetros das ondas eletromagnéticas: a frequência e a energia do fóton. Tem-se que:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

onde:

ν = Frequência da onda [Hz]

c = Velocidade da luz no vácuo [$2,998 \times 10^8$ m/s]

λ = Comprimento de onda [m]

e:

$$E = h \nu \quad (2.2)$$

onde:

E = Energia do fóton [J]

h = Constante de Planck [$6,626 \times 10^{-34}$ J.s]

A Equação 2.2 é a hipótese de Planck para o corpo negro, onde admitia que a energia radiante era emitida e absorvida em quantas de energia ($h\nu$), mas esta hipótese era considerada apenas como artifício de cálculo. Em 1905, quando Einstein estava investigando o efeito fotoelétrico, sugeriu a natureza quântica da luz e a quantização da energia em pequenos pacotes, os fótons. Por este motivo, a Equação 2.2 também é chamada de equação de Einstein.

A energia total emitida de uma superfície em todas as direções acima dela é denominada de potência emissiva, também chamada de emitância em algumas literaturas, que se distingue entre espectral (em um dado comprimento de onda, por unidade de comprimento de onda) e total (abrangendo todos os comprimentos de onda). A potência emissiva depende do comprimento de onda λ , da temperatura T , e da emissividade ε .

Existem três expressões que descrevem o comportamento da radiação emitida pelo corpo negro: a Lei de Planck, a Lei de Stefan-Boltzmann e a Lei do Deslocamento de Wien, apresentadas a seguir.

A Lei de Planck descreve a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro pela Equação 2.3:

$$W_{b\lambda} = \frac{2\pi hc^3}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \times 10^{-6} \quad (2.3)$$

onde:

$W_{b\lambda}$ = Potência emissiva espectral do corpo negro no comprimento de onda λ [W/m².μm]

k = Constante de Boltzmann [1,381x10⁻²³ J/K]

T = Temperatura absoluta do corpo negro [K].

A Figura 2.4 ilustra uma representação gráfica da potência emissiva espectral do corpo negro segundo a lei de Planck para várias temperaturas absolutas.

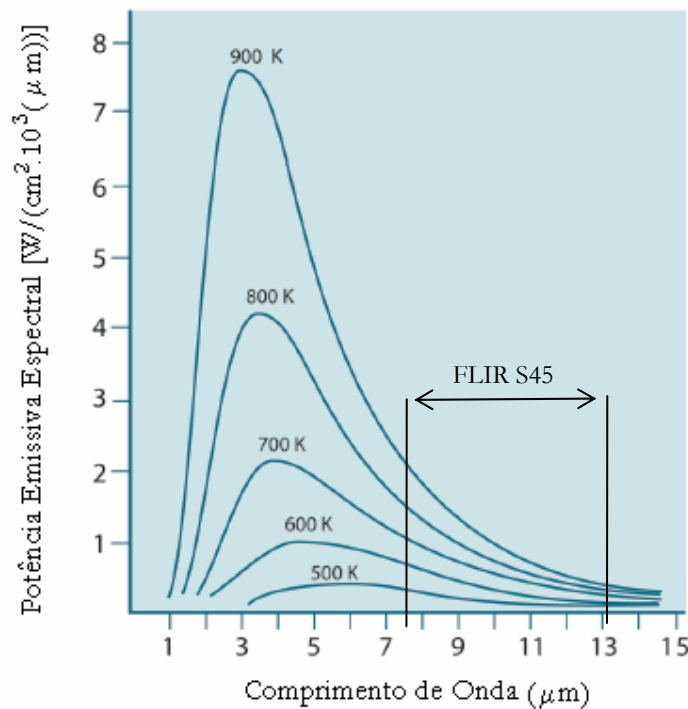


Figura 2.4 – Potência emissiva espectral do corpo negro segundo a lei de Planck, representada graficamente para várias temperaturas absolutas. [adaptado de ThermaCam S45, Manual do Operador (2005)]

A Lei de Stefan-Boltzmann representada pela Equação 2.4 é a integração de $\lambda=0$ a $\lambda=\infty$ da Equação 2.3. Obtém-se assim a potência emissiva espectral total do corpo negro.

$$W_b = \sigma T^4 \quad (2.4)$$

onde:

W_b = Potência emissiva total do corpo negro [W/m²];

σ = Constante de Stefan-Boltzmann [5,67x10⁻⁸ W/m².K⁴].

A importância de se estabelecer equações para a distribuição espectral do corpo negro vem do fato de que ela estabelece um limite máximo de toda a potência emissiva espectral de uma fonte. Um objeto, ou fonte, real não tem o mesmo comportamento de emissão de radiação do corpo negro, e a sua curva de potência emissiva é limitada pela correspondente do corpo negro na mesma temperatura do objeto.

A propriedade que expressa a habilidade de uma superfície de emitir radiação em relação a uma superfície ideal na mesma temperatura e no mesmo comprimento de onda é a emissividade.

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{W_o(\lambda, T)}{W_b(\lambda, T)} \quad (2.5)$$

onde:

$\varepsilon(\lambda, T)$ = Emissividade do objeto;

W_o = Potência emissiva total de um objeto real [W/m²];

W_b = Potência emissiva total do corpo negro na mesma temperatura do objeto [W/m²].

Então, considerando a emissividade do material, a Equação 2.4 se transforma na Equação 2.6:

$$W_o = \varepsilon(\lambda, T) \sigma T^4 \quad (2.6)$$

Se a emissividade não depender do comprimento de onda, então a fonte em questão é um corpo cinzento. A potência emissiva de um corpo cinzento é uma fração constante (ε) do que produziria um corpo negro. A Figura 2.5 ilustra a potência emissiva espectral de um corpo negro e de um corpo cinzento.

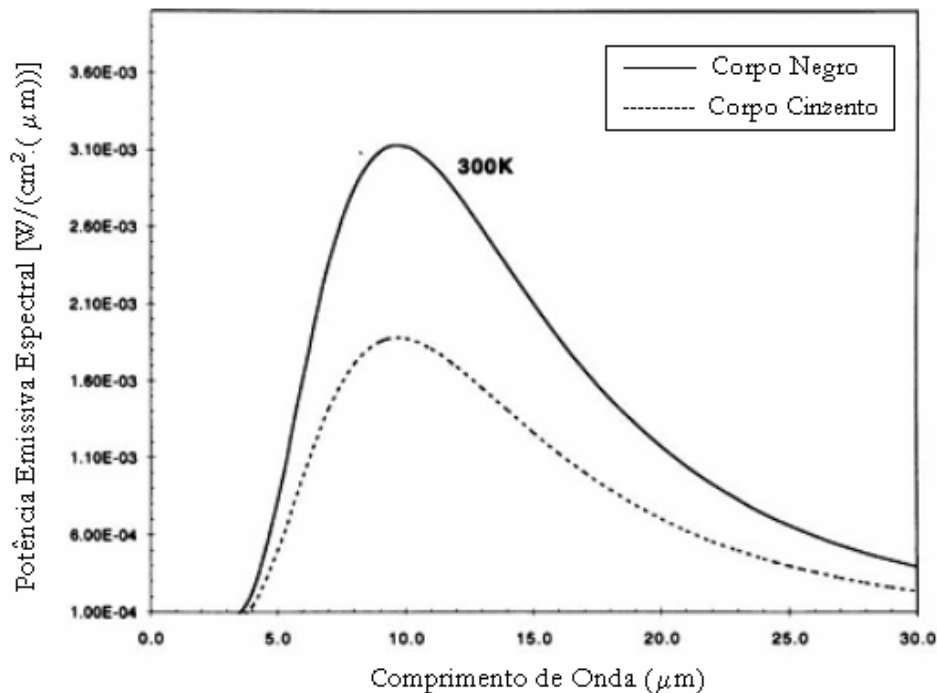


Figura 2.5 – Potência emissiva espectral de um corpo negro e de um corpo cinzento na mesma temperatura [adaptado de Dereniak e Boreman (1996)]

Um modelo mais complexo e preciso do que o corpo cinzento, na modelagem do comportamento de fontes reais, é o radiador seletivo*, onde a emissividade é uma função constante do comprimento de onda em alguns trechos de toda a faixa espectral. A Figura 2.6 apresenta curvas da emissividade espectral para um radiador seletivo e um corpo negro.

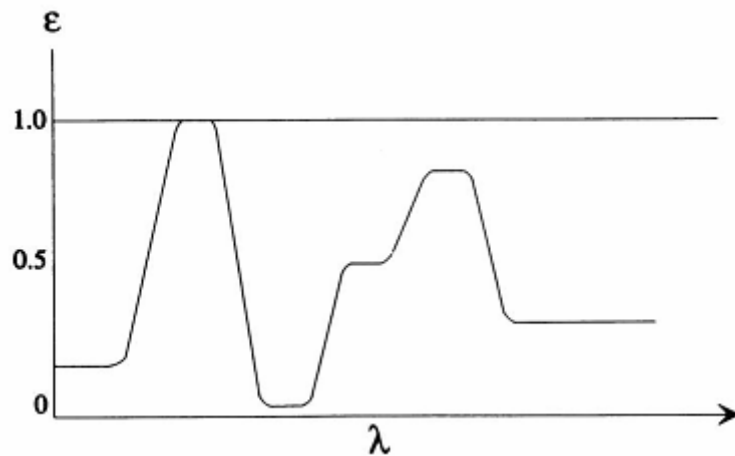


Figura 2.6 – Emissividade espectral de um radiador seletivo [extraído de Dereniak e Boreman (1996)]

A Figura 2.7 ilustra a potência emissiva espectral de um radiador seletivo e de um corpo negro na mesma temperatura.

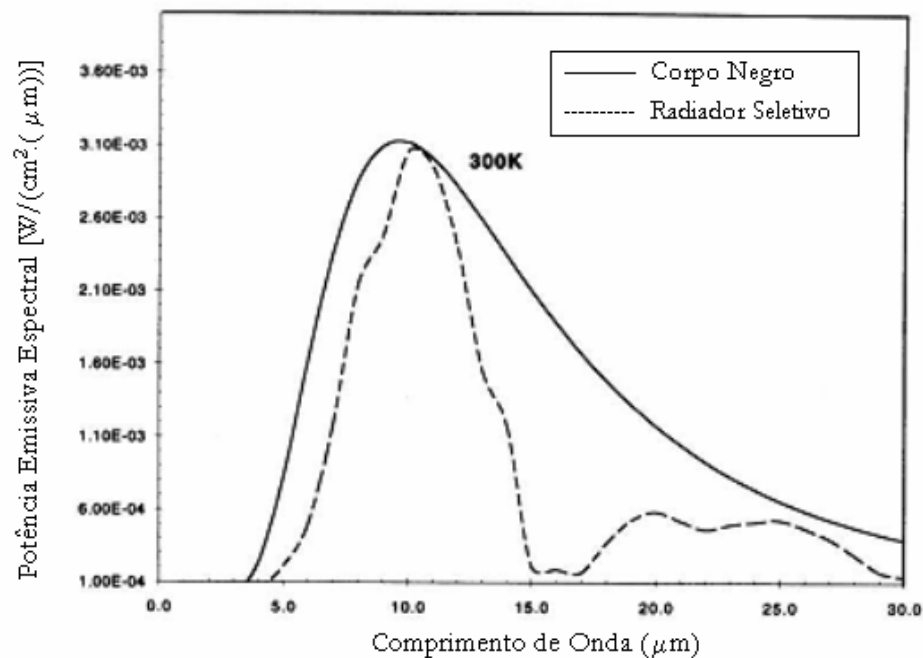


Figura 2.7 – Potência emissiva espectral de um radiador seletivo [adaptado de Dereniak e Boreman (1996)]

* Radiador seletivo é um corpo utilizado na modelagem de fontes reais de radiação; enquanto superfície seletiva é aquela construída, para aplicações na engenharia, com o objetivo de possuir uma emissividade alta para determinada faixa espectral e outra baixa numa região diferente. Em geral uma superfície seletiva pode ser modelada por um radiador seletivo.

Freqüentemente a emissividade da maioria dos materiais é fornecida como apenas um simples número, e raras vezes como uma função do comprimento de onda ou da temperatura, a não ser que seja um material bem caracterizado. Para substâncias não-metálicas, tipicamente a emissividade é maior do que 0,8 à temperatura ambiente e diminui com o aumento da temperatura. Já para substâncias metálicas, sem a superfície oxidada, a emissividade é muito baixa à temperatura ambiente, menor do que 0,3, mas aumenta com o aumento da temperatura (Dereniak e Boreman, 1996).

A Figura 2.8 ilustra alguns valores de emissividade, à temperatura ambiente, para os materiais mais comuns usados na engenharia, onde pode ser observado que as substâncias metálicas com superfície oxidada possuem emissividades mais altas do que aquelas com as superfícies polidas, mas não chegam a ser tão altas como as substâncias não metálicas.

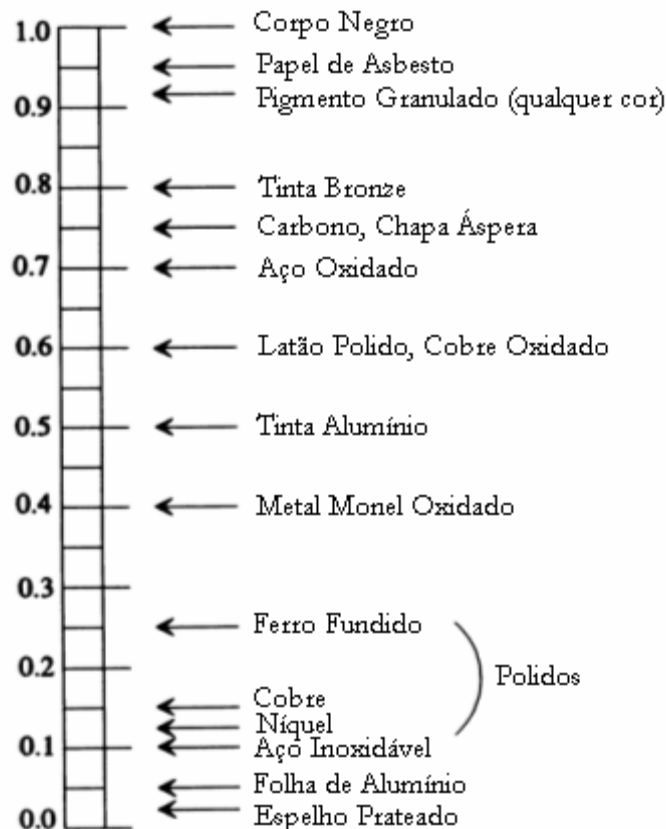


Figura 2.8 – Valores de emissividade para alguns materiais [adaptado de Dereniak e Boreman (1996)]

A fórmula de Wien é a diferenciação da fórmula de Planck em relação à λ , e encontrando o máximo tem-se a Equação 2.7:

$$\lambda_{máx} = \frac{2898}{T} [\mu m] \quad (2.7)$$

A Lei do Deslocamento de Wien quantifica o decréscimo do comprimento de onda onde ocorre o pico da potência emissiva à medida que a temperatura aumenta. A Figura 2.9 ilustra esse decréscimo e a linha pontilhada representa o lugar geométrico da potência emissiva máxima a cada temperatura.

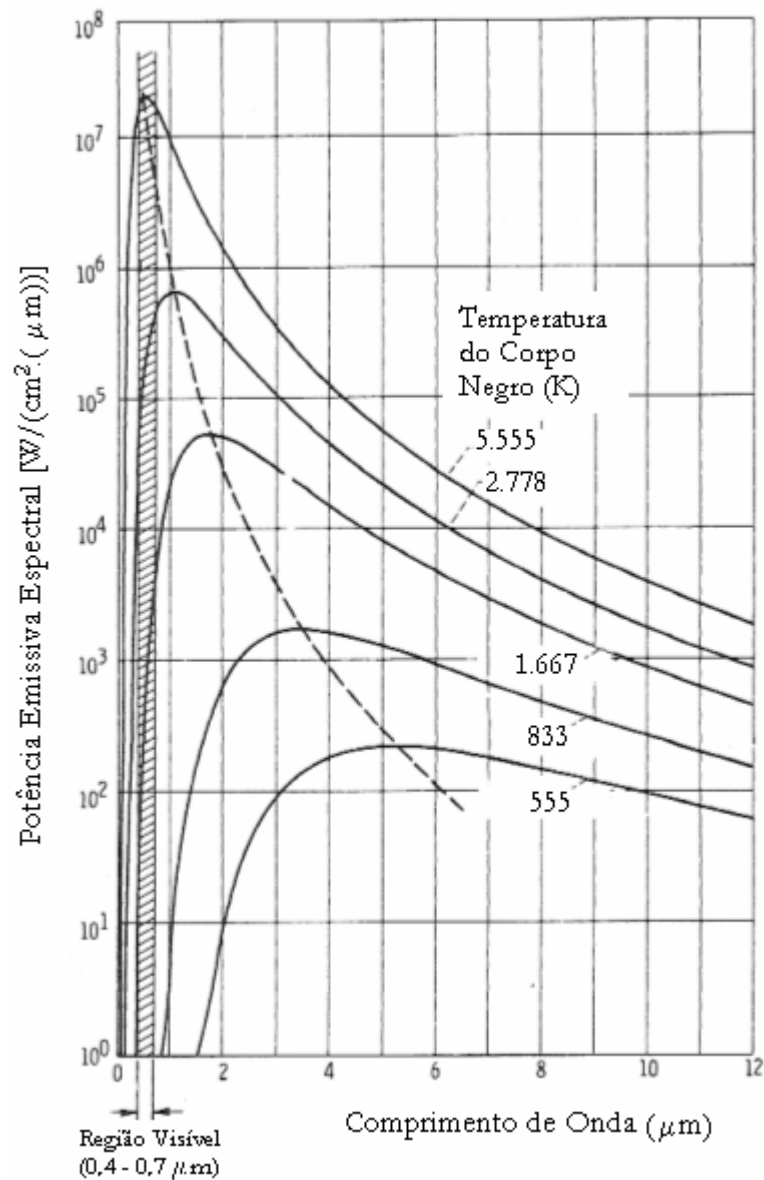


Figura 2.9 – Potência emissiva espectral do corpo negro para várias temperaturas [adaptado de Siegel e Howell (2002)]

2.3 Definições

As definições apresentadas a seguir são baseadas em Incropera e DeWitt, (1990) e Dereniak e Boreman (1996).

Irradiação

Irradiação é a potência total de radiação que incide numa determinada superfície por unidade de área.

$$E = \frac{\phi}{A} \quad (2.8)$$

Processos de Reflexão, Absorção e Transmissão

Se a irradiação passa através de um meio sem qualquer atenuação, o material é chamado de transparente, não existindo as parcelas de reflexão e absorção.

Quando a irradiação interage com um meio semitransparente, partes dessa radiação podem ser refletidas, absorvidas e transmitidas. A magnitude de cada uma dessas parcelas depende das condições dos limites inferior e superior da superfície, do comprimento de onda da radiação e da composição e espessura do meio.

Quando o meio é opaco, não existe a parcela de radiação transmitida através do meio e os processos restantes de reflexão e absorção podem ser tratados como fenômenos de superfície. A irradiação é absorvida e refletida pela superfície dependendo do comprimento de onda e da natureza da superfície do material. A reflexão não provoca efeitos líquidos, enquanto a absorção aumenta a energia interna do meio.

A maioria dos gases é bastante transparente a radiações, exceto para estreitas regiões espectrais, chamadas de bandas de absorção. A maioria dos sólidos tende a ser fortes absorvedores da maioria dos comprimentos de onda, tornando eles opacos em uma faixa que vai de alguns nanômetros (condutores elétricos, metais) a alguns micrômetros (cerâmicas, semicondutores), ou mais (dielétricos).

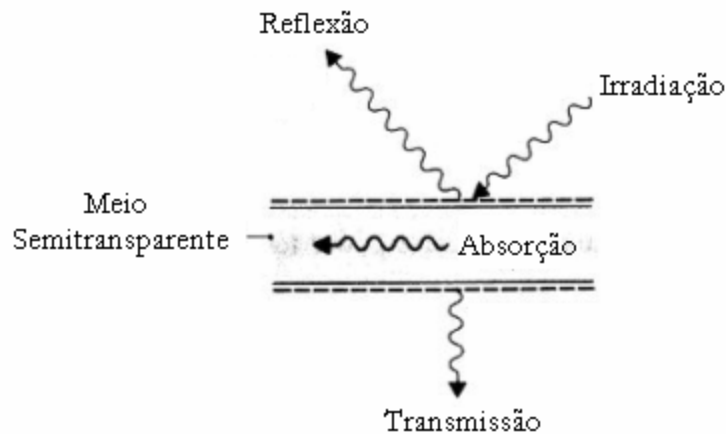


Figura 2.10 – Processos de reflexão, absorção e transmissão [adaptado de Incropera e DeWitt, (1990)]

Absortividade

É a fração de energia que é absorvida do total que incide em determinado meio.

$$\alpha = \frac{\text{energia radiante absorvida}}{\text{energia radiante incidente}}$$

Reflectividade

É a fração de energia refletida do total que incide em determinado meio.

$$\rho = \frac{\text{energia radiante refletida}}{\text{energia radiante incidente}}$$

Transmissividade

É a fração de energia que é transmitida através de um meio do total que incide nele.

$$\tau = \frac{\text{energia radiante transmitida}}{\text{energia radiante incidente}}$$

Radiosidade

Radiosidade é a taxa na qual a radiação abandona a superfície devido à emissão e à reflexão em todas as direções por unidade de área de superfície.

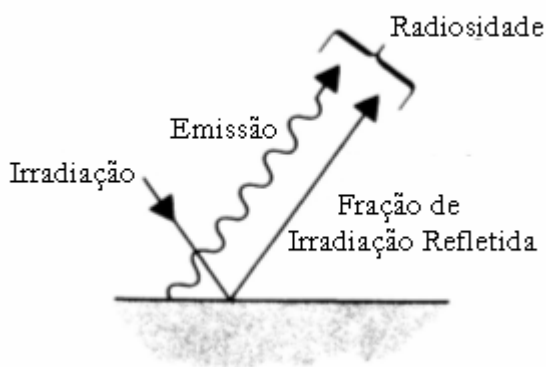


Figura 2.11 – Radiosidade [adaptado de Incropera e DeWitt, (1990)]

Detetores de Temperatura

Os detectores térmicos respondem ao aquecimento gerado pela energia absorvida da radiação. Esse processo requer duas etapas: a mudança de temperatura do detector devido à radiação, e alguma mudança mensurável de parâmetro causada pela variação de temperatura. O parâmetro físico é então detectado por instrumentação apropriada.

A Tabela 2.2 apresenta exemplos de detectores de temperatura e seus mecanismos de detecção.

Detector	Mecanismo de detecção
Bolômetros	Resistência
Piroelétricos	Capacitância
Termopares	Tensão
Supercondutores	Resistência

Tabela 2.2 – Exemplos de detectores de temperatura [adaptado de Dereniak e Boreman (1996)]

No caso do bolômetro, uma variação de temperatura provoca uma variação na resistência elétrica do material. A resistência pode ser monitorada por um ohmímetro para determinar a presença de radiação.

A resposta espectral de um detector térmico é completamente determinada pela emissividade de sua superfície exterior. Se a radiação é absorvida, ela é detectada; se não, é refletida e perdida. Devido às propriedades da superfície, tal como emissividade, não mudarem rapidamente com o comprimento de onda, os detectores térmicos tipicamente têm resposta a uma faixa espectral muito grande e respondem desde a faixa do visível distante até a região do infravermelho.

Todos os detectores térmicos têm pelo menos duas partes essenciais: o absorvedor de radiação e o sensor de temperatura ou transdutor. A Figura 2.12 ilustra um detector térmico genérico, onde são mostrados o absorvedor, que deve ter alta emissividade para absorver a radiação, e o sensor de temperatura, o qual tem uma propriedade elétrica dependente da temperatura da estrutura. A área de coleta da radiação do sensor não é a mesma que responde à variação da temperatura.

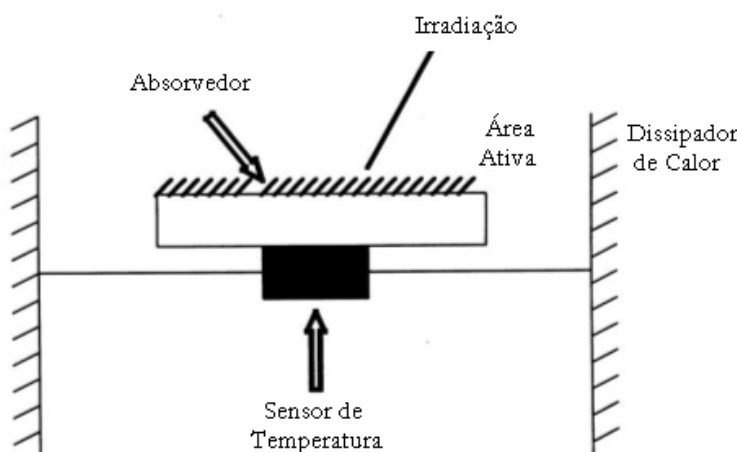


Figura 2.12 – Esquema de um detector térmico, incluindo o absorvedor e o sensor de temperatura [adaptado de Dereniak e Boreman (1996)]

Bolômetro

A operação de um bolômetro é baseada numa variação na resistência elétrica de materiais semicondutores como função de uma variação de temperatura. Esses bolômetros são freqüentemente chamados de termistor bolômetro ou resistores termicamente sensíveis (Astheimer (1983)).

Materiais semicondutores utilizados na fabricação de bolômetros incluem diamante sintético, germânio, silício, óxidos de manganês sinterizados, cobalto e/ou níquel. Esses *chips* são montados em substratos dissipadores de calor. Quando a radiação atinge o detector, a temperatura do detector aumenta. Quando a radiação é removida, o detector retorna à temperatura do substrato dissipador de calor.

Microbolômetro

O microbolômetro é um elemento sensor individual que sofre uma variação na sua resistência elétrica quando é aquecido devido à absorção de radiação. É constituído de um *chip* de silício, com uma fina camada de óxido de vanádio* depositada. A mudança na resistência elétrica pode ser determinada através de uma leitura da variação resultante da corrente de polarização. Mais de 80.000 sensores podem ser fabricados juntos numa placa.

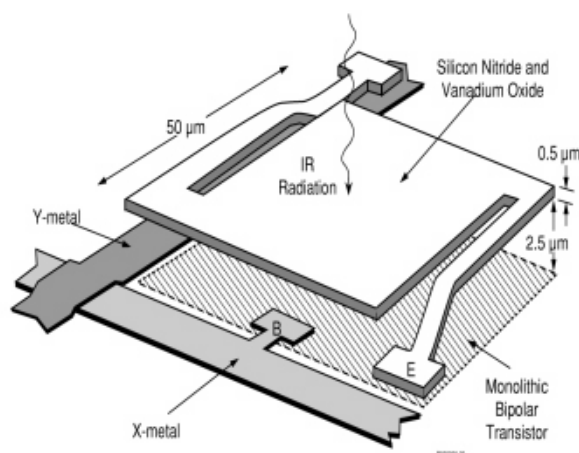


Figura 2.13 – Elemento de um microbolômetro [extraído de *Infrared Solutions* (nov. 2006)]

A maioria dos fabricantes atuais de câmeras de infravermelho utilizam o sistema de microbolômetro de 320 por 240, inclusive a FLIR Systems no modelo ThermaCam S45 usado para a realização dos termogramas apresentados neste trabalho. Contudo, existe uma alternativa para muitas aplicações comerciais que é o sistema de 160 por 120. O sistema menor e sua câmera podem ser produzidos com um custo muito menor. Adicionalmente, um dos componentes mais caros de uma câmera é a lente e seu custo é proporcional ao tamanho do sistema de microbolômetro.

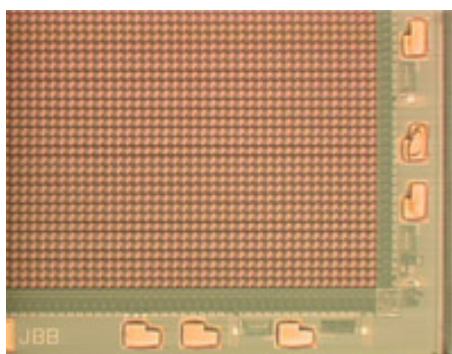


Figura 2.14 – Sistema de microbolômetro de 320 por 240 [extraído de *Infrared Solutions* (nov. 2006)]

* Os óxidos de vanádio (VOx: VO₂, V₂O₃ e V₂O₅) são depositados numa fina placa de silício para proporcionar um resistência conveniente para os circuitos de leitura da corrente de polarização do microbolômetro.

A única vantagem do sistema de 320 por 240 é o campo de visão maior (FOV – *Field of View*). Com a mesma distância focal e mesmo tamanho de detector, a câmera com 320 por 240 ou 160 por 120 terão resoluções espaciais idênticas.

2.4 Determinação da Temperatura de um Objeto a partir da Irradiação no Sistema de Microbolômetro

Uma câmera de infravermelho recebe radiações provenientes de três fontes: do objeto analisado (Figura 2.15(a)); do meio adjacente refletidas pelo objeto (Figura 2.15(b)); e da atmosfera (Figura 2.15(c)). A câmera detecta potência de radiação através de um sistema de microbolômetro, converte em sinal de tensão e depois em valor de temperatura.

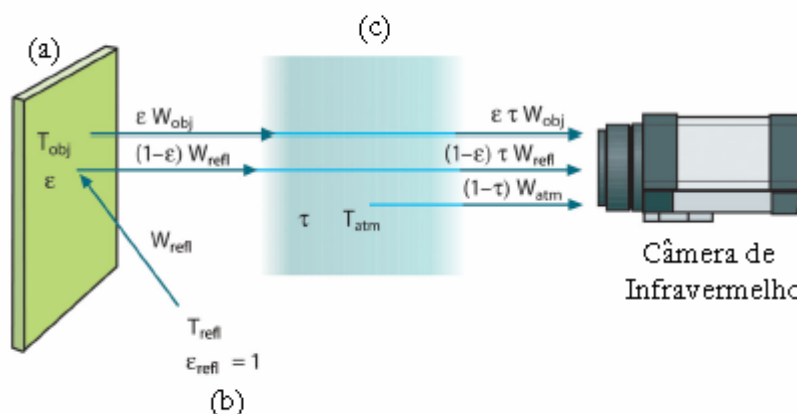


Figura 2.15 – Processo de medição pela câmera de infravermelho (a) Objeto Analisado (b) Meio Adjacente (c) Atmosfera [adaptado de ThermaCam S45, Manual do Operador (2005)]

Para a realização dos termogramas apresentados neste trabalho, foi utilizada uma câmera modelo S45 do fabricante FLIR Systems, sistema de microbolômetro de 320 por 240, com frequência de imagens de 50/60 Hz, faixa de temperaturas de -40°C a 1500°C e precisão de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ou 2% de leitura. A faixa espectral é de $7,5$ a $13 \mu\text{m}$, sendo classificada como uma câmera de LW (*long wavelength*). No Anexo 1 encontram-se maiores informações na ficha de especificação do equipamento (*datasheet*).

A radiação medida pela câmera depende tanto da temperatura quanto da emissividade do corpo que está sendo analisado. Portanto, a informação da emissividade à câmera é fundamental para uma estimativa precisa da temperatura do fluxo radiante medido. Normalmente os valores variam de 0,1 a 0,95. Para superfícies extremamente polidas têm-se emissividades inferiores a 0,1 e, para superfícies oxidadas os valores são superiores a 0,95.

O objeto analisado é considerado opaco e, além da emissividade, outros parâmetros devem ser inseridos na câmera tais como temperatura refletida (temperatura média radiante do meio adjacente e que é refletida pelo objeto), temperatura atmosférica, distância entre objeto e câmera e umidade relativa. A temperatura refletida é aquela admitida para todas as superfícies emissoras no meio adjacente ao objeto em estudo. Enquanto que temperatura atmosférica é a da atmosfera entre objeto e câmera. A

distância entre o objeto e câmera e a umidade relativa são parâmetros inseridos com o objetivo de se calcular a atenuação que a radiação sofre até chegar à lente do equipamento.

Na Figura 2.16 pode-se observar que a transmitância do infravermelho no gás carbônico (CO₂) e na água (H₂O) varia de acordo com o comprimento de onda da radiação. Por esse motivo, a câmera S45 da FLIR mede o infravermelho em uma faixa do FIR (*Far Infrared*) onde a absorção atmosférica é pequena.

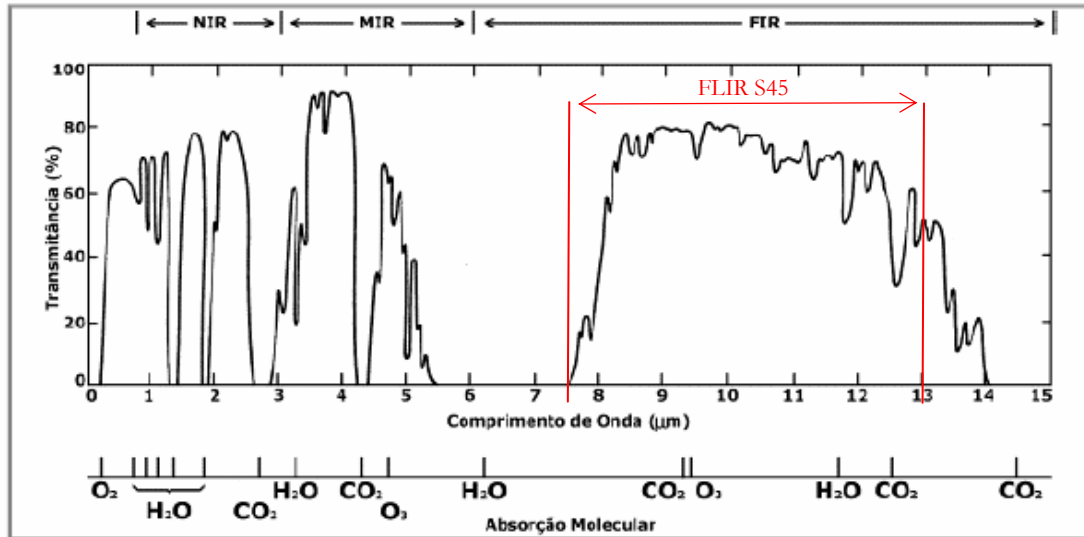


Figura 2.16 – Transmitância do infravermelho no gás carbônico (CO₂) e na água (H₂O)

Assim, com os parâmetros inseridos, a câmera pode efetuar a medição com precisão, e a potência emissiva total recebida pelo sistema de microbolômetro é:

$$W_{tot} = \varepsilon(\lambda, T)\tau W_b + (1 - \varepsilon(\lambda, T))\tau W_{refl} + (1 - \tau)W_{atm} \quad (2.9)$$

onde:

W_{tot} = Potência emissiva total que alcança o sistema de microbolômetro (medida);

W_b = Potência emissiva total emitida pelo corpo negro na mesma temperatura do objeto (calculada pela câmera);

W_{refl} = Potência emissiva total emitida por todas as superfícies num hemisfério visto de um ponto do objeto;

W_{atm} = Potência emissiva total emitida pela atmosfera entre a câmera e o objeto;

τ = Transmitância da atmosfera entre a câmera e o objeto.

A câmera precisa converter a radiação incidente no seu sistema de microbolômetro em temperatura, e para isso utiliza-se do fato de a potência emissiva total recebida, W_{fonte} , da fonte de temperatura de um corpo negro a T_{fonte} a uma distância curta gera um sinal de tensão de saída na câmera, U_{fonte} , proporcional à entrada de potência emissiva, então:

$$U_{fonte} = CW_{fonte} \quad (2.10)$$

onde C é a constante de proporcionalidade.

Sendo a fonte um objeto real, com emissividade $\varepsilon(\lambda, T)$, a potência emissiva recebida será $\varepsilon(\lambda, T) \cdot W_{\text{fonte}}$

Multiplicando cada termo da Equação 2.9 pela constante C da Equação 2.10 e substituindo os produtos C.W pelo U correspondente, obtém-se:

$$U_{\text{tot}} = \varepsilon \tau U_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon) \tau U_{\text{refl}} + (1 - \tau) U_{\text{atm}} \quad (2.11)$$

onde:

U_{tot} = Tensão de saída medida pela câmara para o caso real;

U_{obj} = Tensão de saída calculada pela câmara para um corpo negro de temperatura T_{obj} , ou seja, uma tensão que pode ser diretamente convertida em temperatura real requerida do objeto;

U_{refl} = Tensão de saída teórica da câmara para um corpo negro de temperatura T_{refl} de acordo com a informação fornecida pelo operador;

U_{atm} = Tensão de saída teórica da câmara para um corpo negro inserido num meio de temperatura T_{atm} de acordo com a informação fornecida pelo operador.

O microbolômetro gera uma tensão U_{tot} que é medida pela câmara para o caso real, enquanto que as parcelas U_{refl} e U_{atm} referentes às potências emissivas de todas as superfícies do meio adjacente ao objeto e da atmosfera, respectivamente, são valores estimados a partir dos valores das temperaturas refletida e atmosférica informados pelo operador da câmara. Para o cálculo da tensão do objeto, a Equação 2.11 é reescrita e tem-se:

$$U_{\text{obj}} = \frac{1}{\varepsilon \tau} U_{\text{tot}} - \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} U_{\text{refl}} - \frac{(1 - \tau)}{\varepsilon \tau} U_{\text{atm}} \quad (2.12)$$

A Equação 2.12 é a fórmula para medições termográficas em todos os equipamentos da FLIR Systems. Para cada valor de tensão gerado pelo microbolômetro é calculado um valor de tensão do objeto, que a câmara de infravermelho associa a um valor de temperatura. Ou seja, a potência emissiva medida pelo microbolômetro é transformado em tensão, e esta em temperatura por um algoritmo interno da câmara.

2.5 Influência de Parâmetros na Medição de Temperatura por Infravermelho

A experiência do operador de uma câmara de infravermelho é muito importante para garantir a fidelidade das informações sobre os parâmetros a serem inseridos, já que não é simples a obtenção de valores precisos de emitância e transmitância atmosférica para casos reais.

Se o meio adjacente ao objeto em estudo não possuir fontes de radiação intensa, os valores informados para as temperaturas refletida e atmosférica não representam um problema; fato que não ocorre na presença de fontes de radiação intensa, onde há necessidade de utilizar valores corretos das temperaturas citadas.

A FLIR Systems apresenta algumas análises de casos de medição e compara as magnitudes relativas aos três termos de radiação detectados pela câmara de infravermelho.

Isto permite avaliar as situações em que utilizar valores corretos dos parâmetros é importante.

A Figura 2.17 ilustra as magnitudes das três contribuições de radiação para três temperaturas de objeto diferentes, duas emissividades e faixa espectral de LW(*long wavelengths*). Os demais parâmetros foram fixados, sendo a transmitância atmosférica de 0,88, a temperatura refletida de +20 °C e temperatura atmosférica de +20 °C.

Como pode ser visto na Figura 2.17, na situação de temperatura do objeto de 0 °C e emissividade igual a 0,6 (temperatura e/ou a emissividade do objeto baixas), a medição por termografia é difícil porque a perturbação das fontes de radiação do meio adjacente é forte; já para o caso onde a temperatura do objeto é igual a 50 °C e a emissividade é de 0,8 (valores altos de temperatura e emissividade), os parâmetros do meio adjacente ao objeto não são tão relevantes, e a medição nessas condições não é crítica.

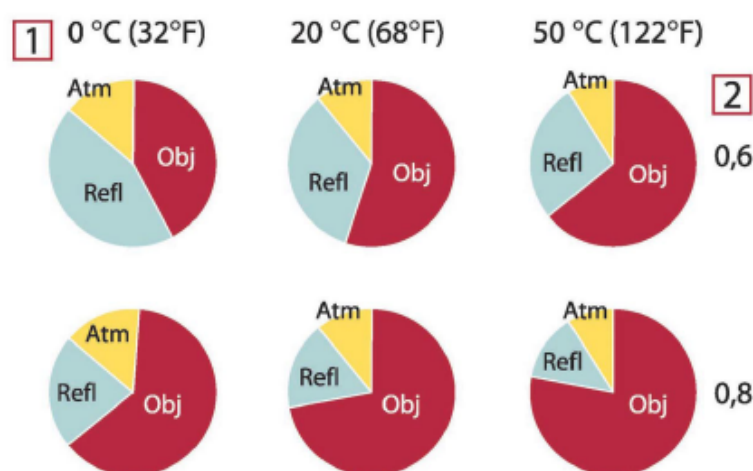


Figura 2.17 – Magnitudes relativas das fontes de radiação em condições de medição variáveis (câmera de LW); 1: Temperatura do objeto; 2: Emissividade; Obj: Radiação do objeto; Refl: Radiação refletida; Atm: Radiação atmosférica [extraído do ThermaCam S45, Manual do Operador (2005)]

3. APLICAÇÕES DA TERMOGRAFIA

Uma revisão bibliográfica dos trabalhos que utilizaram a termografia de infravermelho e foram realizados pelo GET, desde a aquisição da câmera de infravermelho pelo DEMEC/UFPE, é apresentada neste capítulo. Serão mostradas diversas aplicações na engenharia, na área médica e na visualização de fenômenos térmicos básicos. Também será mostrado um dos exemplos de aplicação apresentado pelo fabricante da câmera de infravermelho. A autora participou da maioria desses trabalhos, ora como principal, ora como membro da equipe e outras vezes como mera espectadora (nesses casos o nome não consta na autoria dos trabalhos). Dois trabalhos fazem parte de conteúdos que serão mostrados nos capítulos seguintes, e aqui vão ser apenas citados: (a) da Silva e Magnani (2006) apresentaram um método para detecção de inclusões metálicas em placas de gesso através de termografia ativa, e (b) Magnani e da Silva (2006a) apresentaram a determinação de parâmetros termofísicos e geométricos de uma inclusão metálica numa placa de gesso a partir de dados obtidos de imagens térmicas da distribuição de temperatura superficial da placa (aceito em periódico com modificações).

3.1 Visualização de Fenômenos Básicos

A termografia é bastante utilizada no Brasil em programas de manutenção preditiva e preventiva. Mas essa técnica também pode ser utilizada para a visualização e o entendimento de alguns fenômenos térmicos. Magnani et al. (2005) apresentaram a visualização de vários processos térmicos, invisíveis ao olho humano, através de termogramas.

Um dos processos apresentados é a secagem de uma folha de papel, ilustrado na Figura 3.1(a)-(d). Primeiramente, a folha de papel foi completamente molhada com água e depois uma corrente de ar (a 27,6 °C) foi direcionada paralelamente à folha de papel. A Figura 3.1(a) mostra o papel molhado antes da corrente de ar. Na Figura 3.1(b)-(d) são mostrados os termogramas da folha de papel após a corrente de ar. Os efeitos do resfriamento evaporativo podem ser visualizados através das áreas correspondentes às cores azul e violeta nos termogramas da Figura 3.1(b)-(c). A região mais quente na parte central superior da folha de papel, que pode ser vista na Figura 3.1(c)-(d), ilustra a secagem completa da região. A termografia pode ser importante na área porque permite a visualização de todo o processo de secagem.

A visualização das temperaturas de fluidos em trocadores de calor é muito importante para saber se estão em perfeito funcionamento. A Figura 3.2 mostra o termograma de um trocador de calor onde as temperaturas dos fluidos foram medidas sem que houvesse contato com o equipamento, e pôde ser verificado que estão nos limites desejados.

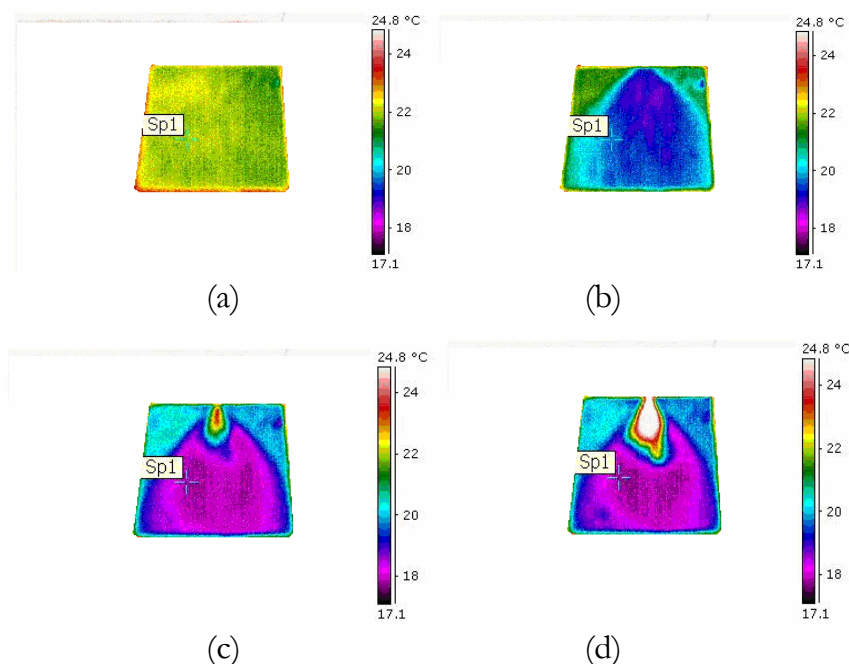


Figure 3.1 – Secagem de uma folha de papel [extraído de Magnani et al. (2005)]

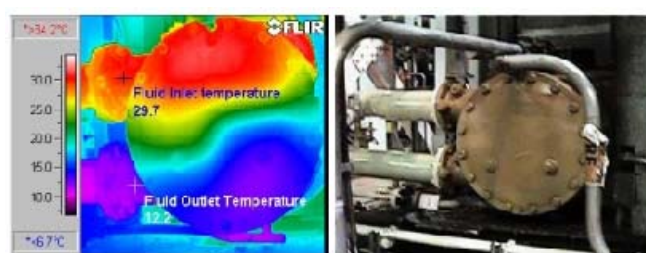


Figura 3.2 – Trocador de calor [extraído de FLIR Systems (2006)]

Magnani et al. (2005) mostraram a visualização de uma mistura de água quente num recipiente com água fria. O recipiente utilizado foi de poliestireno porque este é semitransparente à radiação de infravermelho. A Figura 3.3(a)-(h) ilustra todo o processo de mistura. Na Figura 3.3(a) é mostrado o recipiente com água fria (18 °C). A corrente de água quente na parte superior direita do recipiente, e a de água morna na parte inferior do recipiente são mostradas na Figura 3.3(b). Os movimentos da mistura da água quente com a fria são ilustrados na Figura 3.3(c)-(g). A homogeneização da água pode ser vista na Figura 3.3(h), onde o fluido se encontra numa temperatura intermediária entre a da água fria que estava no recipiente e a da água quente que foi inserida.

A estratificação é muito importante em processos de armazenamento térmico. O conhecimento do fenômeno proporciona o desenvolvimento de novas técnicas de estratificação, de melhores formas para os tanques de armazenamento, etc. Magnani et al. (2005) apresentaram a visualização da estratificação de água quente e de água fria. A água quente foi inserida no recipiente com água fria através de outro recipiente com furos de 1 mm na sua base e a 5 mm de distância do nível da água fria. Assim, o fluxo e a velocidade da água quente puderam ser minimizados. Os termogramas da Figura 3.4(a)-(d) permitem a visualização do processo de estratificação do experimento realizado. A Figura 3.4(a) ilustra o recipiente de baixo com a água fria. A Figura 3.4(b) mostra a água quente caindo

através do recipiente de cima. A estratificação após 1 minuto e 30 segundos é mostrada na Figura 3.4(c), e após 10 minutos na Figura 3.4(d).

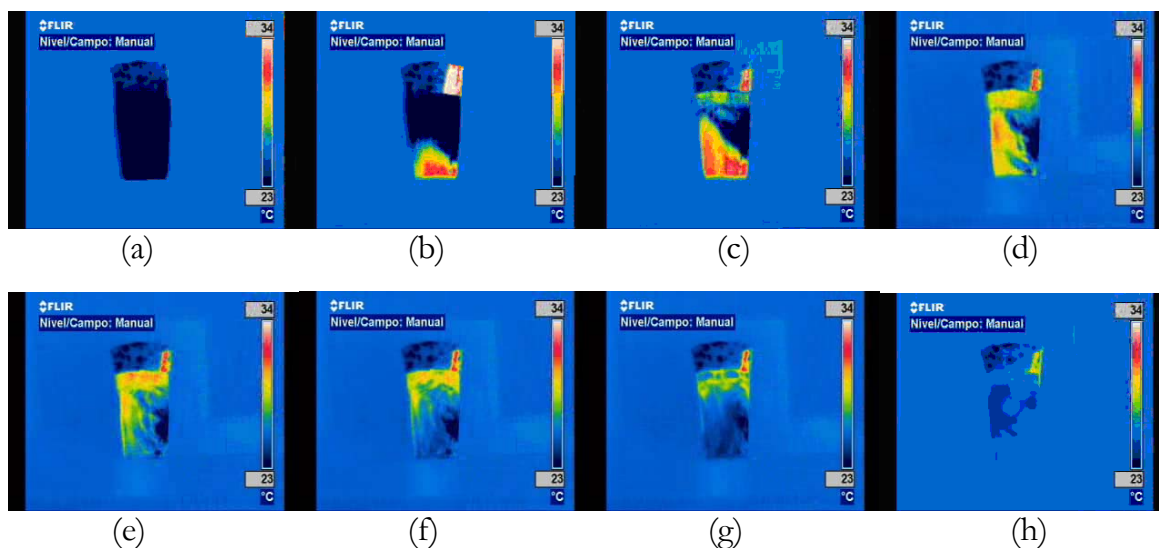


Figure 3.3 - Mistura de água quente num recipiente com água fria [extraído de Magnani et al. (2005)]

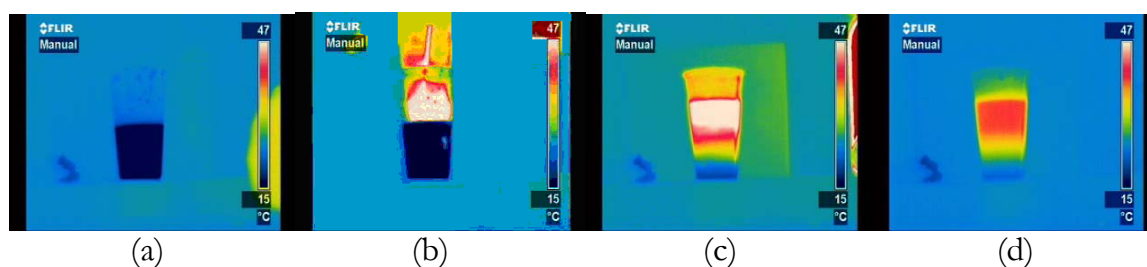


Figura 3.4 – Estratificação de água quente e de água fria [extraído de Magnani et al. (2005)]

A termografia também pode ser utilizada na detecção de umidade em edificações e no controle de secagem industrial ou natural de gesso. Magnani et al. (2005) apresentaram a visualização das imagens térmicas do processo de secagem de uma placa de gesso de 10x10x2 cm, ilustrado na Figura 3.5(a)-(g). Foi feito um furo na face superior da placa para que a água pudesse ser inserida. Primeiramente a placa foi exposta a uma corrente de ar frio, paralela à placa e no sentido da esquerda para a direita, até o equilíbrio térmico ser alcançado, ilustrado na Figura 3.5(a). A água foi colocada no furo e após alguns minutos foi realizado um termograma, Figura 3.5(b). Após cerca de 40 minutos, a corrente de ar frio foi substituída por uma corrente de ar quente. A Figura 3.5(c) e a Figura 3.5(d) ilustram termogramas após 6 e 26 minutos, respectivamente, a corrente de ar quente. Cerca de 40 minutos depois da troca pela corrente de ar quente, a corrente de ar frio foi novamente colocada. Os termogramas da Figura 3.5(e) e da Figura 3.5(f) foram realizados após 20 e 100 segundos, respectivamente, a corrente de ar frio. A superfície da placa completamente seca é ilustrada na Figura 3.5(g).

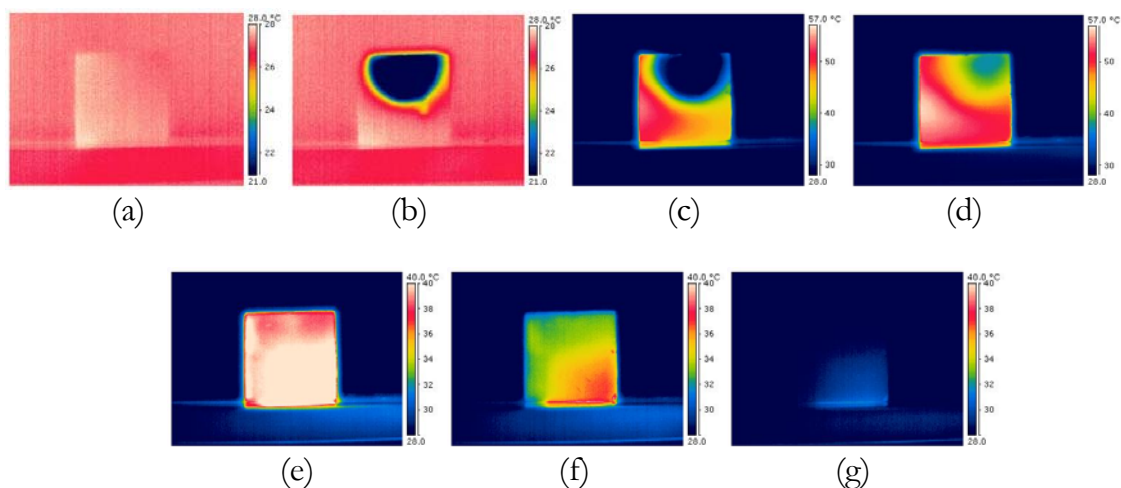


Figura 3.5 – Secagem de uma placa de gesso [extraído de Magnani et al. (2005)]

Baukal (2001) afirma que a termografia não é uma técnica adequada para chamas (visualização e medição de temperatura), mas pode ser usada para análise da integridade de peças e de refratários. Apesar disso, Almeida et al. (2006) apresentaram bons resultados de visualização da chama do gás natural através de termografia de infravermelho. Foram realizados experimentos com duas misturas ar-combustível: próxima da estequiométrica e rica. Aqui serão apresentados os resultados obtidos com a mistura próxima da estequiométrica. A Figura 3.6(a) ilustra a imagem óptica da chama sem adição de partículas. A chama não pode ser visualizada completamente e necessita de um artifício para melhorar a visibilidade. A Figura 3.6(b) mostra a imagem óptica da chama com a mesma mistura da Figura 3.6(a), mas com adição de partículas de gesso. Percebe-se que a imagem óptica da chama com a adição de partículas sólidas na região de mistura ar-combustível é melhorada. A Figura 3.6(c) ilustra a imagem térmica da chama sem adição de particulados, onde o formato e os detalhes da chama podem ser observados com clareza.

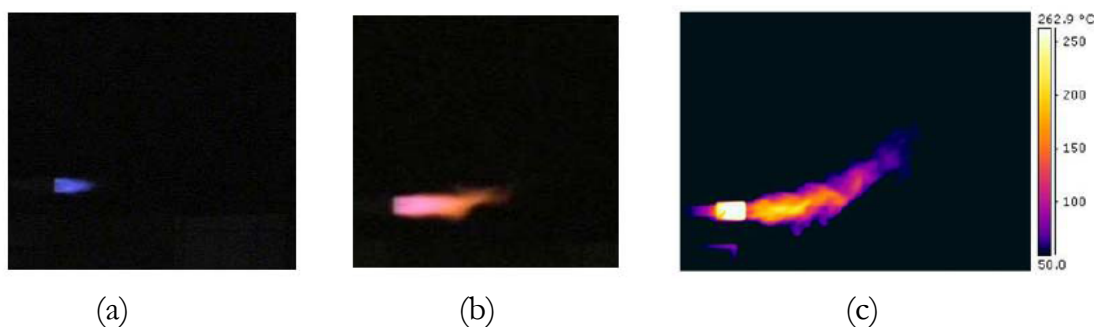


Figura 3.6 – Imagens da chama do gás natural numa mistura ar-combustível próxima da estequiométrica (a) Imagem óptica sem adição de partículas (b) Imagem óptica com adição de partículas de gesso (c) Imagem térmica sem adição de partículas [extraído de Almeida et al. (2006)]

Bezerra et al. (2006) realizaram experimentos com uma câmera de infravermelho e um gerador de radiação. Foram realizadas várias medições em temperaturas e distâncias diferentes. Os resultados obtidos foram que o erro na leitura de temperatura pela câmera aumenta à medida que a distância entre objeto e equipamento aumenta. Também foi constatado que, mantendo-se constantes a temperatura do gerador e a distância deste até a

câmera e variando-se a posição do sensor da câmera em relação ao gerador de radiação ou a posição do gerador em relação ao sensor da câmera, os valores medidos apresentaram pequenas diferenças.

3.2 Aplicações na Engenharia

Albuquerque (2005) apresentou uma análise de um refrigerador que funciona com o par frigorífico sílica gel – água e utiliza a energia solar como fonte de energia. Foram realizados termogramas das partes constituintes do refrigerador solar: coletor (ou reator), condensador e evaporador. As imagens térmicas permitiram a visualização da distribuição de temperatura de: (a) tubulações do coletor num horário em que estavam aquecidas, (b) tubulações do condensador sem a água de refrigeração, e (c) parede externa do evaporador que refletia muita radiação do ambiente.

A realização de imagens térmicas pode ser aplicada em áreas da engenharia onde é necessário um acompanhamento do aquecimento, ou resfriamento, de processos ou equipamentos. Também podem ser utilizadas para analisar a integridade de isolamentos térmicos de tubulações. Castelletti (2005) apresentou uma análise experimental de um grupo gerador a gás natural. Termografias realizadas no motor permitiram fazer um levantamento do aquecimento do coletor de gases. A temperatura variou de 34 °C (com motor desligado) a 446 °C (motor ligado com carga nominal de 28 kW) em 15 minutos. Após 23 minutos, a temperatura estabiliza em 460 °C. Através de termogramas, foi possível constatar que a temperatura externa do tubo de exaustão mantém-se baixa devido ao isolamento térmico da fibra de vidro, proporcionando uma redução da troca de calor no interior da cabine do motor, importante em sistemas de cogeração onde perdas de calor representam prejuízo energético.

Castelletti et al. (2005) apresentaram algumas análises termográficas de um grupo gerador a gás natural. Termogramas do bloco do motor mostraram que a sua temperatura é alta, como ilustra a Figura 3.7(b), chega a mais de 400 °C. As perdas de calor através das paredes da cabine não foram calculadas. Mas um estudo qualitativo dessas perdas foi realizado através de termografias. Na Figura 3.7(a), uma imagem térmica mostra que a região superior da parede frontal da cabine apresentou uma temperatura elevada devido à presença da estrutura metálica da cabine que não tem isolamento e conduz o calor do bloco do motor à parede. As temperaturas das outras paredes permaneceram menores porque estavam bem isoladas.

Normalmente em países de clima temperado a termografia pode ser utilizada para detectar infiltrações em edificações com condicionamento de ar por causa da grande diferença de temperaturas entre o interior (24 °C) e o exterior (< 5 °C). Já em países tropicais essa diferença é muito pequena (24 °C no interior e 30 °C no exterior) para identificar infiltrações de maneira eficaz através da termografia. Magnani et al. (2005) apresentaram uma imagem térmica, ilustrada na Figura 3.8, de uma câmara frigorífica com uma fresta quase invisível entre a porta e a parede. Apesar de estar num país tropical, o termograma da câmara permitiu a visualização da entrada de calor através da fresta porque a diferença de temperatura entre o ambiente interior e o exterior era grande.

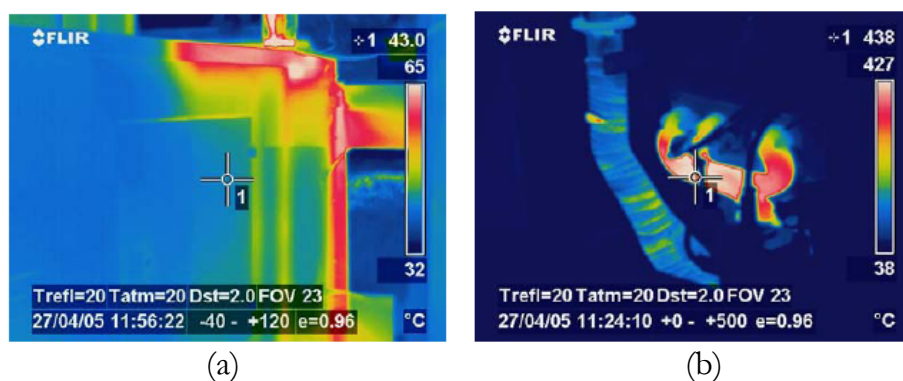


Figura 3.7 – Termogramas do grupo gerador (a) parede externa da cabine (b) bloco do motor e tubo de exaustão [extraído de Castelletti et al.(2005)]

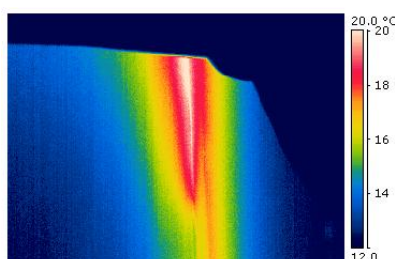


Figura 3.8 – Infiltração de ar quente em câmara frigorífica [extraído de Magnani et al. (2005)]

Magnani et al. (2005) apresentaram uma aplicação da termografia na detecção de descolamento de pastilhas. A área em destaque na Figura 3.9 indica uma região da fachada de uma edificação onde estava ocorrendo o descolamento do revestimento. A temperatura mais elevada da área com problema se deve ao fato de o ar funcionar como isolante e não permitir que o calor da radiação solar seja transferido para o concreto.



Figura 3.9 – Visualização de descolamento de pastilhas em fachada [extraído de Magnani et al. (2005)]

Em instalações elétricas, um dispositivo desgastado ou com problemas no funcionamento pode provocar interrupção do circuito de uma instalação. O início do processo de desgaste é marcado pelo aumento da temperatura do dispositivo. A realização de imagens térmicas periódicas em instalações elétricas pode fazer parte de programas de manutenção preventiva e preditiva, para evitar paradas indesejadas de circuitos. Da Silva et al. (2006a) apresentaram um exemplo de ensaio não destrutivo para identificar pontos

aquecidos anormalmente. A Figura 3.10(b) ilustra o termograma de um poste de rede de distribuição que apresenta uma chave-fusível com problema. O dispositivo com anomalia deve ter sua troca programada porque apresenta uma temperatura mais elevada do que os demais. Essa aplicação da termografia é bastante utilizada no Brasil por empresas geradoras e distribuidoras de energia elétrica, e em instalações onde uma parada inesperada pode causar grandes danos financeiros.

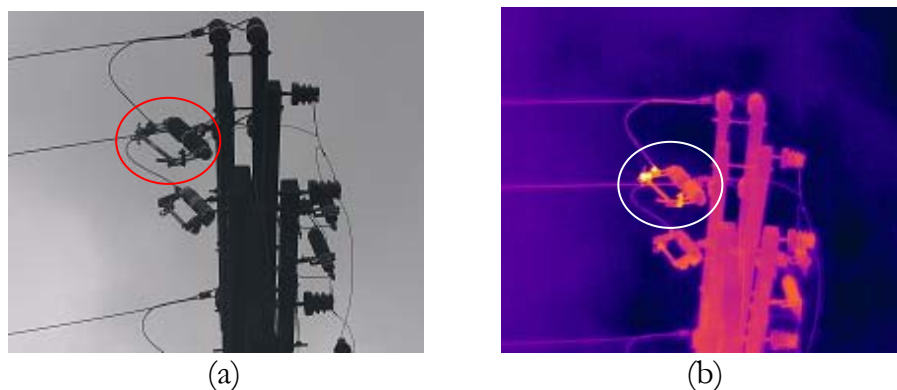


Figura 3.10 – Detecção de pontos quentes em instalações elétricas (a) Imagem óptica (b) Termograma [extraído de da Silva et al. (2006a)]

Como citado anteriormente, a termografia pode ser usada na detecção de umidade em edificações. A presença de água na estrutura de uma edificação pode provocar um desgaste acelerado das ferragens devido à oxidação das mesmas. Da Silva et al. (2006a) apresentaram um caso onde a umidade pode ser visualizada no estado inicial através de um termograma, como ilustrado na Figura 3.11(b), e está em um estágio que ainda não é visível ao olho humano (Figura 3.11(a)). A visualização desse fenômeno se deve ao fato de a água provocar uma diminuição na temperatura da região onde se encontra pelo resfriamento evaporativo. O olho humano só consegue perceber a umidade quando a água já está bem infiltrada na estrutura.

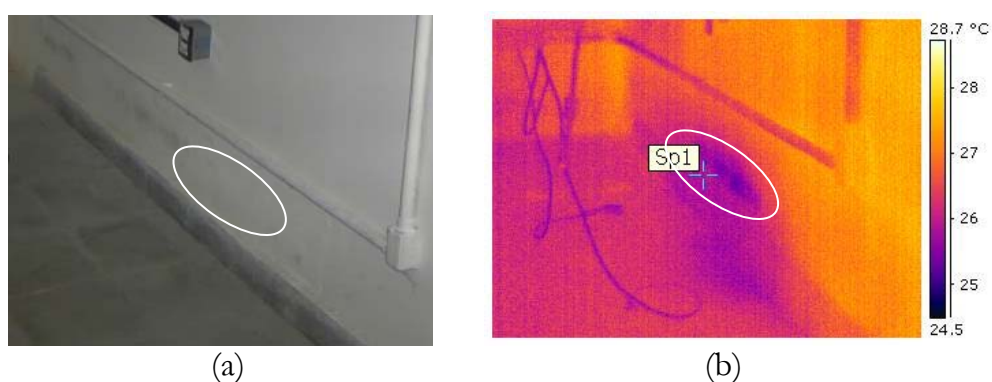


Figura 3.11- Detecção de umidade em edificações (a) Imagem óptica (b) Termograma [extraído de da Silva et al. (2006a)]

3.3 Aplicações na Medicina

A termografia também pode ser usada para medir a distribuição de temperatura na pele de um paciente. A vantagem de sua utilização na área médica é de ser uma análise não-invasiva e de não usar radiações ionizantes para a identificação de algumas doenças. Araújo et al. (2006) apresentaram um estudo da possibilidade de detecção de diferentes patologias através de imagens térmicas. O organismo humano controla a transferência de calor para o ambiente através da termorregulação, contraindo ou dilatando vasos que alteram a irrigação da pele. Esse órgão tem a sua circulação dependente do sistema nervoso autônomo. Alterações na temperatura corporal têm forte relação com doenças. Enquanto exames como raios-X ou ultra-som fazem uma análise da anatomia de determinada região do organismo, a termografia permite uma análise fisiológica. Doenças vasculares, distúrbios de tireóide, tendinites e nódulos mamários são patologias que alteram a perfusão sanguínea de uma região da pele e podem ser detectadas através de termogramas. A Figura 3.12, ainda segundo Araújo et al. (2006), ilustra uma paciente com carcinoma de Paget, onde se percebe uma grande alteração na vascularização da mama esquerda devido à presença da doença.

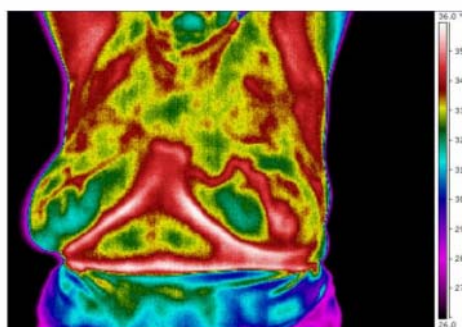


Figura 3.12 – Termografia de paciente com carcinoma de Paget [extraído de Araújo et al. (2006)]

Outra patologia que pode ser detectada por termografia é a presença de nódulos na tireóide. Araújo et al. (2006) apresentaram imagens térmicas de uma mulher jovem com histórico de problemas na tireóide. Os termogramas da Figura 3.13(a)-(d) foram realizados após o resfriamento da região do pescoço. Pode-se observar um aquecimento desigual entre as áreas simétricas provocado pela presença de nódulo.

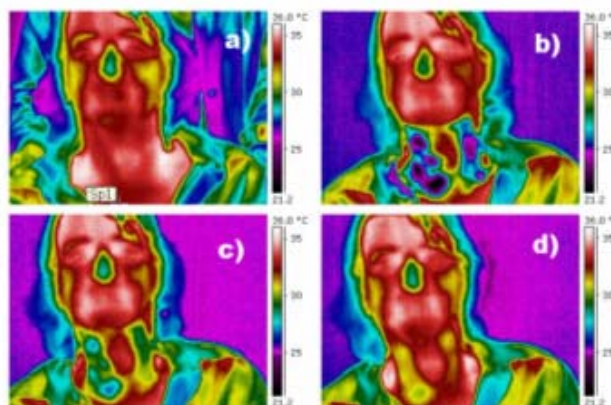


Figura 3.13 - Termogramas da tireóide. (a) Antes do resfriamento (b) Imediatamente após o resfriamento (c) 1 minuto após o resfriamento (d) 3,5 minutos após o resfriamento [extraído de Araújo et al. (2006)]

3.4 Detecção de Falhas em Monumentos Históricos

Na área de preservação de monumentos é grande o esforço em pesquisas de técnicas de ensaios não-destrutivos que possam fornecer informações a respeito das edificações. A termografia aparece como uma ferramenta útil na detecção de falhas que possam causar um gradiente de temperatura na superfície de paredes e fachadas de construções antigas. Lima et al. (2006) apresentaram imagens do arco da fachada de uma igreja. Observando no termograma, Figura 3.14(b), é possível identificar uma área mais escura. Essa área não possui uma temperatura igual ao restante do arco devido à utilização de um material diferente do original quando da ocorrência de uma intervenção.



Figura 3.14 – Imagens de detalhe de arco de uma igreja (a) Imagem Óptica (b) Termograma [extraído de Lima et al. (2006)]

Lima et al. (2006) também apresentaram imagens de um detalhe do portal de uma igreja, ilustradas na Figura 3.15(a)-(b). Comparando as imagens óptica e térmica, também se pode observar que o material parece um só na imagem óptica (Figura 3.15(a)), mas na realidade existe um material de restauro identificado pelo termograma (Figura 3.15(b)). Assim, a termografia pode ser uma técnica viável para uma inspeção rápida e geral de monumentos de um sítio histórico. Os resultados obtidos desse levantamento podem servir para os programas de preservação e de manutenção de edificações antigas.

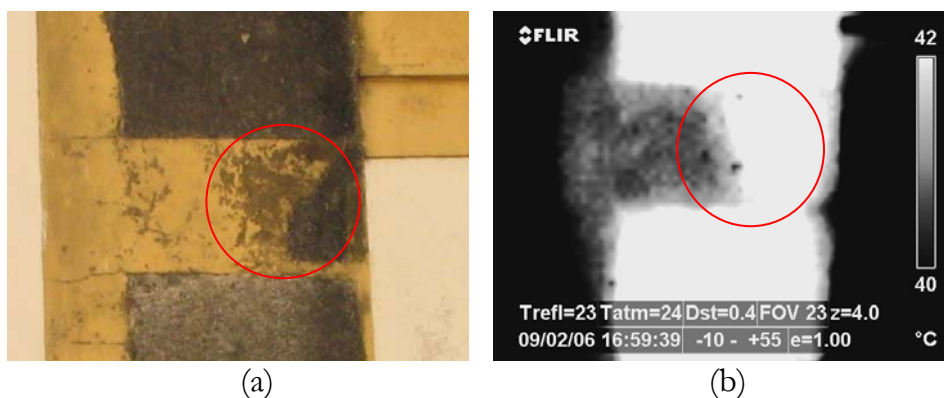


Figura 3.15 – Imagens de detalhe de portal de uma igreja (a) Imagem Óptica (b) Termograma [extraído de Lima et al. (2006)]

3.5 Detecção de Perdas Energéticas em Fornos Industriais

O conhecimento do comportamento de fornos industriais é muito importante para a indústria de base. A necessidade de se obter produtos de maior qualidade e com menores custos de produção leva a uma busca constante por equipamentos industriais mais eficientes. Da Silva et al. (2006b) apresentaram algumas análises termográficas de um forno de aquecimento de tarugos. Foi mostrado que a realização de imagens térmicas da parede externa do forno permitiu a detecção de áreas mais aquecidas que não foram identificadas em inspeção visual, como ilustra a Figura 3.16(a)-(b). Essas regiões de perda de calor são resultado de desgaste no revestimento refratário do equipamento e representam perdas de energia desnecessárias. A partir das informações dos termogramas, essas perdas foram quantificadas através de um programa computacional. Também foi realizado o balanço global energético do forno, onde as perdas detectadas por termografia não são consideradas e a temperatura da parede externa do forno é constante. Os resultados mostraram que as perdas energéticas (em Watt) determinadas com os dados das imagens térmicas representaram uma parcela de 2,1% em relação às perdas calculadas pelo balanço global.

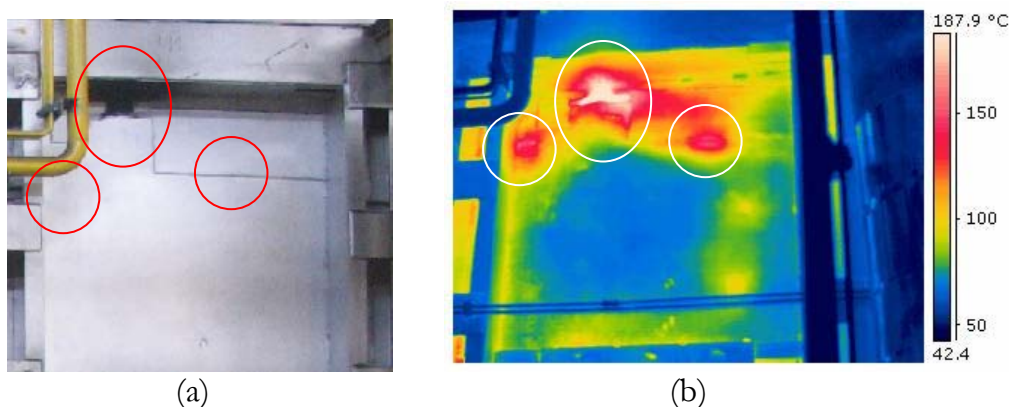


Figura 3.16 – Imagens da parede externa de um forno industrial (a) Imagem óptica (b) Termograma [extraído de da Silva et al. (2006b)]

A distância é um parâmetro muito importante a ser informado à câmera de infravermelho para que ela possa calcular a atenuação da radiação vinda do objeto estudado. Como apresentado por Bezerra et al. (2006) a distância influencia no valor de temperatura calculado pela câmera por causa da atenuação do meio. Outra análise termográfica apresentada por da Silva et al. (2006b) foi em relação à influência da distância de realização de termogramas na área de cada *pixel*. Com o objetivo de analisar qual a influência da distância na qualidade da imagem térmica foram realizadas imagens em duas distâncias da parede externa do forno: 3 m e 7 m. A Figura 3.17 ilustra o termograma realizado à distância de 7 m. Já na Figura 3.18(a)-(d) são mostradas as imagens feitas à distância de 3 m, que juntas formaram um mosaico com área equivalente à da Figura 3.17. As perdas de energia foram calculadas para as imagens na distância menor e na maior. A perda de calor (em Watt) a partir do termograma da Figura 3.17 ficou 15,38% maior do que a soma das perdas calculadas para os termogramas da Figura 3.18(a)-(d). Os resultados mostraram que à medida que a distância aumentou houve uma diferença na taxa de transferência de calor calculada. A distâncias menores é possível uma visualização de gradientes de temperatura bem definidos. Isto não ocorre quando a

distância aumenta e a temperatura passa a ser uma média dos valores que seriam obtidos em um afastamento menor.



Figura 3.17 – Termograma da área captada a 7 m do forno [extraído de da Silva et al. (2006b)]

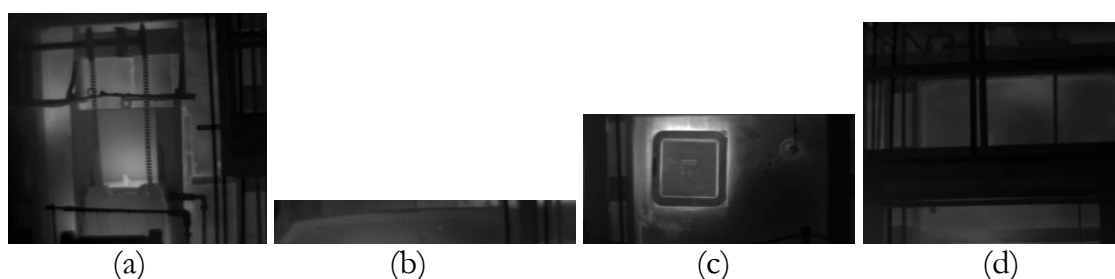


Figura 3.18 – Termogramas das áreas captadas a 3 m do forno [extraído de da Silva et al. (2006b)]

3.6 Relatórios de Inspeções Termográficas

Inspeções termográficas em instalações industriais podem ser muito úteis na detecção precoce de avarias. A partir de imagens térmicas podem ser detectados problemas em dispositivos e em equipamentos através de um aquecimento anormal dos mesmos. Magnani e da Silva (2006b) apresentaram um relatório de inspeção termográfica de uma caldeira. A Figura 3.19 apresenta um modelo do relatório desenvolvido pelo GET. Foram realizados vários termogramas que mostraram as regiões do equipamento com aquecimento anormal. Analisando a imagem térmica da Figura 3.19, percebe-se uma região mais aquecida. Observando a imagem óptica correspondente, não é possível identificar nenhuma anormalidade superficial que indique problemas. Provavelmente, existia um desgaste no isolamento térmico e o equipamento estava perdendo energia desnecessariamente.

Alguns cuidados devem ser tomados quando da realização de uma inspeção termográfica numa indústria: (a) verificação dos horários de funcionamento dos equipamentos que serão inspecionados, (b) conhecer o processo a ser analisado, (c) elaboração prévia do croqui do local para facilitar as anotações, (d) ajustar a faixa de temperatura (gama) da câmera de infravermelho para os níveis esperados. A Figura 3.19 ilustra os dados solicitados pelo formulário. A quantidade de dados coletados em campo depende da instrumentação disponível, como termopares, termômetros (de bulbo seco e de globo), anemômetros, higrômetros, luxímetros e decibelímetros. Quanto maior for o número de informações, mais precisas serão as temperaturas informadas pela câmera de

infravermelho e maior será o conhecimento das condições do ambiente que envolve o equipamento estudado.

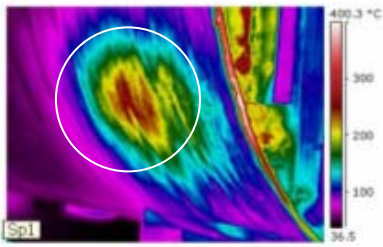
 Grupo de Engenharia Térmica da UFPE Dept. Engenharia Mecânica – Centro de Tecnologia Av. Acad. Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE CEP: 507 40-530 Fone: (81) 2 125.8231 fax/fax 212 	
RELATÓRIO de INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA	
Cliente: FriCalor	Código:
Setor:	Período:
Local:	
Contato:	
Termovisor: ThermoCAM S-45 Flir Systems	
Nº Item do Roteiro:	Data:
Local:	
Equipamento Inspeccionado: Caldeira ATA 20	
Descrição: Lado B (perdas localizadas)	
Termograma: 	Imagem Ótica: 
Dados de Campo:	Dados Especiais:
Horário da Medição:	Clima:
Distância:	Orientação:
Temperatura Medida por Termopar (°C):	Inclinação do Objeto:
Temperatura Ambiente (°C):	Ângulo de Medição (em rel. a normal do objeto):
Aquecimento Máximo (°C):	Temperatura de Globo (°C):
Velocidade do Ar (m/s):	Iluminância (lux):
Umidade Relativa (%):	Nível de Pressão Sonora (m):
Gama: 0-500 °C	Irradiação Solar:
Classificação:	
Ação a ser tomada:	
Observações:	

Figura 3.19 – Modelo de relatório de inspeção termográfica [extraído de Magnani e da Silva (2006b)]

4. ESQUEMA NUMÉRICO

Inicialmente serão apresentadas uma visão geral de como são tratados os problemas de condução e as ferramentas que foram utilizadas no presente trabalho. O objetivo deste capítulo é apresentar um modelo matemático e sua discretização para a solução de um problema de condução de calor tridimensional e transiente de placas de gesso, sem geração interna de calor e com convecção e radiação nas faces da placa. Quatro programas computacionais foram desenvolvidos: o primeiro foi o *ExtraiTermo* para o tratamento das imagens térmicas e será descrito no Capítulo 5; o segundo para resolver um problema de condução de calor tridimensional e transiente e comparar os resultados da simulação com dados experimentais extraídos de termogramas; o terceiro para fazer comparações entre resultados de simulações, e finalmente o quarto para comparar dados de termogramas. Os programas foram usados conjuntamente com a solução do problema de condução de calor na determinação de parâmetros termofísicos de materiais e na identificação da geometria de falhas inclusas em materiais opacos através de termografia.

4.1 Visão Geral

Para a resolução de um problema físico ou de engenharia, é feita a modelagem matemática do problema através da aplicação das leis da conservação, de equações constitutivas e das condições de contorno. As equações diferenciais resultantes da modelagem podem ser resolvidas analítica ou numericamente. Normalmente, os métodos analíticos são aplicados a geometrias e condições de contorno simples que se distanciam dos problemas complexos encontrados na engenharia. Os métodos numéricos resolvem sistemas de equações diferenciais e podem ser aplicados em problemas que não possuem solução analítica. A Figura 4.1 ilustra as ferramentas para a resolução de problemas físicos e de engenharia.

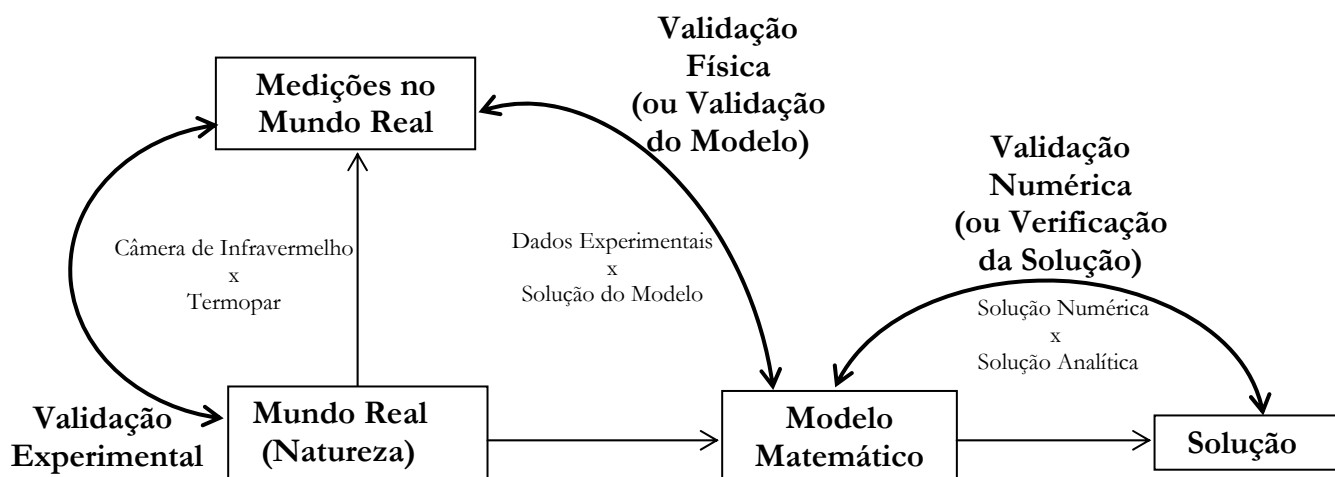


Figura 4.1 – Ferramentas para solução de problemas físicos e de engenharia

Neste trabalho não foram utilizadas todas as ferramentas para a resolução de problemas. Foram feitas as medições no mundo real (placas de gesso) e a modelagem matemática das mesmas. Os dados experimentais das medições foram comparados com a solução do modelo para a validação física do método proposto, que se mostrou muito bom para o caso estudado. O problema não foi resolvido analiticamente porque os interesses maiores foram o tratamento e a extração de dados das imagens térmicas e a obtenção de uma solução numérica geral para a determinação de parâmetros termofísicos e geométricos.

Existia a intenção de efetuar medições da temperatura interna das amostras com termopares, tendo como objetivo a validação experimental do método apresentado, mas este procedimento apresentou muitas dificuldades (os termopares inseridos nas amostras funcionaram como aletas impedindo a correta medição de temperatura), e o foco permaneceu na aquisição de temperatura por infravermelho.

Em resumo, foram realizados: (a) experimentos com medições da distribuição de temperatura superficial através de termografia de duas amostras, uma apenas de gesso e outra de gesso com uma inclusão (ou defeito) metálica; (b) a simulação numérica do resfriamento das amostras; e (c) a comparação entre os dados experimentais das imagens térmicas e os resultados da simulação numérica, para a determinação de parâmetros termofísicos e geométricos.

O modelo matemático e o problema numérico serão apresentados neste Capítulo 4, e os experimentos e as comparações encontram-se no Capítulo 5.

4.2 Problema Analítico

O problema resolvido refere-se à condução de calor numa placa de gesso, que pode ter um cilindro de aço incrustado para simular uma falha, conforme geometria ilustrada na Figura 4.2. Embora o modelo e os programas sejam gerais, ou seja, para um cilindro de qualquer material incluso em um paralelepípedo do mesmo ou de outro material, serão usados, como exemplo os materiais e as dimensões das amostras experimentais.

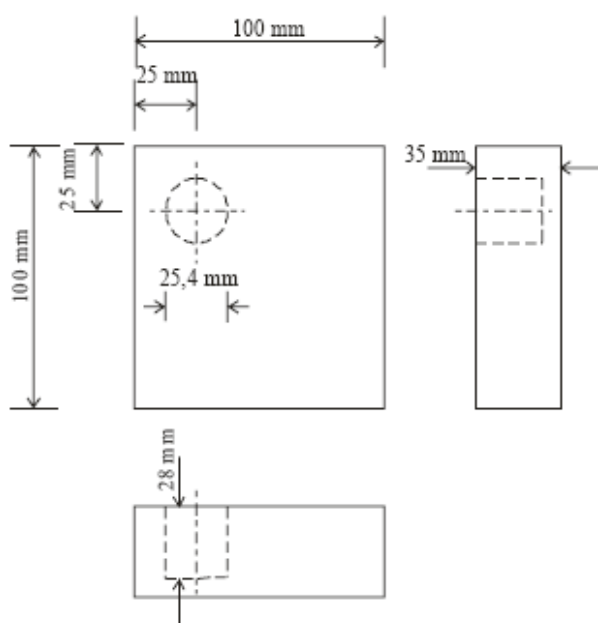


Figura 4.2 – Geometria da placa de gesso com um cilindro de aço incrustado

A equação da condução de calor tridimensional transiente governa o problema e é representada pela Equação 4.1.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad [W] \quad (4.1)$$

onde:

- ρ = Massa específica (kg/m³);
- c = Calor específico (J/kg.K);
- T = $T(x,y,z,t)$ = Temperatura (K);
- t = Tempo (s);
- k = Condutividade térmica (W/m.K).

Considerando k , ρ e c como sendo constantes, uniformes e isotrópicos, a Equação 4.1 é simplificada e se transforma na Equação 4.2.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \\ \\ \text{Para a equação acima serão consideradas as condições a seguir:} \\ \\ \text{Condição Inicial} \\ \\ T(x,y,z,0) = T_{ini}(x,y,z) \\ \\ \text{Condições de Contorno} \\ \\ \text{em } x=0 \text{ e } t>0: -\frac{\partial T}{\partial x} + h(y,z,t)T(0,y,z,t) = h(y,z,t)T_{\infty}(y,z,t) \\ \\ \text{em } x=L_x \text{ e } t>0: \frac{\partial T}{\partial x} + hT(L_x,y,z,t) = h(y,z,t)T_{\infty}(y,z,t) \\ \\ \text{em } y=0 \text{ e } t>0: -\frac{\partial T}{\partial y} + hT(x,0,z,t) = h(y,z,t)T_{\infty}(y,z,t) \\ \\ \text{em } y=L_y \text{ e } t>0: \frac{\partial T}{\partial y} + hT(x,L_y,z,t) = h(y,z,t)T_{\infty}(y,z,t) \\ \\ \text{em } z=0 \text{ e } t>0: -\frac{\partial T}{\partial z} + hT(x,y,0,t) = h(y,z,t)T_{\infty}(y,z,t) \\ \\ \text{em } z=L_z \text{ e } t>0: \frac{\partial T}{\partial z} + hT(x,y,L_z,t) = h(y,z,t)T_{\infty}(y,z,t) \end{array} \right. \quad (4.2)$$

onde:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad = \text{Difusividade térmica (m}^2/\text{s)};$$

h = Coeficiente de transferência de calor (W/m².K).

T_{∞} = Temperatura ambiente (K).

Serão considerados os efeitos de transferência de calor por convecção e por radiação no cálculo do h .

Apesar de poderem variar no espaço e no tempo, serão escritos apenas T_{ini} , h e T_{∞} por motivo de brevidade. Nos experimentos T_{ini} e T_{∞} foram considerados constantes.

Em resumo, foram feitas as seguintes considerações:

1. Transferência de calor tridimensional;
2. Regime transiente;
3. Modos de transferência de calor:
 - a. Condução (ao longo da placa);
 - b. Convecção (da placa para a vizinhança);
 - c. Radiação (da placa para a vizinhança);
4. Sem geração de energia interna;
5. k , ρ e c são constantes e uniformes e isotrópicos.

4.3 Problema Numérico

Para a obtenção das equações aproximadas foi utilizado o Método dos Volumes Finitos (MVF), baseado em Maliska (2004). O MVF transforma uma equação diferencial parcial num sistema de equações lineares a serem resolvidas simultaneamente, e é baseado em um balanço de energia nos volumes elementares. A malha empregada no problema é regular e uniforme, em coordenadas cartesianas, conforme ilustram a Figura 4.3 (situação bidimensional) e a Figura 4.4 (situação tridimensional).

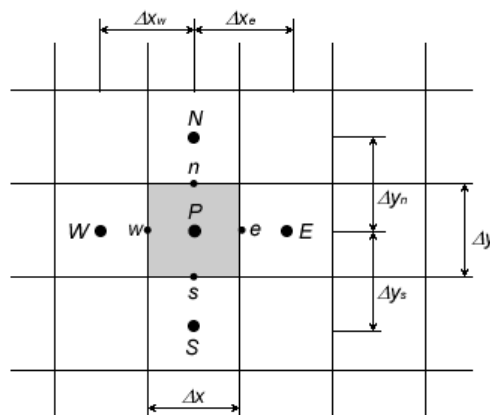


Figura 4.3 – Volume elementar e seus vizinhos. Situação bidimensional [extraído de Maliska (2004)]

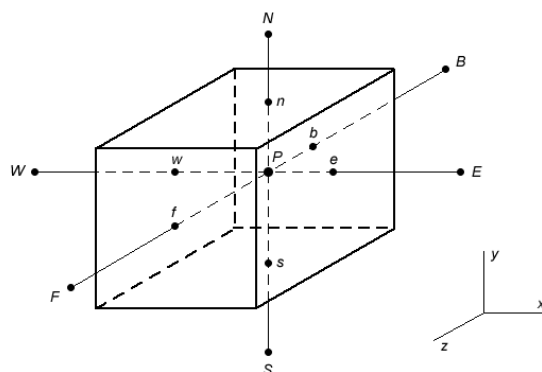


Figura 4.4 – Volume elementar e seus vizinhos. Situação tridimensional [extraído de Maliska (2004)]

Tipos de Volumes

Conforme a Figura 4.4, os nós avaliados na transferência de calor na placa de gesso são representados por letras maiúsculas de acordo com a Tabela 4.1.

Tipo de Nó	Descrição
P (point)	Volume elementar em análise
W (west)	Volume elementar à esquerda do volume em análise, sentido negativo do eixo x
E (east)	Volume elementar à direita do volume em análise, sentido positivo do eixo x
N (north)	Volume elementar ao norte do volume em análise, sentido positivo do eixo y
S (south)	Volume elementar ao sul do volume em análise, sentido negativo do eixo y
F (front)	Volume elementar à frente do volume em análise, sentido positivo do eixo z
B (behind)	Volume elementar atrás do volume em análise, sentido negativo do eixo z

Tabela 4.1 –Descrição dos tipos de volumes da malha

As superfícies de fronteira com os demais volumes elementares são representadas por letras minúsculas conforme ilustra a Tabela 4.2.

Tipo de Nó	Descrição
w (west)	Superfície limite com o volume à esquerda do volume em análise, sentido negativo do eixo x
e (east)	Superfície limite com o volume à direita do volume elementar, sentido positivo do eixo x
n (north)	Superfície limite com o volume ao norte do volume elementar, sentido positivo do eixo y
s (south)	Superfície limite com o volume ao sul do volume elementar, sentido negativo do eixo y
f (front)	Superfície limite com o volume à frente do volume elementar, sentido positivo do eixo z
b (behind)	Superfície limite com o volume atrás do volume elementar, sentido negativo do eixo z

Tabela 4.2 –Descrição dos tipos de superfícies do volume elementar

Balanço de Energia no Volume Elementar

Em relação ao volume elementar ilustrado na Figura 4.3, tem-se que:

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{Variação de} \\ \text{Energia por} \\ \text{Unidade de} \\ \text{Tempo} \end{array} \right\}_{(1)} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Energia que} \\ \text{Entra por} \\ \text{Unidade de} \\ \text{Tempo} \end{array} \right\}_{(2)} - \left\{ \begin{array}{c} \text{Energia que} \\ \text{Sai por} \\ \text{Unidade de} \\ \text{Tempo} \end{array} \right\}_{(3)}$$

$$\left\{ \right\}_{(1)} = \frac{\partial E}{\partial t} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV \quad [W] \quad (4.3)$$

onde foram feitas as seguintes considerações:

$$c = c_v = c_p \quad (\text{para sólidos e líquidos incompressíveis})$$

$$e = u = cT \quad (\text{considerando } c \text{ constante})$$

$$E = \rho e V = \rho c T V$$

e:

$$\left\{ \right\}_{(2)} - \left\{ \right\}_{(3)} = (q_x - q_{x+\Delta x}) + (q_y - q_{y+\Delta y}) + (q_z - q_{z+\Delta z}) \quad [W] \quad (4.4)$$

Expansão em Série de Taylor

$$q_{x+\Delta x} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta x + \underbrace{\frac{1}{2} \frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 q_x}{\partial x^3} \Delta x^3 + \dots}_{(4.5)}$$

Como Δx será pequeno no limite de $\Delta x \rightarrow 0$, estes termos são desprezados.

Então:

$$q_{x+\Delta x} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (4.6)$$

$$q_x - q_{x+\Delta x} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (4.7)$$

$$q_x = q''_x dydz \quad [W] \quad (4.8)$$

$$q''_x = \underbrace{q_x / dydz}_{\text{Área transversal}} \quad [W / m^2] \quad (4.9)$$

e:

$$q_x - q_{x+\Delta x} = -\frac{\partial q''_x}{\partial x} dx dydz \quad (4.10)$$

Aplicando a primeira lei da termodinâmica, representada pela Equação 4.11 juntamente com a expansão na série de Taylor temos a Equação 4.12.

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \sum q \quad (4.11)$$

$$\underbrace{\rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz dt}_{(4)} = \underbrace{-\frac{\partial q''_x}{\partial x} dx dy dz dt}_{(5)} - \underbrace{\frac{\partial q''_y}{\partial y} dx dy dz dt}_{(6)} - \underbrace{\frac{\partial q''_z}{\partial z} dx dy dz dt}_{(7)} \quad (4.12)$$

onde:

$$dx dy dz = dV$$

Para a obtenção das equações aproximadas, será realizada a integração da Equação 4.12, no espaço e no tempo, e foram feitas as seguintes considerações em cada volume elementar:

1. Temperatura uniforme no interior de cada volume;
2. q_x não varia com y e z em cada superfície de cada volume;
3. q_y não varia com x e z em cada superfície de cada volume;
4. q_z não varia com x e y em cada superfície de cada volume;

Da Equação 4.12 temos que:

$$\left\{ \right\}_{(4)} = \int_t \int_{\Delta V} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV dt = \int_t \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \Delta V dt = (\rho c)_P (T_P^{t+\Delta t} - T_P^t) \Delta V \quad (4.13)$$

onde:

$$\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$$

e:

$$\left\{ \right\}_{\textcircled{5}} = \int_t \int_{\Delta V} -\frac{\partial q_x''}{\partial x} dx dy dz dt = -\int_t (q_{xe}'' - q_{xw}'') \Delta y \Delta z dt = -(q_{xe}^{''*} - q_{xw}^{''*}) \Delta y \Delta z \Delta t \quad (4.14)$$

$$\left\{ \right\}_{\textcircled{6}} = \int_t \int_{\Delta V} -\frac{\partial q_y''}{\partial y} dx dy dz dt = -\int_t (q_{ys}'' - q_{yn}'') \Delta x \Delta z dt = -(q_{ys}^{''*} - q_{yn}^{''*}) \Delta x \Delta z \Delta t \quad (4.15)$$

$$\left\{ \right\}_{\textcircled{7}} = \int_t \int_{\Delta V} -\frac{\partial q_z''}{\partial z} dx dy dz dt = -\int_t (q_{zb}'' - q_{zf}'') \Delta x \Delta y dt = -(q_{zb}^{''*} - q_{zf}^{''*}) \Delta x \Delta y \Delta t \quad (4.16)$$

onde os termos $q_{xe}^{''*}$, $q_{xw}^{''*}$, $q_{ys}^{''*}$, $q_{yn}^{''*}$, $q_{zb}^{''*}$ e $q_{zf}^{''*}$ representam valores característicos de fluxo de calor no intervalo de tempo Δt .

E finalmente a equação geral é representada pela Equação 4.17.

$$\begin{aligned} T_p^{t+\Delta t} - T_p^t = & q_{xw}^{''*} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta x} - q_{xe}^{''*} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta x} + q_{ys}^{''*} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta y} - q_{yn}^{''*} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta y} + \\ & + q_{zb}^{''*} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta z} - q_{zf}^{''*} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta z} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Para resolver o fato da Equação 4.17 apresentar duas incógnitas, será aplicada a “Lei de Fourier”, onde se tem uma relação entre as variáveis q'' e T , nos volumes centrais; e a “Lei de Fourier” com as condições de contorno do problema nos volumes de fronteira. As equações obtidas para os volumes centrais serão diferentes daquelas para os volumes de fronteira.

Para Volumes Centrais:

Serão apresentados apenas os termos relativos às superfícies **e** e **w**, pois estas têm comportamentos diferentes em relação ao fluxo de calor na direção do eixo x. Para os eixos y e z o procedimento é mesmo.

Superfície e de um volume central

$$q_{xe}^{''*} = -k_p \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{e^-}^* = -k_e \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{e^+}^* \quad (4.18)$$

Fazendo uma aproximação linear das derivadas da Equação 4.18, tem-se a Equação 4.19.

$$-k_p \frac{T_e^* - T_p^*}{(\Delta x/2)} = -k_E \frac{T_E^* - T_e^*}{(\Delta x/2)} \quad (4.19)$$

E a partir de manipulação algébrica chega-se à Equação 4.20.

$$T_e^* = \frac{k_E T_E^* + k_p T_p^*}{k_p + k_E} \quad (4.20)$$

Substituindo a Equação 4.20 na Equação 4.18 e multiplicando por $\frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta x}$, tem-se a Equação 4.21.

$$-q_{xe}^{**} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta x} = \underbrace{\frac{2\Delta t}{\rho_p c_p \Delta x^2} \frac{(k_p k_E)}{(k_p + k_E)} [T_E^* - T_p^*]}_{A_E} \quad (4.21)$$

Onde A_E é o coeficiente para o volume E.

Superfície w de um volume central

$$q_{xw}^{**} = -k_p \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{w^+}^* = -k_w \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{w^-}^* \quad (4.22)$$

$$-k_p \frac{T_p^* - T_w^*}{(\Delta x/2)} = -k_w \frac{T_w^* - T_W^*}{(\Delta x/2)} \quad (4.23)$$

E a partir de manipulação algébrica chega-se à Equação 4.24.

$$T_w^* = \frac{k_w T_W^* + k_p T_p^*}{k_p + k_w} \quad (4.24)$$

Substituindo a Equação 4.24 na Equação 4.22 e multiplicando por $\frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta x}$, tem-se a Equação 4.25.

$$q_{xw}^{**} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta x} = \underbrace{\frac{2\Delta t}{\rho_p c_p \Delta x^2} \frac{(k_p k_w)}{(k_p + k_w)} [T_W^* - T_p^*]}_{A_W} \quad (4.25)$$

Onde A_W é o coeficiente para o volume W.

Fazendo o mesmo para as superfícies **n**, **s**, **f** e **b**, tem-se:

$$-q_{yn}^{**} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta y} = \underbrace{\frac{2\Delta t}{\rho_p c_p \Delta y^2} \frac{(k_p k_N)}{(k_p + k_N)}}_{A_N} [T_N^* - T_p^*] \quad (4.26)$$

Onde A_N é o coeficiente para o volume N.

$$q_{ys}^{**} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta y} = \underbrace{\frac{2\Delta t}{\rho_p c_p \Delta y^2} \frac{(k_p k_S)}{(k_p + k_S)}}_{A_S} [T_S^* - T_p^*] \quad (4.27)$$

Onde A_S é o coeficiente para o volume S.

$$q_{zb}^{**} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta z} = \underbrace{\frac{2 \cdot \Delta t}{\rho_p c_p \Delta z^2} \frac{(k_p k_B)}{(k_p + k_B)}}_{A_B} [T_B^* - T_p^*] \quad (4.28)$$

Onde A_B é o coeficiente para o nó B.

$$-q_{zf}^{**} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta z} = \underbrace{\frac{2\Delta t}{\rho_p c_p \Delta z^2} \frac{(k_p k_F)}{(k_p + k_F)}}_{A_F} [T_F^* - T_p^*] \quad (4.29)$$

Onde A_F é o coeficiente para o volume F.

Então se chega à equação geral para os volumes elementares centrais, representada pela Equação 4.30.

$$\begin{aligned} T_p^{t+\Delta t} - T_p^t = & A_W [T_W^* - T_p^*] + A_E [T_E^* - T_p^*] + A_S [T_S^* - T_p^*] + \\ & + A_N [T_N^* - T_p^*] + A_F [T_F^* - T_p^*] + A_B [T_B^* - T_p^*] \end{aligned} \quad (4.30)$$

onde:

$$A_E = \frac{2\Delta t}{\rho_p c_p \Delta x^2} \frac{(k_p k_E)}{(k_p + k_E)}$$

$$A_W = \frac{2\Delta t}{\rho_p c_p \Delta x^2} \frac{(k_p k_W)}{(k_p + k_W)}$$

$$A_N = \frac{2 \cdot \Delta t}{\rho_P c_P \Delta y^2} \frac{(k_P k_N)}{(k_P + k_N)}$$

$$A_S = \frac{2 \Delta t}{\rho_P c_P \Delta y^2} \frac{(k_P k_S)}{(k_P + k_S)}$$

$$A_B = \frac{2 \Delta t}{\rho_P c_P \Delta z^2} \frac{(k_P k_B)}{(k_P + k_B)}$$

$$A_F = \frac{2 \Delta t}{\rho_P c_P \Delta z^2} \frac{(k_P k_F)}{(k_P + k_F)}$$

Agrupando os termos na Equação 4.30:

$$\begin{aligned} T_P^{t+\Delta t} - T_P^t = & -T_P^* (A_W + A_E + A_S + A_N + A_F + A_B) + \\ & + A_W T_W^* + A_E T_E^* + A_N T_N^* + A_S T_S^* + A_F T_F^* + A_B T_B^* \end{aligned} \quad (4.31)$$

ou :

$$T_P^{t+\Delta t} - T_P^t = -T_P^* A + A_W T_W^* + A_E T_E^* + A_N T_N^* + A_S T_S^* + A_F T_F^* + A_B T_B^* \quad (4.32)$$

onde:

$$A = (A_W + A_E + A_S + A_N + A_F + A_B)$$

É utilizada a formulação implícita para o cálculo do valor característico de temperatura no intervalo de tempo, e o símbolo * é usado para representar esse valor. Em geral:

$$T^* = [\beta T^{t+\Delta t} + (1-\beta)T^t] \quad (4.33)$$

Sendo β um peso que determina o ponto do intervalo de tempo onde serão calculados os valores característicos de temperaturas.

Substituindo-se os termos com o sobrescrito *, na forma da Equação 4.33, na Equação 4.32, tem-se:

$$\begin{aligned} T_P^{t+\Delta t} - T_P^t = & -A[\beta T_P^{t+\Delta t} + (1-\beta)T_P^t] + A_W[\beta T_W^{t+\Delta t} + (1-\beta)T_W^t] + \\ & + A_E[\beta T_E^{t+\Delta t} + (1-\beta)T_E^t] + A_N[\beta T_N^{t+\Delta t} + (1-\beta)T_N^t] + \\ & + A_S[\beta T_S^{t+\Delta t} + (1-\beta)T_S^t] + A_F[\beta T_F^{t+\Delta t} + (1-\beta)T_F^t] + \\ & + A_B[\beta T_B^{t+\Delta t} + (1-\beta)T_B^t] \end{aligned} \quad (4.34)$$

Isolando todos os termos em t da Equação 4.34 no termo S_P , tem-se a Equação 4.35.

$$\begin{aligned}
A_P T_P^{t+\Delta t} = & \beta A_W T_W^{t+\Delta t} + \beta A_E T_E^{t+\Delta t} + \beta A_N T_N^{t+\Delta t} + \beta A_S T_S^{t+\Delta t} + \\
& + \beta A_F T_F^{t+\Delta t} + \beta A_B T_B^{t+\Delta t} + S_P
\end{aligned} \tag{4.35}$$

onde:

$$A_P = 1 + \beta A$$

$$\begin{aligned}
S_P = & A_W (1 - \beta) T_W^t + A_E (1 - \beta) T_E^t + A_S (1 - \beta) T_S^t + A_N (1 - \beta) T_N^t + \\
& + A_F (1 - \beta) T_F^t + A_B (1 - \beta) T_B^t + [1 - (1 - \beta) A] T_P^t
\end{aligned}$$

O termo S_P é chamado de termo fonte e depende das temperaturas já conhecidas no tempo anterior ao tempo que está sendo analisado.

Sendo L_x a dimensão no eixo x, L_y a dimensão no eixo y e L_z a dimensão no eixo z, os números de volumes ao longo dos eixos x, y e z são dados pelas Equações 4.36, 4.37 e 4.38.

$$n_x = \frac{L_x}{\Delta x} \tag{4.36}$$

$$n_y = \frac{L_y}{\Delta y} \tag{4.37}$$

$$n_z = \frac{L_z}{\Delta z} \tag{4.38}$$

Voltando à Equação 4.35 e inserindo os índices da posição:

$$\begin{aligned}
A_{P_{ijk}} T_{ijk}^{t+\Delta t} = & \beta A_{W_{ijk}} T_{i-1,j,k}^{t+\Delta t} + \beta A_{E_{ijk}} T_{i+1,j,k}^{t+\Delta t} + \beta A_{N_{ijk}} T_{i,j+1,k}^{t+\Delta t} + \beta A_{S_{ijk}} T_{i,j-1,k}^{t+\Delta t} + \\
& + \beta A_{F_{ijk}} T_{i,j,k+1}^{t+\Delta t} + \beta A_{B_{ijk}} T_{i,j,k-1}^{t+\Delta t} + S_{P_{ijk}}
\end{aligned} \tag{4.39}$$

(Para $1 < i < nx$, $1 < j < ny$, $1 < k < nz$)

onde:

$$A_{E_{ijk}} = \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta x^2} \frac{(k_{ijk} k_{i+1,j,k})}{(k_{ijk} + k_{i+1,j,k})}$$

$$A_{W_{ijk}} = \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta x^2} \frac{(k_{ijk} k_{i-1,j,k})}{(k_{ijk} + k_{i-1,j,k})}$$

$$A_{N_{ijk}} = \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta y^2} \frac{(k_{ijk} k_{i,j+1,k})}{(k_{ijk} + k_{i,j+1,k})}$$

$$A_{S_{ijk}} = \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta y^2} \frac{(k_{ijk} k_{i,j-1,k})}{(k_{ijk} + k_{i,j-1,k})}$$

$$A_{F_{ijk}} = \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta z^2} \frac{(k_{ijk} k_{i,j,k+1})}{(k_{ijk} + k_{i,j,k+1})}$$

$$A_{B_{ijk}} = \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta z^2} \frac{(k_{ijk} k_{i,j,k-1})}{(k_{ijk} + k_{i,j,k-1})}$$

$$A_{P_{ijk}} = 1 + \beta A_{ijk}$$

$$A_{ijk} = (A_{W_{ijk}} + A_{E_{ijk}} + A_{S_{ijk}} + A_{N_{ijk}} + A_{F_{ijk}} + A_{B_{ijk}})$$

$$S_{P_{ijk}} = A_{W_{ijk}}(1-\beta)T_{i-1,j,k}^t + A_{E_{ijk}}(1-\beta)T_{i+1,j,k}^t + A_{S_{ijk}}(1-\beta)T_{i,j-1,k}^t + A_{N_{ijk}}(1-\beta)T_{i,j+1,k}^t + \\ + A_{F_{ijk}}(1-\beta)T_{i,j,k+1}^t + A_{B_{ijk}}(1-\beta)T_{i,j,k-1}^t - [1 - (1-\beta)A_{ijk}]T_{ijk}^t$$

Para Volumes de Fronteira:

Foi realizada a integração para os volumes de fronteira, da mesma forma realizada para os volumes internos, respeitando as condições de contorno existentes. Também aqui serão apresentados em detalhes os volumes à direita e à esquerda da placa, sendo depois feita uma generalização para os demais volumes.

Volumes à direita:

Repetindo a Equação 4.17:

$$T_P^{t+\Delta t} - T_P^t = q_{xw}^{''*} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta x} - q_{xe}^{''*} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta x} + q_{ys}^{''*} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta y} - q_{yn}^{''*} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta y} + \\ + q_{zb}^{''*} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta z} - q_{zf}^{''*} \frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta z} \quad (4.17)$$

Como a condição de contorno na face direita da placa é de convecção, iguala-se o fluxo por condução ao fluxo por convecção, como na Equação 4.40.

$$q_{xe}^{''*} = -k_p \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{e^-}^* = h(T_e^* - T_\infty) \quad (4.40)$$

Aproximando linearmente a derivada da Equação 4.40, tem-se:

$$-k_p \frac{T_e^* - T_P^*}{(\Delta x / 2)} = h(T_e^* - T_\infty) \quad (4.41)$$

E a partir de manipulação algébrica chega-se à Equação 4.42.

$$T_e^* = \frac{\left(k_p T_p^* + h \frac{\Delta x}{2} T_\infty\right)}{\left(k_p + h \frac{\Delta x}{2}\right)} \quad (4.42)$$

Substituindo a Equação 4.42 na Equação 4.40 e multiplicando por $\frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta x}$, tem-se a Equação 4.43.

$$-q_{xe}^{**} \frac{\Delta t}{\rho c \Delta x} = \underbrace{\frac{h \Delta x k_p}{2 \left(k_p + h \frac{\Delta x}{2}\right)} \frac{2 \Delta t}{(\rho c)_p (\Delta x)^2}}_{\Lambda_E} [T_\infty - T_p^*] \quad (4.43)$$

Para os volumes de fronteira à direita da placa apenas o coeficiente Λ_E será diferente, pois os demais serão iguais aos coeficientes dos volumes centrais.

Então:

$$T_p^{t+\Delta t} - T_p^t = A_W [T_W^* - T_p^*] + A_E [T_\infty^* - T_p^*] + A_S [T_S^* - T_p^*] + A_N [T_N^* - T_p^*] + A_F [T_F^* - T_p^*] + A_B [T_B^* - T_p^*] \quad (4.44)$$

Da mesma forma que foi feita para os volumes centrais, substitui-se os termos de temperatura da Equação 4.44 com sobrescrito * pela Equação 4.33:

$$T^* = [\beta T^{t+\Delta t} + (1 - \beta) T^t] \quad (4.33)$$

e inserindo os termos da posição, tem-se a Equação 4.45, que não possui o termo em T_e .

$$A_{p_{ijk}} T_{ijk}^{t+\Delta t} = \beta A_{W_{ijk}} T_{i-1,j,k}^{t+\Delta t} + \beta A_{N_{ijk}} T_{i,j+1,k}^{t+\Delta t} + \beta A_{S_{ijk}} T_{i,j-1,k}^{t+\Delta t} + \beta A_{F_{ijk}} T_{i,j,k+1}^{t+\Delta t} + \beta A_{B_{ijk}} T_{i,j,k-1}^{t+\Delta t} + S_{p_{ijk}} \quad (4.45)$$

Para $i=nx, 1 < j < ny, 1 < k < nz$

onde:

$$A_{W_{ijk}} = \frac{2 \Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta x^2} (k_{ijk} k_{i-1,j,k})$$

$$A_{N_{ijk}} = \frac{2 \Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta y^2} (k_{ijk} k_{i,j+1,k})$$

$$A_{S_{ijk}} = \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta y^2} \frac{(k_{ijk} k_{i,j-1,k})}{(k_{ijk} + k_{i,j-1,k})}$$

$$A_{F_{ijk}} = \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta z^2} \frac{(k_{ijk} k_{i,j,k+1})}{(k_{ijk} + k_{i,j,k+1})}$$

$$A_{B_{ijk}} = \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta z^2} \frac{(k_{ijk} k_{i,j,k-1})}{(k_{ijk} + k_{i,j,k-1})}$$

$$A_{E_{ijk}} = \frac{h\Delta x k_{ijk}}{2\left(k_{ijk} + h\frac{\Delta x}{2}\right)} \frac{2\Delta t}{(\rho c)_{ijk} (\Delta x)^2}$$

$$A_{P_{ijk}} = 1 + \beta [A_{W_{ijk}} + A_{E_{ijk}} + A_{N_{ijk}} + A_{S_{ijk}} + A_{F_{ijk}} + A_{B_{ijk}}] = 1 + \beta A_{ijk}$$

$$S_{P_{ijk}} = A_{W_{ijk}} (1 - \beta) T_{i-1,j,k}^t + A_{E_{ijk}} [(1 - \beta) T_{\infty E_{ijk}}^t + \beta T_{\infty E_{ijk}}^{t+\Delta t}] + A_{S_{ijk}} (1 - \beta) T_{i,j-1,k}^t + \\ + A_{N_{ijk}} (1 - \beta) T_{i,j+1,k}^t + A_{F_{ijk}} (1 - \beta) T_{i,j,k+1}^t + A_{B_{ijk}} (1 - \beta) T_{i,j,k-1}^t + [1 - (1 - \beta) A_{ijk}] T_{ijk}^t$$

Volumes à esquerda:

Voltando à Equação 4.17:

$$T_P^{t+\Delta t} - T_P^t = q_{xw}^{**} \frac{\Delta t}{(\rho c)_P \Delta x} - q_{xe}^{**} \frac{\Delta t}{(\rho c)_P \Delta x} + q_{ys}^{**} \frac{\Delta t}{(\rho c)_P \Delta y} - q_{yn}^{**} \frac{\Delta t}{(\rho c)_P \Delta y} + \\ + q_{zb}^{**} \frac{\Delta t}{(\rho c)_P \Delta z} - q_{zf}^{**} \frac{\Delta t}{(\rho c)_P \Delta z} \quad (4.17)$$

Na face esquerda da placa, a condição de contorno também é de convecção, então se iguala o fluxo por condução ao fluxo por convecção, como na Equação 4.46.

$$q_{xw}^{**} = -k_P \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{w^+}^* = h(T_\infty - T_w^*) \quad (4.46)$$

Aproximando linearmente a derivada da Equação 4.46, tem-se:

$$-k_P \frac{T_P^* - T_w^*}{(\Delta x/2)} = h(T_\infty - T_e^*) \quad (4.47)$$

E a partir de manipulação algébrica, encontra-se a Equação 4.48.

$$T_w^* = \frac{\left(k_P T_P^* + h \frac{\Delta x}{2} T_\infty \right)}{\left(k_P + h \frac{\Delta x}{2} \right)} \quad (4.48)$$

Substituindo a Equação 4.48 na Equação 4.47 e multiplicando por $\frac{\Delta t}{(\rho c)_p \Delta x}$, tem-se a Equação 4.49.

$$q_{xw}^{**} \frac{\Delta t}{\rho c \Delta x} = \underbrace{\frac{h \Delta x k_p}{2 \left(k_p + h \frac{\Delta x}{2} \right)} \frac{2 \Delta t}{(\rho c)_p (\Delta x)^2}}_{A_w} [T_\infty - T_p^*] \quad (4.49)$$

Para os volumes de fronteira à esquerda da placa apenas o coeficiente A_w será diferente, pois os demais serão iguais aos coeficientes dos volumes centrais.

Então:

$$T_p^{t+\Delta t} - T_p^t = A_w [T_\infty - T_p^*] + A_E [T_E^* - T_p^*] + A_S [T_S^* - T_p^*] + \\ + A_N [T_N^* - T_p^*] + A_F [T_F^* - T_p^*] + A_B [T_B^* - T_p^*] \quad (4.50)$$

Da mesma forma que foi feita para os volumes centrais, substitui-se os termos de temperatura da Equação 4.50 com sobrescrito * pela Equação 4.33:

$$T^* = [\beta T^{t+\Delta t} + (1 - \beta) T^t] \quad (4.33)$$

$$A_{p_{ijk}} T_{ijk}^{t+\Delta t} = \beta A_{E_{ijk}} T_{i+1,j,k}^{t+\Delta t} + \beta A_{N_{ijk}} T_{i,j+1,k}^{t+\Delta t} + \beta A_{S_{ijk}} T_{i,j-1,k}^{t+\Delta t} + \\ + \beta A_{F_{ijk}} T_{i,j,k+1}^{t+\Delta t} + \beta A_{B_{ijk}} T_{i,j,k-1}^{t+\Delta t} + S_{p_{ijk}} \quad (4.51)$$

Para $i=1, 1 < j < n_y, 1 < k < n_z$

onde:

$$A_{E_{ijk}} = \frac{2 \Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta x^2} \frac{(k_{ijk} k_{i+1,j,k})}{(k_{ijk} + k_{i+1,j,k})}$$

$$A_{N_{ijk}} = \frac{2 \Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta y^2} \frac{(k_{ijk} k_{i,j+1,k})}{(k_{ijk} + k_{i,j+1,k})}$$

$$A_{S_{ijk}} = \frac{2 \Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta y^2} \frac{(k_{ijk} k_{i,j-1,k})}{(k_{ijk} + k_{i,j-1,k})}$$

$$A_{F_{ijk}} = \frac{2 \Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta z^2} \frac{(k_{ijk} k_{i,j,k+1})}{(k_{ijk} + k_{i,j,k+1})}$$

$$A_{B_{ijk}} = \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta z^2} \frac{(k_{ijk} k_{i,j,k-1})}{(k_{ijk} + k_{i,j,k-1})}$$

$$A_{W_{ijk}} = \frac{h \Delta x k_{ijk}}{2 \left(k_{ijk} + h \frac{\Delta x}{2} \right)} \frac{2\Delta t}{(\rho c)_{ijk} (\Delta x)^2}$$

$$A_{P_{ijk}} = 1 + \beta [A_{W_{ijk}} + A_{E_{ijk}} + A_{N_{ijk}} + A_{S_{ijk}} + A_{F_{ijk}} + A_{B_{ijk}}] = 1 + \beta A_{ijk}$$

$$S_{P_{ijk}} = A_{E_{ijk}} (1 - \beta) T_{i+1,j,k}^t + A_{W_{ijk}} [(1 - \beta) T_{\infty W_{ijk}}^t + \beta T_{\infty W_{ijk}}^{t+\Delta t}] + A_{S_{ijk}} (1 - \beta) T_{i,j-1,k}^t + \\ + A_{N_{ijk}} (1 - \beta) T_{i,j+1,k}^t + A_{F_{ijk}} (1 - \beta) T_{i,j,k+1}^t + A_{B_{ijk}} (1 - \beta) T_{i,j,k-1}^t + [1 - (1 - \beta) A_{ijk}] T_{ijk}^t$$

Generalizando

A Equação 4.51 é a equação geral aproximada para todos os volumes elementares, sejam eles centrais ou de fronteira, e será usada pelos programas para a solução do problema de condução de calor tridimensional e transiente.

$$A_{P_{ijk}} T_{ijk}^{t+\Delta t} = \beta a_{W_{ijk}} T_{i-1,j,k}^{t+\Delta t} + \beta a_{E_{ijk}} T_{i+1,j,k}^{t+\Delta t} + \beta a_{N_{ijk}} T_{i,j+1,k}^{t+\Delta t} + \beta a_{S_{ijk}} T_{i,j-1,k}^{t+\Delta t} + \\ + \beta a_{F_{ijk}} T_{i,j,k+1}^{t+\Delta t} + \beta a_{B_{ijk}} T_{i,j,k-1}^{t+\Delta t} + S_{P_{ijk}} \quad (4.52)$$

onde:

$$A_{E_{ijk}} = \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta x^2} \frac{(k_{ijk} k_{i+1,j,k})}{(k_{ijk} + k_{i+1,j,k})} \quad i < nx$$

$$A_{E_{ijk}} = \frac{h_{E_{ijk}} \Delta x k_{ijk}}{2 \left(k_{ijk} + h_{E_{ijk}} \frac{\Delta x}{2} \right)} \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} (\Delta x)^2} \quad i = nx$$

$$a_{E_{ijk}} = A_{E_{ijk}} \quad i < nx$$

$$a_{E_{ijk}} = 0 \quad i = nx$$

$$A_{W_{ijk}} = \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta x^2} \frac{(k_{ijk} k_{i-1,j,k})}{(k_{ijk} + k_{i-1,j,k})} \quad i > 1$$

$$A_{W_{ijk}} = \frac{h_{W_{ijk}} \Delta x k_{ijk}}{2 \left(k_{ijk} + h_{W_{ijk}} \frac{\Delta x}{2} \right)} \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} (\Delta x)^2} \quad i = 1$$

$$a_{w_{ijk}} = A_{w_{ijk}} \quad i > 1$$

$$a_{w_{ijk}} = 0 \quad i = 1$$

$$A_{N_{ijk}} = \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta y^2} \frac{(k_{ijk} k_{i,j+1,k})}{(k_{ijk} + k_{i,j+1,k})} \quad j < ny$$

$$A_{N_{ijk}} = \frac{h_{iNk} \Delta y k_{ijk}}{2 \left(k_{ijk} + h_{iNk} \frac{\Delta y}{2} \right)} \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} (\Delta y)^2} \quad j = ny$$

$$a_{N_{ijk}} = A_{N_{ijk}} \quad j < ny$$

$$a_{N_{ijk}} = 0 \quad j = ny$$

$$A_{S_{ijk}} = \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta y^2} \frac{(k_{ijk} k_{i,j-1,k})}{(k_{ijk} + k_{i,j-1,k})} \quad j > 1$$

$$A_{S_{ijk}} = \frac{h_{iSk} \Delta y k_{ijk}}{2 \left(k_{ijk} + h_{iSk} \frac{\Delta y}{2} \right)} \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} (\Delta y)^2} \quad j = 1$$

$$a_{S_{ijk}} = A_{S_{ijk}} \quad j > 1$$

$$a_{S_{ijk}} = 0 \quad j = 1$$

$$A_{B_{ijk}} = \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta z^2} \frac{(k_{ijk} k_{i,j,k-1})}{(k_{ijk} + k_{i,j,k-1})} \quad k < nz$$

$$A_{B_{ijk}} = \frac{h_{ijB} \Delta z k_{ijk}}{2 \left(k_{ijk} + h_{ijB} \frac{\Delta z}{2} \right)} \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} (\Delta z)^2} \quad k = nz$$

$$a_{B_{ijk}} = A_{B_{ijk}} \quad k < nz$$

$$a_{B_{ijk}} = 0 \quad k = nz$$

$$A_{F_{ijk}} = \frac{2\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta z^2} \frac{(k_{ijk} k_{i,j,k+1})}{(k_{ijk} + k_{i,j,k+1})} \quad k > 1$$

$$A_{F_{ijk}} = -\frac{h_{ijF} \Delta z k_{ijk}}{2 \left(k_{ijk} + h_{ijF} \frac{\Delta z}{2} \right)} \frac{2 \Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk} (\Delta z)^2} \quad k=1$$

$$a_{F_{ijk}} = A_{F_{ijk}} \quad k > 1$$

$$a_{F_{ijk}} = 0 \quad k=1$$

$$A_{P_{ijk}} = 1 + \beta [A_{W_{ijk}} + A_{E_{ijk}} + A_{N_{ijk}} + A_{S_{ijk}} + A_{F_{ijk}} + A_{B_{ijk}}] = 1 + \beta A_{ijk}$$

$$S_{P_{ijk}} = R_{ijk} + A_{W_{ijk}} (1 - \beta) T_{i-1,j,k}^t + A_{E_{ijk}} (1 - \beta) T_{i+1,j,k}^t + A_{S_{ijk}} (1 - \beta) T_{i,j-1,k}^t + \\ + A_{N_{ijk}} (1 - \beta) T_{i,j+1,k}^t + A_{F_{ijk}} (1 - \beta) T_{i,j,k+1}^t + A_{B_{ijk}} (1 - \beta) T_{i,j,k-1}^t + [1 - (1 - \beta) A_{ijk}] T_{ijk}^t$$

Onde o termo R_{ijk} leva em conta as condições de contorno e é expresso por:

$$R_{ijk} = r_{Eijk} a_{Eijk} [(1 - \beta) T_{\infty Ejk}^t + \beta T_{\infty Ejk}^{t+\Delta t}] + r_{Wijk} a_{Wijk} [(1 - \beta) T_{\infty Wjk}^t + \beta T_{\infty Wjk}^{t+\Delta t}] + \\ + r_{Nijk} a_{Nijk} [(1 - \beta) T_{\infty Nk}^t + \beta T_{\infty Nk}^{t+\Delta t}] + r_{Sijk} a_{Sijk} [(1 - \beta) T_{\infty Sk}^t + \beta T_{\infty Sk}^{t+\Delta t}] + \\ + r_{Fijk} a_{Fijk} [(1 - \beta) T_{\infty iF}^t + \beta T_{\infty iF}^{t+\Delta t}] + r_{Bijk} a_{Bijk} [(1 - \beta) T_{\infty iB}^t + \beta T_{\infty iB}^{t+\Delta t}] +$$

$$r_{Eijk} = \begin{cases} 1 & i=nx \\ 0 & i < nx \end{cases} \quad r_{Wijk} = \begin{cases} 1 & i=1 \\ 0 & i > 1 \end{cases} \quad r_{Nijk} = \begin{cases} 1 & j=ny \\ 0 & j < ny \end{cases}$$

$$r_{Sijk} = \begin{cases} 1 & j=1 \\ 0 & j > 1 \end{cases} \quad r_{Bijk} = \begin{cases} 1 & k=nz \\ 0 & k < nz \end{cases} \quad r_{Fijk} = \begin{cases} 1 & k=1 \\ 0 & k > 1 \end{cases}$$

Método Iterativo de Jacobi

O sistema de equações lineares foi resolvido pelo método de Jacobi, ilustrado na Figura 4.5, que requer uma estimativa inicial do campo da variável, e onde num ciclo são usados valores das variáveis calculadas no ciclo anterior.

4.4 Programas Computacionais Desenvolvidos

Foram desenvolvidos três programas computacionais, vetorizados para se trabalhar diretamente com matrizes, na linguagem Matlab: um para simular a distribuição de temperaturas na superfície da placa, outro para comparar os resultados entre simulações de cada placa, uma de gesso puro e a outra com um cilindro de aço incrustado, e o último

para comparar os resultados experimentais da distribuição de temperatura da superfície de cada placa, uma de gesso puro e a outra com um cilindro de aço incrustado.

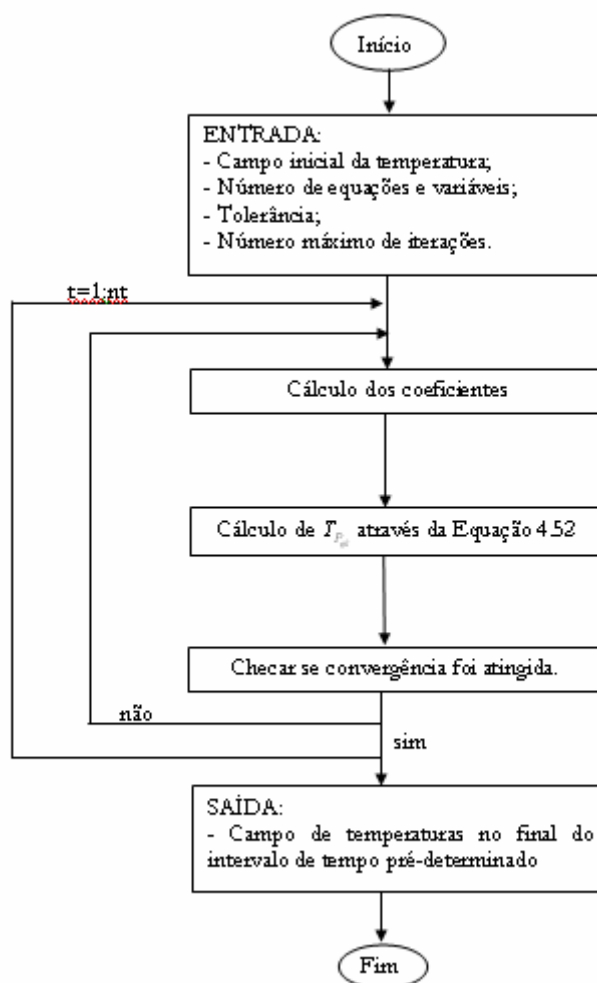


Figura 4.5 – Fluxograma do Método Iterativo de Jacobi

Os roteiros abaixo apresentam as etapas realizadas pelos programas; onde o termo imagem simulada representa a matriz que contém a distribuição (calculada através de simulação numérica) de temperaturas da superfície da placa, e imagem experimental é a matriz que contém a distribuição de temperaturas de uma imagem termográfica.

Programa Condução

Este programa resolve o problema de condução de calor tridimensional e transiente baseado na solução da Equação 4.52, a partir da entrada das propriedades termofísicas (massa específica, condutividade térmica e calor específico) da placa e do cilindro incrustado e da geometria da placa e do cilindro. O cálculo da imagem simulada é feito através do método iterativo de Jacobi, e esse resultado pode ser usado tanto para se encontrar a temperatura média de determinada região da placa quanto para ser comparado com uma imagem experimental.

O cálculo do erro entre a imagem experimental e a simulada é feito através da Equação 4.53. No caso de a média aritmética dos pontos das imagens analisadas ser negativa, esse sinal (representado por Sinal(Erro_Aritmético) na equação abaixo) é transferido para a média quadrática tornando o erro negativo.

$$Erro = \sqrt{\sum_{c=n_c \cdot p_{esq}}^{n_c \cdot p_{dir}} \sum_{l=n_l \cdot p_{sup}}^{n_l \cdot p_{inf}} \left\{ \frac{[img_1(l,c) - img_2(l,c)]^2}{n_c(p_{dir} - p_{esq})n_l(p_{sup} - p_{inf})} \right\}} Sinal(Erro_Aritmetico) \quad (4.53)$$

onde:

n_c	= Número de colunas da matriz com valores de temperatura;
n_l	= Número de linhas da matriz com valores de temperatura;
c	= Coluna inicial a ser considerada no cálculo da média de diferenças;
l	= Linha inicial a ser considerada no cálculo da média de diferenças;
p_{dir}	= Limite direito da área a ser considerada no cálculo;
p_{esq}	= Limite esquerdo da área a ser considerada no cálculo;
p_{inf}	= Limite inferior da área a ser considerada no cálculo;
p_{sup}	= Limite superior da área a ser considerada no cálculo;
img_1	= Primeira imagem a ser analisada;
img_2	= Segunda imagem a ser analisada;
(l,c)	= Para (linha, coluna) da imagem;
Sinal(Erro_Aritmetico)	= Sinal do erro aritmético calculado para todos os pares de pontos considerados no cálculo da média.

As comparações entre uma imagem experimental com uma imagem simulada podem ser feitas entre o mesmo lado das imagens, Figura 4.6(a), ou entre lados opostos de cada uma delas, Figura 4.6(b); como também existe a opção de escolha da proporção a ser comparada, como ilustra a Figura 4.6(a)-(b) em que a área pode ter seus limites definidos de acordo com a análise desejada.

Programa Compara_Simulacoes

Este programa compara duas imagens simuladas no mesmo tempo, que podem ser imagens apenas da placa de gesso, imagens apenas da placa de gesso com o cilindro de aço incrustado ou, uma sendo da placa de gesso e outra placa de gesso com o cilindro de aço incrustado. As comparações podem ser feitas entre o mesmo lado das imagens ou entre lados opostos de cada uma delas, da mesma forma que no programa *Condução*. As proporções das placas a serem analisadas precisam ser informadas, bem como as imagens simuladas a serem comparadas. O erro entre as imagens é calculado através da Equação 4.53.

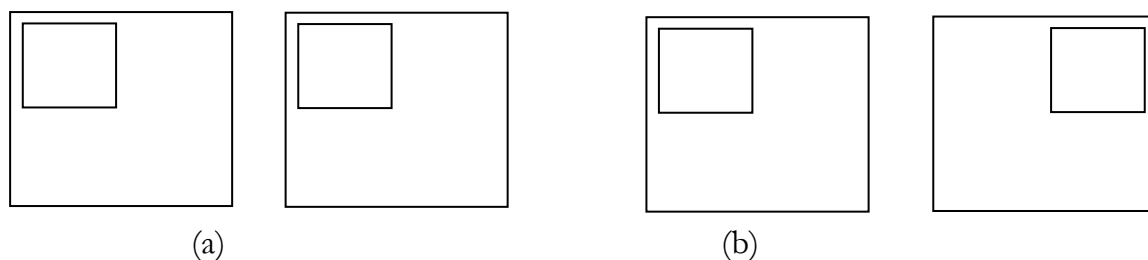


Figura 4.6 – Opções de comparação das imagens (a) Mesmo lado de imagens (b) Lados opostos de imagens

Programa Compara_Imagens

Este programa compara duas imagens experimentais na mesma corrida, que podem ser imagens apenas da placa de gesso, imagens apenas da placa de gesso com o cilindro de aço incrustado ou, uma sendo da placa de gesso e outra placa de gesso com o cilindro de aço incrustado. As comparações podem ser feitas entre o mesmo lado das imagens ou entre lados opostos de cada uma delas, da mesma forma que no programa *Condução*. As proporções das placas a serem analisadas precisam ser informadas, bem como as imagens simuladas a serem comparadas. O erro entre as imagens é calculado através da Equação 4.53.

4.5 Aspectos Numéricos

Foi realizada uma comparação entre as temperaturas médias do lado esquerdo de uma imagem simulada da placa com cilindro de aço incluso para duas malhas: uma de 20x20x20x200 (nlin x ncol x nfac x ntemp) e outra de 60x60x60x600. Verificou-se através da Figura 4.7 que o tamanho da malha tem maior influência até o tempo de 800 s, e que depois desse ponto não é relevante. Como é justamente a parte final que interessa, nesse trabalho foi utilizada a malha de 20x20x20x200, não sendo necessário um aumento nessas dimensões.

4.6 Correlações Empíricas

Os programas desenvolvidos são genéricos, mas a influência da convecção e da radiação para o caso estudado é pequena em relação à resistência térmica interna do gesso.

No coeficiente de transferência de calor h , são considerados os coeficientes de transferência de calor por convecção ($h_{\text{convecção}}$) e por radiação ($h_{\text{radiação}}$), conforme a Equação 4.54.

$$h = h_{\text{convecção}} + h_{\text{radiação}} \quad (4.54)$$

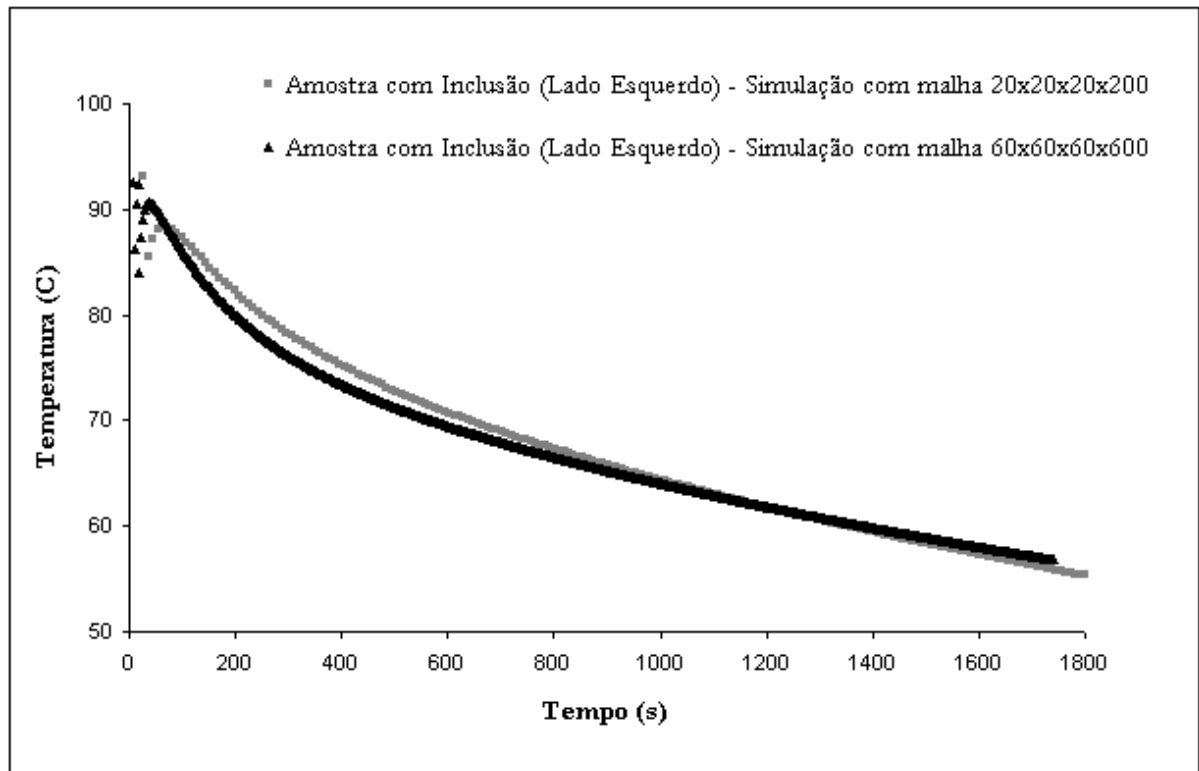


Figura 4.7 – Comparação de malhas na evolução da temperatura média da superfície da placa de gesso com o cilindro de aço incrustado

O $h_{\text{convecção}}$ é encontrado através de correlações empíricas adequadas à geometria em estudo, e o $h_{\text{radiação}}$ é dado por:

$$h_{\text{radiação}} = \varepsilon \sigma (T + T_{\infty})(T^2 + T_{\infty}^2) \quad (4.55)$$

onde:

ε = Emissividade do material;

σ = Constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$).

Apenas a emissividade da amostra é levada em consideração, pois a superfície que a circunda é muito maior do que sua área e funciona como um corpo negro absorvendo toda a radiação incidente nela.

Para a solução do problema apresentado, com convecção natural nas seis faces da placa de gesso, foram utilizadas correlações empíricas, extraídas de Raithby e Hollands em Kreith (2000) e de Raithby e Hollands em Roshenow et al. (1998), para placas verticais e horizontais.

As correlações são da forma:

$$Nu = \frac{\bar{h}L}{k} \quad (4.56)$$

onde:

Nu = Número de Nusselt;

$\bar{h}$ = Coeficiente de transferência de calor por convecção;

L = Comprimento característico da geometria;

k = Condutividade térmica.

E o número de Rayleigh:

$$Ra = Gr Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (4.57)$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (4.58)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (4.59)$$

onde:

Gr = Número de Grashof;

Pr = Número de Prandtl;

g = Aceleração da gravidade (m/s²);

β = Coeficiente de expansão volumétrica (K⁻¹);

L = Comprimento característico da superfície (m);

ν = Viscosidade cinemática (m²/s);

T_s = Temperatura da parede (K);

T_∞ = Temperatura do ambiente (K).

As propriedades do fluido são avaliadas na temperatura de filme T_f, que é a média das temperaturas da parede e do ambiente. Já o coeficiente de expansão volumétrica é avaliado em T_∞. Para transferência de calor laminar de camada limite fina, o número de Nusselt independe da geometria e varia em função do número de Prandtl de acordo com a Equação 4.60, que é uma função universal aproximada dada por Churchill e Usagi (1972).

$$\overline{C}_l = \frac{0,671}{\left(1 + (0,492/Pr)^{9/16}\right)^{4/9}} \quad (4.60)$$

Para transferência de calor turbulenta, tem-se as funções C_t^V e C_t^H (os sobrescritos V e H se referem às superfícies vertical e horizontal) representadas pelas Equações 4.61 e 4.62, respectivamente.

$$C_t^V = \frac{0,13Pr^{0,22}}{\left(1 + 0,61Pr^{0,81}\right)^{0,82}} \quad (4.61)$$

$$C_t^H = 0,14 \left(\frac{1 + 0,0107 \text{Pr}}{1 + 0,01 \text{Pr}} \right) \quad (4.62)$$

Para obter um ajuste para a transferência de calor por toda a faixa de Ra, o número de Nusselt é calculado, através de uma combinação dos números de Nusselt para transferência de calor totalmente laminar (Nu_l) e totalmente turbulento (Nu_t), pela Equação 4.63, onde o parâmetro m depende da forma e orientação do corpo.

$$Nu = \left((Nu_l)^m + (Nu_t)^m \right)^{1/m} \quad (4.63)$$

A equação para Nu_l é normalmente expressa em termos de Nu^T , que é uma aproximação final da solução completa para a camada limite fina. A solução para a camada limite fina é corrigida para explicar os efeitos da camada limite espessa. O corpo é circundado por uma camada estacionária de fluido de espessura δ , e fora dessa espessura a temperatura do fluido é tomada como T_∞ . A transferência de calor que ocorreria além dessa camada é determinada por uma análise de condução e convertida num número de Nusselt denominado de Nu_l . A diferença entre Nu_l e Nu^T explica o efeito da camada limite espessa encontrada na convecção natural. A temperatura da parede é assumida como sendo maior do que a temperatura ambiente.

Caso 1: Placa Plana Isotérmica Vertical

Para transferência de calor numa placa vertical e $1 < Ra < 10^{12}$, o número de Nusselt é obtido pela Equação 4.63 substituindo-se Nu_l e Nu_t das Equações 4.65 e 4.66 e fazendo $m = 6$.

$$Nu^T = \overline{C_l} Ra^{1/4} \quad (4.64)$$

$$Nu_l = \frac{2,0}{\ln(1 + 2,0/Nu^T)} \quad (4.65)$$

$$Nu_t = \frac{C_t^V Ra^{1/3}}{(1 + (1,4 \times 10^9 \text{Pr})/Ra)} \quad (4.66)$$

Caso 2: Face Superior de Placa Horizontal

Para superfícies isotérmicas horizontais e $Ra \geq 1$, o número de Nusselt é obtido pela Equação 4.63 substituindo-se Nu_l e Nu_t das Equações 4.68 e 4.69 e fazendo $m = 10$.

$$Nu^T = 0,835 \overline{C_l} Ra^{1/4} \quad (4.67)$$

$$Nu_l = \frac{1,4}{\ln(1 + 1,4/Nu^T)} \quad (4.68)$$

$$Nu_t = C_t^H Ra^{1/3} \quad (4.69)$$

Caso 3: Face Inferior de Placa Horizontal

Para a face inferior de várias formas planas e $Ra < 10^{10}$ e $Pr \geq 0,7$, apenas uma força muito fraca conduz o fluido ao longo da placa, por isso somente o fluxo laminar tem sido medido e o número de Nusselt é calculado através da Equação 4.72.

$$Nu^T = \overline{H}_l Ra^{1/5} \quad (4.70)$$

$$\overline{H}_l = \frac{0,527}{\left(1 + (1,9/Pr)^{9/10}\right)^{2/9}} \quad (4.71)$$

$$Nu = \frac{2,45}{\ln(1 + 2,45/Nu^T)} \quad (4.72)$$

5. USO DA TERMOGRAFIA NA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS TERMOFÍSICOS E GEOMÉTRICOS DE MATERIAIS

Neste capítulo será apresentado um caso onde foi possível a determinação de características termofísicas e espaciais de materiais a partir de termografias. Na Seção 5.1 são apresentados todos os procedimentos para a confecção e a gravação dos termogramas de duas amostras: uma feita apenas de gesso e outra de gesso com uma inclusão metálica. A Seção 5.2 apresenta a simulação numérica do fenômeno de resfriamento por convecção natural das amostras com parâmetros termofísicos e geométricos variáveis até o desvio entre os resultados experimentais e numéricos ser minimizado. As determinações dos parâmetros do gesso e da inclusão metálica são apresentadas nas Seções 5.3 e 5.4, respectivamente. Um método adicional, através do aquecimento da amostra com uma pistola de ar quente, para a determinação do centro da inclusão metálica é mostrado na Seção 5.5. A Seção 5.6 contém uma análise numérica dos desvios da temperatura média superficial das amostras para várias configurações de pares de materiais amostra/inclusão.

5.1 Experimentos

Confecção das Amostras e da Bancada

Foram confeccionadas duas placas de gesso, ambas com dimensões 100x100x35 mm, sendo uma composta apenas de gesso (que será chamada amostra de gesso) e a outra com um cilindro de aço (SAE 1020) incrustado, de diâmetro 25,4 mm e altura 28 mm, (que será chamada amostra com inclusão). A Figura 5.1 ilustra a geometria da amostra com inclusão.

As amostras foram confeccionadas a partir de um molde próprio para gesso. Assim, foi possível obter um material adequado à realização dos ensaios, com alternativas de variações na profundidade das placas e no posicionamento dos cilindros em locais previamente determinados.

Cuidado especial foi tomado na preparação do gesso para moldagem das placas, onde foi usada a proporção de 50% de água e 50% de pó de gesso na massa básica, com o objetivo de se ter o mesmo comportamento de transferência de calor em todas as amostras. As quantidades de pó de gesso e de água foram medidas em balança digital com precisão de 0,5 g, conforme ilustra a Figura 5.2, antes da preparação da massa.

Antes da colocação da massa no molde, ilustrado desmontado na Figura 5.3(a), houve a necessidade de passar uma substância desmoldante para que a placa não colasse no mesmo, como ilustra a Figura 5.3(b). Essa substância desmoldante pode ser vaselina líquida, óleo vegetal ou margarina, sendo esta última a utilizada nesse trabalho.

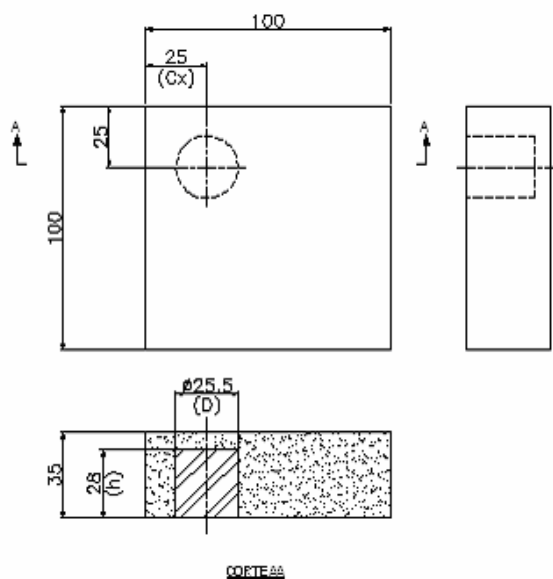


Figura 5.1 – Ilustração da amostra com o cilindro de aço incrustado

Na confecção da amostra com inclusão, o posicionamento do cilindro foi feito antes da colocação da massa no molde, permitindo uma correta localização e evitando uma intervenção na estrutura da placa depois que ela estivesse pronta.

Depois do tempo de cura da placa de gesso, aproximadamente 30 minutos, as partes móveis do molde foram removidas e a placa foi descolada. Após a retirada das placas do molde, elas foram deixadas por 2 horas em condição ambiente (30 °C e umidade relativa de 75%), e então foram colocadas em uma estufa por 24 horas a uma temperatura de 85 °C para secagem. O objetivo de secar o máximo possível as amostras foi o de controlar as propriedades termofísicas do gesso, já que a umidade poderia alterar essas propriedades.



Figura 5.2 – Medição do pó de gesso em balança digital

Também foi realizado um polimento nas superfícies de modo a manter a uniformidade das mesmas. As placas são ilustradas na Figura 5.4(a), amostra de gesso, e na Figura 5.4(b), amostra com inclusão.

A bancada utilizada foi muito simples e composta apenas de uma mesa de madeira e de um suporte metálico. A mesa foi localizada bem próxima à estufa com o objetivo de proporcionar a menor interferência possível da convecção forçada na placa no momento em que ela era retirada da estufa e colocada no suporte posicionado em cima da mesa.

Cuidado especial foi tomado para que o suporte tivesse altura suficiente (20 cm), e espessura mínima possível (1 mm), para assegurar uma influência desprezável da base na convecção natural em todas as faces da placa, conforme ilustra Figura 5.5(a). Os experimentos apresentados proporcionaram a obtenção de algumas propriedades a custos baixos, mas eles não substituem os calorímetros ou as bancadas para determinação de condutividade térmica.



Figura 5.3 – Molde para gesso (a) Partes constituintes (b) Impermeabilização

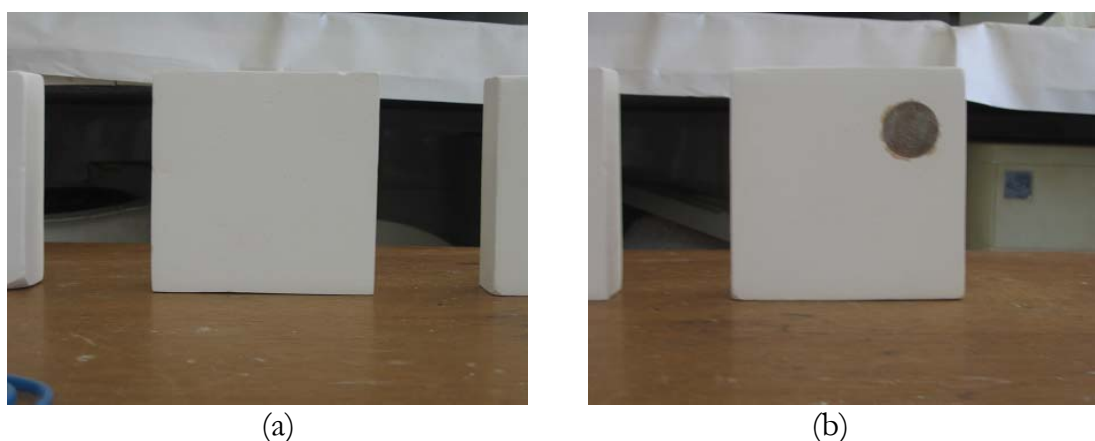


Figura 5.4 – Amostras (a) Amostra de gesso (b) Amostra com inclusão

Procedimentos para as Medições

Para a realização dos termogramas, as placas foram colocadas no suporte de metal, e a câmera de infravermelho foi posicionada a uma distância de 40 cm das superfícies a serem medidas.

As medições foram realizadas numa tarde de verão, com temperatura ambiente média de 28 °C, tendo sido fechadas todas as portas e janelas do laboratório com o intuito de não se ter correntes de ar que pudessem interferir na convecção natural durante o resfriamento das placas.

Para a realização das medições termográficas alguns cuidados foram tomados como: (a) ajustar a câmera de infravermelho (seleção da faixa de temperatura em que serão feitas as medições, onde para o caso dos experimentos apresentados foi de 0 a 120 °C;

programação da gravação periódica de imagens com intervalo de tempo de 1 minuto entre uma imagem e outra; e, posicionamento correto da câmera); (b) fechar as portas e janelas do laboratório para evitar a entrada de corrente de ar; (c) iniciar medições; e (d) finalizar medições após 30 minutos do início.

Aquecimento em Estufa

As placas foram colocadas na estufa à temperatura de 120 °C por 4 horas. Baseado em simulações, este período de 4 horas é suficiente para proporcionar a homogeneização da temperatura. Após esse período, as amostras foram retiradas, uma de cada vez, manualmente com o auxílio de uma luva de raspa de couro e colocadas no suporte metálico. A Figura 5.5(a)-(b) ilustra como as amostras ficaram dispostas durante o período de realização das imagens térmicas após o aquecimento em estufa. Notar que a inclusão ficou escondida durante a realização dos termogramas.

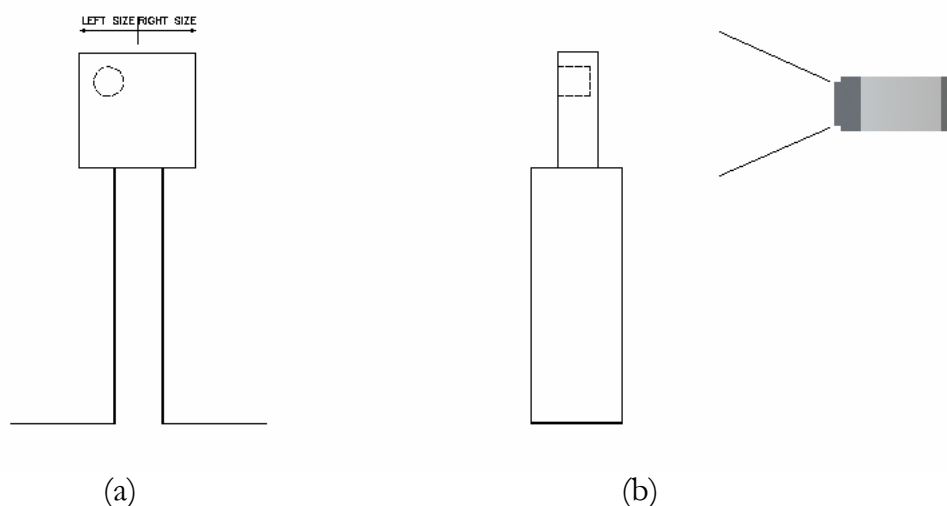


Figura 5.5 – Disposição das amostras durante os experimentos (a) Posicionamento da amostra sobre o suporte metálico (b) posicionamento da câmera em relação à amostra.

Após o posicionamento, o resfriamento das placas foi registrado pela câmera de infravermelho, permitindo avaliar a distribuição de temperatura da superfície medida e analisar como a falha inserida influencia nessa distribuição.

As distribuições de temperaturas das superfícies das placas podem ser visualizadas na Figura 5.6 e na Figura 5.7. Nesses termogramas, as cores azul e verde representam temperaturas relativamente baixas, as cores vermelha e branca representam temperaturas relativamente altas, e a cor amarela indica temperaturas intermediárias.

Observa-se na Figura 5.7 que a região onde o defeito foi incluído apresenta uma temperatura maior em relação ao restante da placa. Percebe-se, a partir da Figura 5.6 e da Figura 5.7, que a amostra com inclusão apresenta uma grande distorção na distribuição de temperatura da superfície da placa em relação à amostra de gesso.

Existem dois fatores para uma temperatura mais elevada na área acima do defeito: primeiro, a capacidade térmica do gesso é bem inferior à do aço, contribuindo para que o cilindro armazene bem mais energia do que o gesso e perca essa energia mais lentamente; segundo, a condutividade térmica do aço é maior do que a do gesso, permitindo assim

que a condução de calor seja mais rápida através do cilindro de aço e influencie a temperatura do gesso acima dele.

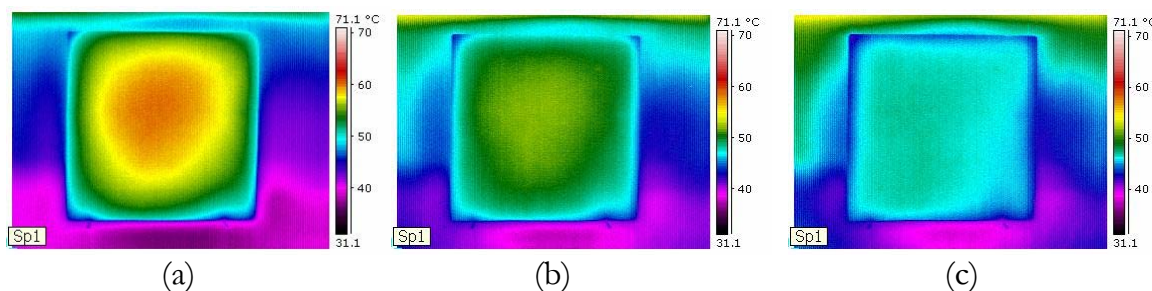


Figura 5.6 – Termogramas do resfriamento da amostra de gesso após aquecimento em estufa (a) 10 minutos após o aquecimento (b) 20 minutos após o aquecimento (c) 30 minutos após o aquecimento

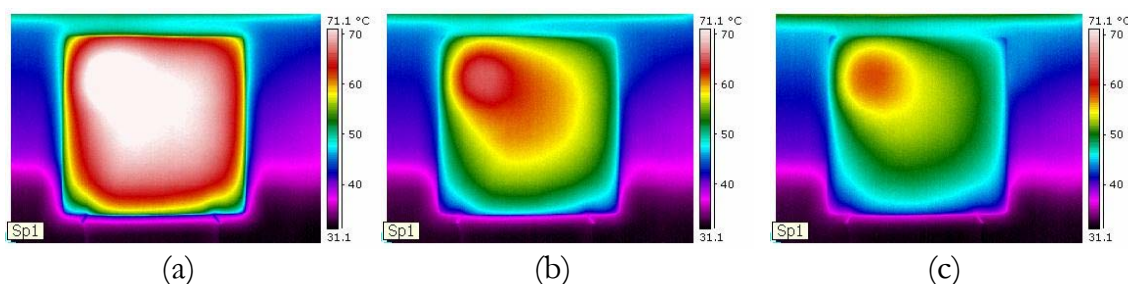


Figura 5.7 – Termogramas do resfriamento da amostra com inclusão após aquecimento em estufa (a) 10 minutos após o aquecimento (b) 20 minutos após o aquecimento (c) 30 minutos após o aquecimento

Para a comparação dos dados de temperatura obtidos dos termogramas e das simulações numéricas das superfícies das amostras, foram desenvolvidos quatro programas computacionais. O programa *ExtraiTermo* (desenvolvido na linguagem TCL/TK e C++ e pelo GET/DEMEC/UFPE) adquire os dados da imagem térmica, na escala de cinza e no formato GIF, associa cada *pixel* de imagem a uma temperatura e constrói uma matriz de valores de temperaturas correspondentes. Como a câmera de infravermelho gera os termogramas no formato JPEG, foi necessária a conversão de todas as imagens térmicas para o formato GIF. Depois, cada termograma foi aberto pelo programa *ExtraiTermo*, os valores de temperaturas máxima e mínima e o nome do arquivo com os dados da distribuição de temperatura foram informados, conforme ilustra a Figura 5.8; e, finalmente, foram selecionados os pontos (X1, Y1), (X2, Y2), (X3, Y3) e (X4, Y4) na imagem que delimitaram a região a ser considerada para a geração da matriz.

O programa *Condução* (descrito no Capítulo 4), calcula numericamente as temperaturas médias de áreas das superfícies de placas iguais ou diferentes, recebe os dados das matrizes de temperaturas gerados pelo programa *ExtraiTermo* e gera o erro (através da Equação 4.53) entre os dados experimentais e numéricos. O programa *Compara_Simulações* (descrito no Capítulo 4) realiza a comparação das distribuições simuladas de temperatura superficiais entre lados de placas iguais ou diferentes gerando o erro através da Equação 4.53. E o programa *Compara_Imagens* compara os dados experimentais dos termogramas, contidos nas matrizes geradas pelo programa *ExtraiTermo*, podendo ser entre lados de placas iguais ou diferentes, e gera o erro através da Equação 4.53.

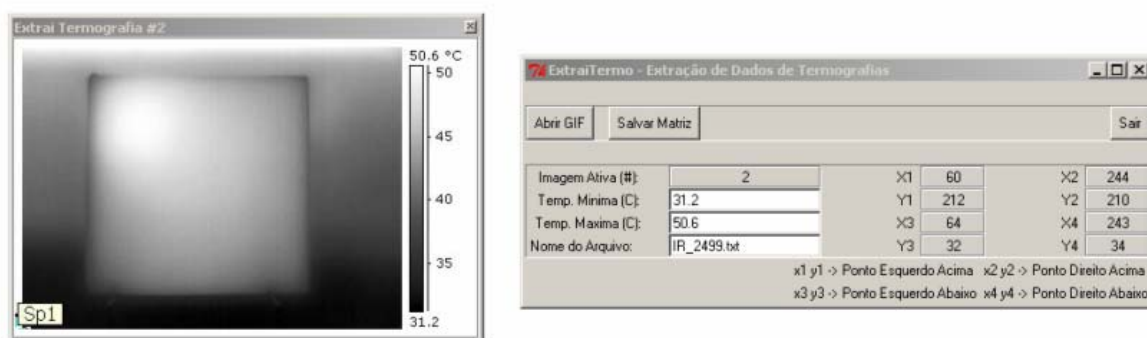


Figura 5.8 – Tela do programa *ExtraiTermo*

O comportamento térmico das amostras foi caracterizado pela temperatura média da superfície das placas. Embora na Figura 5.6 e na Figura 5.7 a vizinhança das amostras apareça nos termogramas, apenas as distribuições de temperatura das amostras foram levadas em consideração nos cálculos. Foram desprezados 5% de cada borda das placas com o objetivo de minimizar os efeitos de borda.

Para cada amostra foram calculadas duas temperaturas médias: a do lado esquerdo superior e a do lado direito superior. A área hachurada da Figura 5.9(a) ilustra aquela que foi levada em consideração no cálculo da temperatura média do lado direito de cada amostra, e na Figura 5.9(b) ilustra a área considerada para o lado esquerdo.

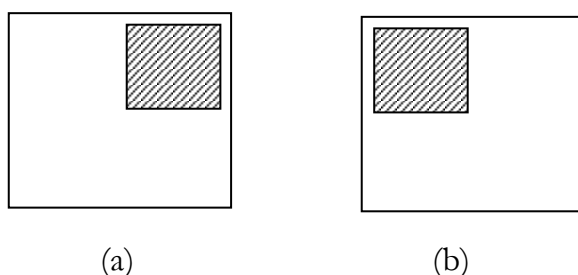


Figura 5.9 – Áreas consideradas para o cálculo da temperatura média (a) Lado direito
(b) Lado esquerdo

Na Figura 5.10 observa-se uma distribuição de temperatura homogênea na superfície da amostra de gesso, e percebe-se que a curva relativa ao lado direito da amostra com inclusão praticamente coincide com a curva da amostra de gesso, indicando a repetibilidade do experimento.

A amostra com inclusão apresenta uma significativa distorção entre o lado esquerdo e o lado direito, como ilustrado na Figura 5.11, indicando a boa sensibilidade da termografia para detectar as variações de temperatura provocadas pela presença do cilindro de aço.

A câmera de infravermelho foi calibrada contra o gerador de radiação de corpo negro (precisão de 0,2 °C) e o erro foi da ordem de 1 °C. Portanto, todas as diferenças experimentais obtidas ficaram dentro da própria incerteza do experimento. A única exceção, desejada, foi o desvio causado pelo cilindro de aço incluso.

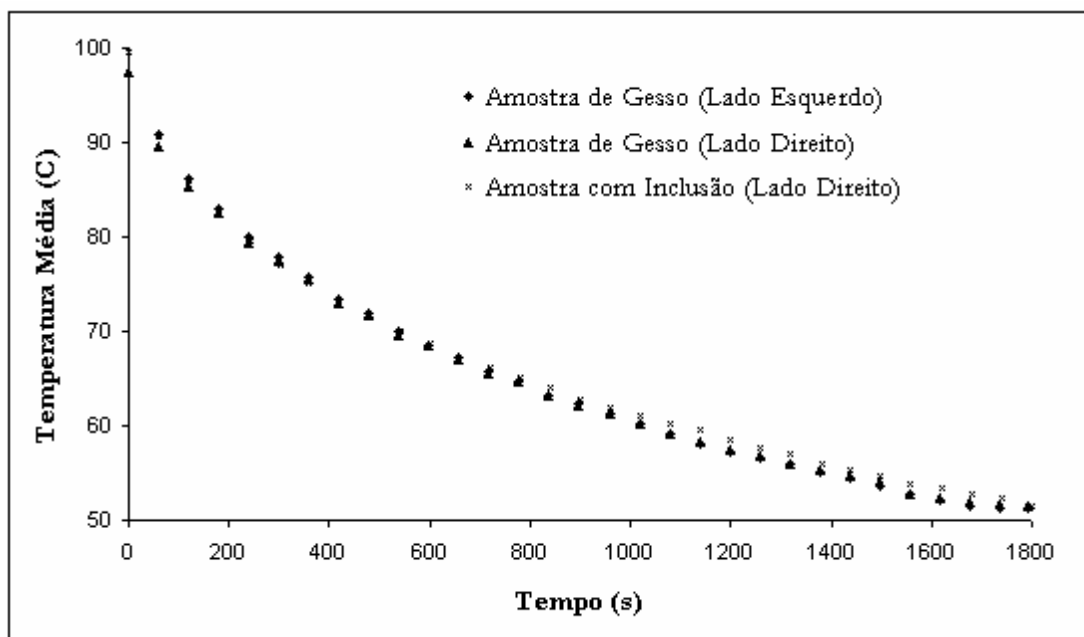


Figura 5.10 – Evolução da temperatura média das superfícies do lado esquerdo e do lado direito da amostra de gesso e do lado direito da amostra com inclusão

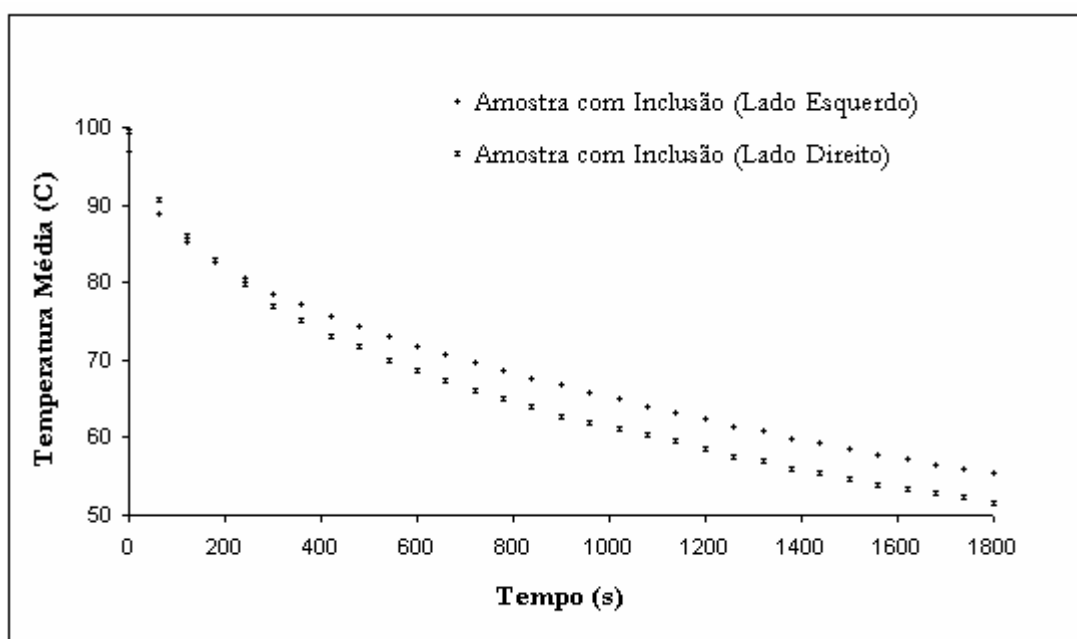


Figura 5.11 – Evolução da temperatura média das superfícies do lado esquerdo e do lado direito da amostra com inclusão

Em relação ao erro, a Figura 5.12 ilustra a não homogeneidade lateral superior para todas as placas. O índice utilizado foi o erro calculado pela Equação 4.53. Percebe-se que quando foram comparados os lados esquerdos da amostra com inclusão (lado sob o qual está o cilindro de aço) e da amostra de gesso, o erro aumenta à medida que as placas resfriam, atinge um máximo de 5,44 °C no tempo 1.139 s, e depois tende a uma estabilização. Já quando foram comparados os lados opostos da amostra com inclusão, a curva do erro teve um traçado parecido com a da comparação citada anteriormente, só

que com valores menores de erro devido à presença do cilindro de aço influenciar um pouco a temperatura do lado direito da amostra com inclusão. Na comparação dos lados direitos da amostra com inclusão e da amostra de gesso, percebeu-se que inicialmente, até o tempo 538 s, a amostra com inclusão tinha uma temperatura menor (indicada pelo erro negativo), depois aumenta devido à influência do cilindro de aço e tende a diminuir. Quando foram comparados os lados opostos da amostra de gesso percebeu-se um comportamento parecido com a comparação citada anteriormente a partir do tempo 1.078 s, mas em um nível menor, já que o lado direito da amostra de gesso não sofre influência da inclusão metálica.

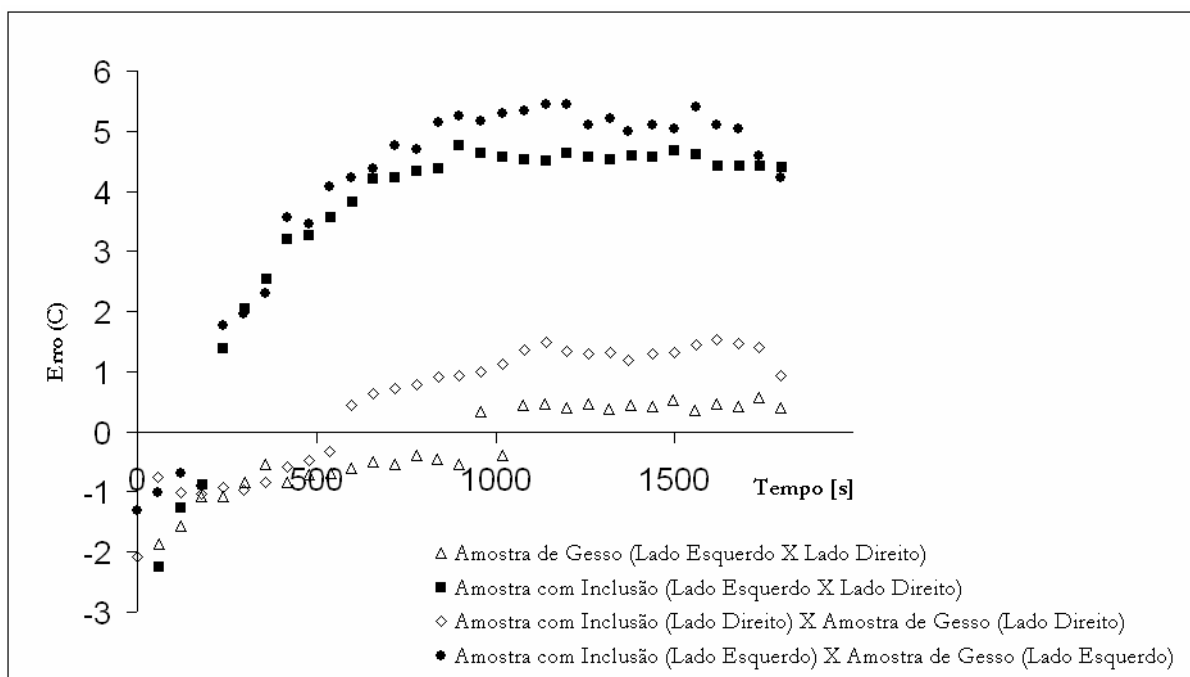


Figura 5.12 – Não-homogeneidade lateral para as duas amostras

5.2 Simulação Numérica

Para as simulações, as amostras foram modeladas matematicamente como paralelepípedos com condição inicial uniforme (120 °C). Cada material (gesso e aço) foi modelado com propriedades constantes e uniformes. Como condições de contorno foram consideradas as transferências de calor por convecção e radiação. Os coeficientes de convecção foram determinados através de correlações empíricas, apresentadas no Capítulo 4, para placa plana vertical, para face superior de placa plana horizontal e face inferior de placa plana horizontal. Para cada passo de tempo, os novos coeficientes de convecção natural foram calculados baseados na distribuição de temperatura calculada. Para que a movimentação das amostras desde o forno até o suporte metálico fosse levada em consideração, o coeficiente de convecção no início da simulação foi aumentado em dez vezes. O efeito desse aumento é mostrado na Figura 5.13, pois a temperatura simulada inicialmente cai até 87 °C, se eleva a 90 °C e desenvolve um novo declínio. Foi testado em simulações que esse aumento no coeficiente de convecção bem no início da simulação não influencia na distribuição de temperatura final. O fato é que a grande

resistência à perda de calor é proporcionada pela baixa condutividade térmica do gesso e não pela convecção natural nas superfícies das amostras, sendo este um dos motivos da bancada simples utilizada nos experimentos funcionar.

Se fossem utilizados outros pares de materiais amostra/inclusão, onde o principal material tivesse condutividade térmica maior que a do gesso, o erro provocado pelo aumento do coeficiente de convecção poderia ser muito grande, já que as distribuições de temperatura superficiais das amostras seriam mais influenciadas pela convecção natural.

O modelo matemático das amostras foi discretizado através do método dos volumes finitos, como apresentado no Capítulo 4. A Figura 5.13 ilustra uma comparação entre as temperaturas médias superficiais experimentais e simuladas das amostras.

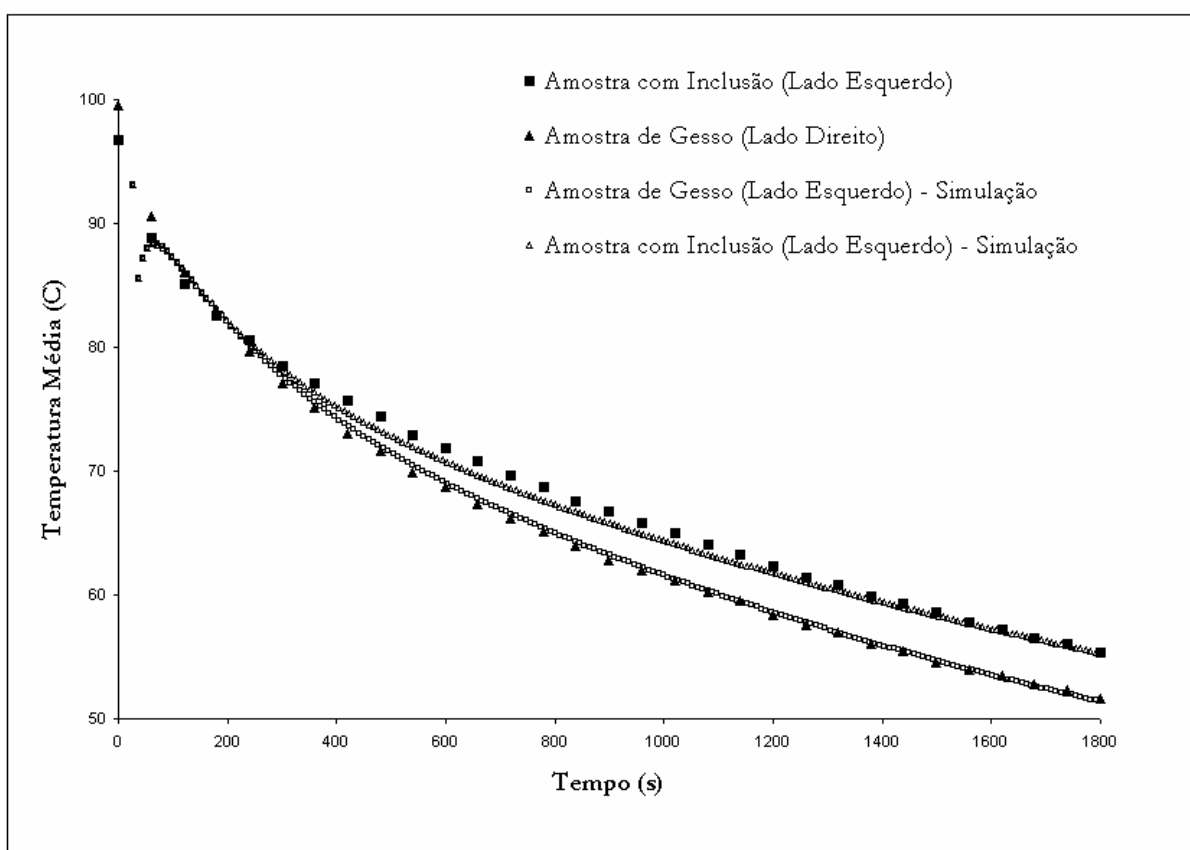


Figura 5.13 – Comparação entre as temperaturas médias experimentais e simuladas

5.3 Determinação dos Parâmetros Termofísicos do Gesso

Inicialmente foi estudado como os parâmetros do gesso influenciavam no comportamento térmico da temperatura média superficial da amostra de gesso, como ilustrado na Figura 5.13. Para essas análises, a evolução da curva de temperatura foi dividida em duas partes: (a) o trecho abaixo de 600 s, onde a temperatura média decresce exponencialmente, pois é fortemente dominada pela convecção natural e fracamente pela capacidade térmica, e (b) o trecho após 600 s, onde a evolução da temperatura é quase linear, sendo fortemente dominada pela baixa condutividade térmica do gesso que proporciona uma grande resistência à perda de calor. A partir de uma série de simulações numéricas foi concluído que: (a) a condutividade térmica influencia principalmente na

declividade do trecho linear da curva, (b) a capacidade térmica influencia o nível do trecho linear da curva (por exemplo, variando-se apenas a capacidade térmica do gesso pode-se construir um conjunto de curvas paralelas em níveis de temperatura distintos), e (c) o coeficiente de convecção natural domina a declividade do trecho exponencial decrescente da curva.

A utilização de valores aproximados de coeficientes de convecção natural (calculados a partir de correlações empíricas extraídas de Raithby e Hollands em Kreith (2000) e de Raithby e Hollands em Roshenow et al. (1998) e apresentadas no Capítulo 4) foi possível devido a apenas o trecho linear da curva ser usado na determinação dos parâmetros da inclusão metálica, pois é nessa região que o desvio entre as duas amostras é grande. Para o caso de um material com alta condutividade térmica, seria necessária a obtenção do valor exato do coeficiente de convecção, e o método presente não poderia ser usado porque os efeitos desse coeficiente poderiam estar envolvidos na influência dos outros dois na curva como um todo. Como alternativa, poderia ser utilizada a estratégia que será usada na próxima seção para a determinação de parâmetros da inclusão metálica, onde apenas um parâmetro é estimado enquanto os outros são fornecidos.

Os valores obtidos para a condutividade térmica e a capacidade térmica foram aqueles que minimizaram o desvio do erro médio quadrático (ver Equação 4.53) entre as temperaturas médias superficiais experimental e simulada (do lado esquerdo da amostra) em todo o trecho linear da curva. Os valores encontrados foram: 0,10 W/(m.K) para a condutividade térmica e 995.000 J/(m³.K) para a capacidade térmica. A curva da temperatura média superficial simulada é representada por aquela contínua inferior na Figura 5.13. A Tabela 5.1 apresenta os valores dos parâmetros do gesso encontrados nesse trabalho, onde a incerteza foi determinada pela variação de parâmetros nas simulações numéricas até a temperatura média superficial variar em 1 °C (precisão da câmera de infravermelho). Ang e Wang (2005) apresentam o valor de 0,12 W/(m.K) para a condutividade térmica do gesso a 120 °C, mas nesse caso eles consideraram a capacidade térmica variando com a temperatura e não como sendo um valor constante durante o resfriamento de 120 °C a 55 °C.

Parâmetro	Valor encontrado
Capacidade térmica do gesso	995.000 ± 92.000 J/(m ³ .K)
Condutividade térmica do gesso	0,10 ± 0,08 W/(m.K)

Tabela 5.1 – Resultados da determinação de parâmetros termofísicos do gesso

5.4 Determinação dos Parâmetros Termofísicos e Geométricos da Inclusão Metálica

Para a determinação dos parâmetros da inclusão metálica, foram utilizados os valores encontrados para a amostra de gesso na seção anterior. Naquele caso, foi necessária a utilização de toda a curva porque tanto o nível quanto a declividade da curva poderiam ser ajustados; e os dois parâmetros (condutividade térmica e capacidade térmica do gesso) puderam ser determinados simultaneamente. Como no caso da inclusão metálica apenas um parâmetro é avaliado em cada análise, pois os efeitos de cada um deles são muito parecidos, o ponto onde ocorre o desvio máximo entre as duas amostras

é o suficiente. Talvez com a utilização de métodos inversos poderia ser encontrado o ponto ótimo do experimento, onde dois parâmetros fossem independentes. Na Figura 5.13, a curva contínua superior é o resultado da simulação numérica para a temperatura média superficial da amostra com inclusão. Para essa simulação foram utilizados os seguintes parâmetros: $3,467 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ para a capacidade térmica do aço, $0,0127 \text{ m}$ para o raio da inclusão, $0,025 \text{ m}$ para o centro da inclusão e $0,028 \text{ m}$ para a altura da inclusão.

Mantendo três parâmetros constantes e variando o quarto, os resultados da simulação são apresentados na Figura 5.14 e na Figura 5.15. Com o objetivo de maximizar a influência do cilindro, foi usado o quadrante superior esquerdo da amostra com inclusão nas simulações da temperatura média superficial. Não há possibilidade de determinar os parâmetros dois a dois, como dito anteriormente, pois os seus efeitos na temperatura média superficial são muito parecidos. Os valores encontrados para os parâmetros foram aqueles que minimizaram o desvio da temperatura média entre resultados experimentais e numéricos. Nota-se, na Figura 5.14, que a sensibilidade do desvio é maior para a altura do cilindro do que para o raio e para o centro. Percebe-se na Figura 5.14 que a sensibilidade do desvio em relação ao posicionamento do cilindro é muito baixa (abaixo de 1°C). Isto ocorre porque o índice usado para o ajuste (temperatura média) não é tão sensível ao posicionamento. Mas, caso um outro índice fosse utilizado, talvez os resultados fossem melhores.

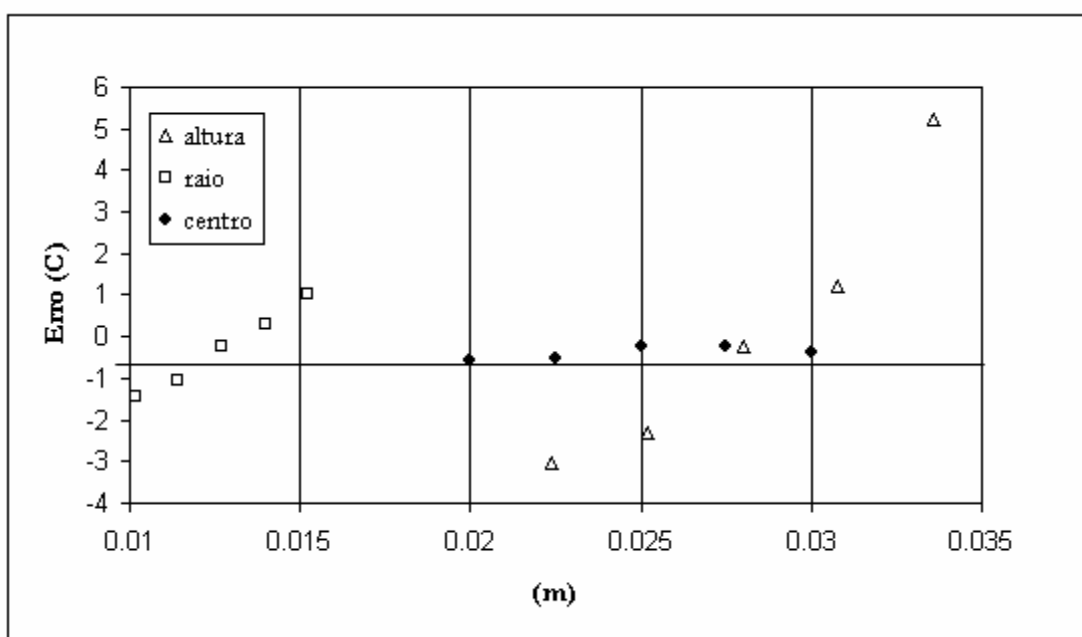


Figura 5.14 – Desvio entre as temperaturas médias superficiais experimentais e simuladas (para o quadrante superior esquerdo) para a altura, o raio e o centro da inclusão metálica

Percebe-se, através da Figura 5.15, que se mantendo constante a geometria da inclusão metálica o desvio aumenta à medida que a capacidade térmica da inclusão é aumentada, já que o cilindro passa a armazenar mais energia e ter uma influência maior na distribuição de temperatura da placa.

A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos dos parâmetros da inclusão metálica.

Parâmetro	Valor Nominal	Valor Encontrado	Erro no Pior Cenário (1 °C)	Erro no Melhor Cenário (0,08 °C)
Capacidade térmica do aço	$3,76 \times 10^6 \text{ J/m}^3$	$3,95 \times 10^6 \pm 0,2 \times 10^6 \text{ J/m}^3$	$\pm 0,8 \times 10^6 \text{ J/m}^3$	$\pm 0,06 \times 10^6 \text{ J/m}^3$
Raio da inclusão	0,0127 m	$0,0133 \pm 0,006 \text{ m}$	$\pm 0,003 \text{ m}$	$\pm 0,0002 \text{ m}$
Centro da inclusão	0,025 m	$0,026 \pm 0,001 \text{ m}$	---	---
Altura da inclusão	0,028 m	$0,029 \pm 0,002 \text{ m}$	$\pm 0,015 \text{ m}$	$\pm 0,0002 \text{ m}$

Tabela 5.2 – Resultados da determinação de parâmetros termofísicos e geométricos da inclusão metálica

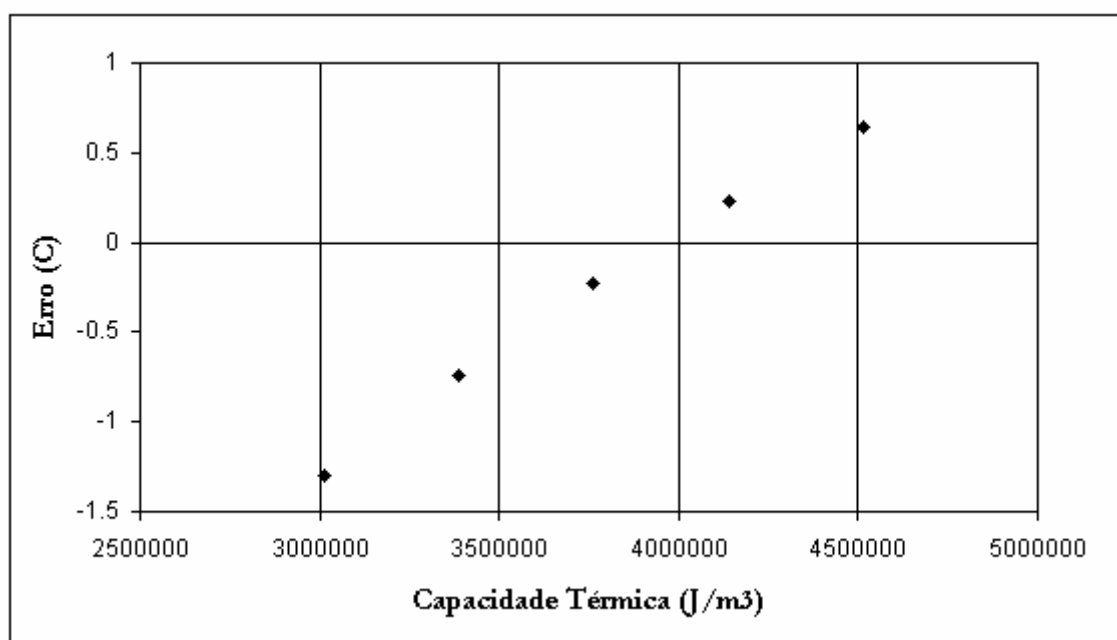


Figura 5.15 – Desvio entre as temperaturas médias superficiais experimentais e simuladas (para o quadrante superior esquerdo) em função da capacidade térmica da inclusão

Com relação à precisão final do método, foram realizadas várias simulações com o objetivo de determinar quais variações de parâmetros poderiam causar variação na temperatura média superficial de 0,08 °C (chamada de melhor cenário na Tabela 5.2) e de 1 °C (chamada de pior cenário na Tabela 5.2). Essas duas situações representam os valores do limite inferior e do superior esperados de incerteza. A Tabela 5.2 mostra a incerteza para as duas situações, onde se observa que os valores encontrados ficaram sempre entre os limites esperados de 2% (melhor cenário) e de 20% (pior cenário). O pior cenário poderia ser alcançado se apenas um sensor de infravermelho fosse usado ou se todos os milhares de sensores tivessem exatamente o mesmo erro máximo de 1 °C.

Em métodos inversos o erro de um experimento é amplificado. Por isso, não é bom utilizar um método experimental com precisão ruim em estimativas de parâmetros. No presente caso, trabalhou-se com medições de milhares de pontos de temperatura.

Acreditamos que os bons resultados obtidos com o método apresentado ocorreram porque os erros de cada elemento sensor foram anulados quando a temperatura média superficial foi calculada. Por isso, também foram feitas as simulações para $0,08\text{ }^{\circ}\text{C}$, ficando a incerteza do experimento próxima da sensibilidade do sensor e o erro da ordem de 2%. Em trabalhos futuros, para se determinar a verdadeira incerteza experimental serão necessárias: (a) realização de mais experimentos com várias amostras com outros pares de materiais inclusão/amostra, (b) variação do número de pontos de temperatura considerados no cálculo da temperatura média superficial das amostras, e (c) utilização da teoria de métodos inversos para a determinação do ponto ótimo do experimento para a determinação dos parâmetros.

5.5 Outro Método para Determinação do Centro da Inclusão Metálica

Em outro experimento, a amostra com inclusão foi aquecida manualmente de maneira irregular com uma pistola de ar quente, por 10 minutos, na superfície onde o cilindro ficou visível. Também foram realizados termogramas, do lado onde o cilindro ficou invisível, do período de resfriamento logo após a retirada da pistola, durante um período de 10 minutos com intervalo de 1 minuto entre cada um deles.

Comparando-se a Figura 5.7(a)-(c) e com a Figura 5.16(a)-(c), onde são apresentados os termogramas do resfriamento da amostra com inclusão após aquecimento em estufa e com pistola de ar quente, respectivamente, observa-se um contraste maior da inclusão quando a amostra é aquecida com a pistola. Mas, nessa forma de aquecimento, onde são realizados movimentos irregulares, não se tem controle das condições de contorno da amostra impedindo as comparações com os resultados das simulações numéricas. No futuro, através do posicionamento da pistola num local fixo e da simulação do escoamento do ar quente, talvez sejam possíveis as comparações dos resultados experimentais com os numéricos.

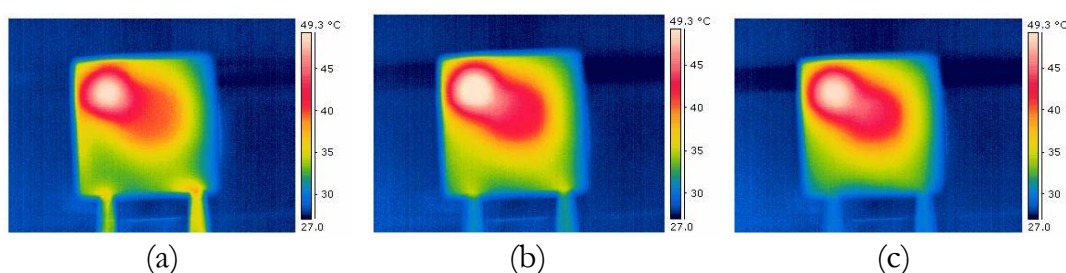


Figura 5.16 – Termogramas do resfriamento da amostra com inclusão após aquecimento com pistola de ar quente (a) 3 minutos após o aquecimento (b) 6 minutos após o aquecimento (c) 9 minutos após o aquecimento

A Figura 5.17(a) mostra um termograma da amostra com inclusão quando a escala de temperatura foi diminuída para uma diferença total de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (apenas são mostrados pontos com temperaturas entre $55,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$). O efeito que o cilindro causa na placa pode ser visto claramente, e uma estimativa do centro pode ser feita com uma precisão muito boa, onde foi encontrado o valor de $0,027\text{ m}$, como ilustra a Figura 5.17(b). Já para estimar o diâmetro da falha é necessária uma grande habilidade da pessoa que trabalha

com as imagens térmicas na determinação da melhor faixa de temperatura do termograma que propicia o melhor contraste entre a placa de gesso e a anomalia.

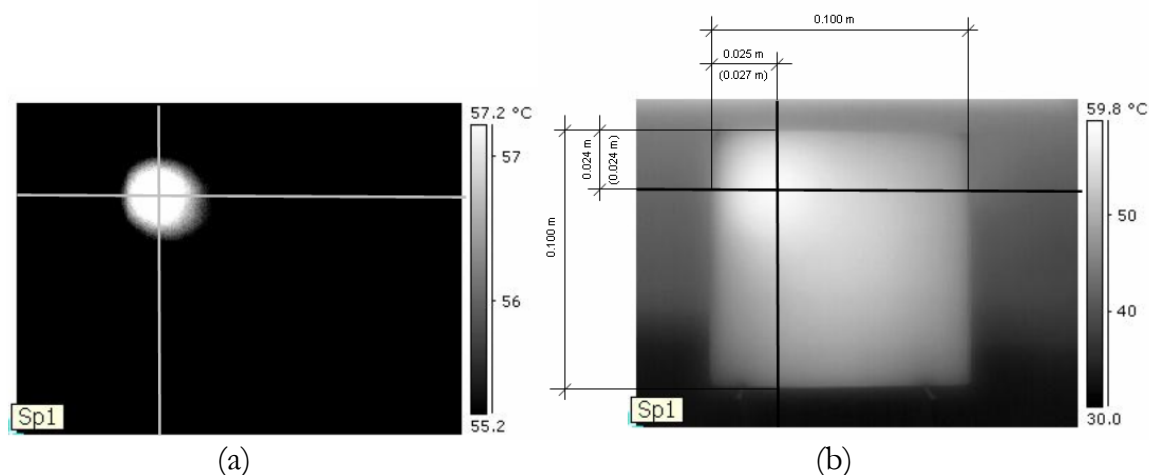


Figura 5.17 – Estimativa do centro do defeito a partir de termograma realizado após aquecimento com pistola de ar quente

5.6 Análise Numérica de Pares de Materiais Inclusão/Amostra

Outra análise numérica realizada foi sobre a influência dos parâmetros no máximo desvio entre a amostra pura e a amostra com inclusão. O desvio nos termogramas do par gesso/aço ficou em torno de 4 °C, que também foi o valor aproximado do desvio nas simulações numéricas desse par, como ilustra a Figura 5.13.

Desse estudo numérico foram encontrados os seguintes desvios que poderiam ser experimentalmente obtidos: (a) 1 °C para o par aço/gesso, sendo aqui o gesso o material da inclusão e o aço o principal material, (b) 1,5 °C para o par gesso/concreto e (c) 2 °C para o par concreto/aço; os gráficos da evolução da temperatura média simulada para os pares citados estão ilustrados nas Figuras 5.18, 5.19 e 5.20. Esses resultados explicam o sucesso do presente método na determinação de parâmetros na escolha das amostras.

As deficiências do método exposto podem ser classificadas em dois tipos, quanto à abrangência, onde: (a) apenas um par de materiais amostra/inclusão foi testado, (b) apenas uma configuração da amostra foi testada, (c) apenas um índice foi utilizado para a minimização do erro (temperatura média superficial), e (d) não foi realizado um estudo de sensibilidade; e quanto à precisão, onde: (a) foi realizado o manuseio da amostra no início do experimento, (b) os coeficientes de convecção foram calculados a partir de correlações empíricas, (c) foi utilizada uma malha numérica pequena, e (d) o método de determinação foi o de minimização do erro a partir de busca exaustiva.

As deficiências do primeiro tipo, abrangência, podem ser superadas apenas com a continuação natural do uso do método. Mas as deficiências do segundo tipo, precisão, necessitam de modificações no método tais como a montagem de uma bancada, onde seja possível o controle das condições de contorno da amostra, e uso de métodos de determinação de parâmetros automatizados.

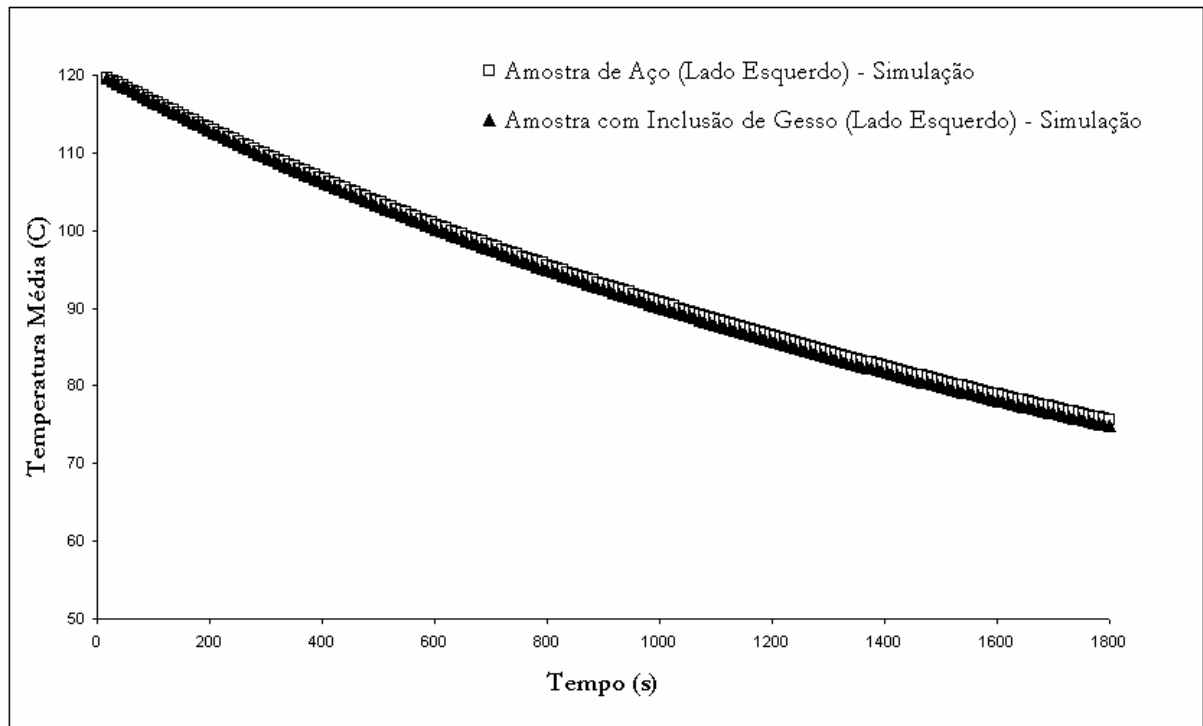


Figura 5.18 – Evolução da temperatura média simulada das amostras de aço e da amostra com inclusão de gesso

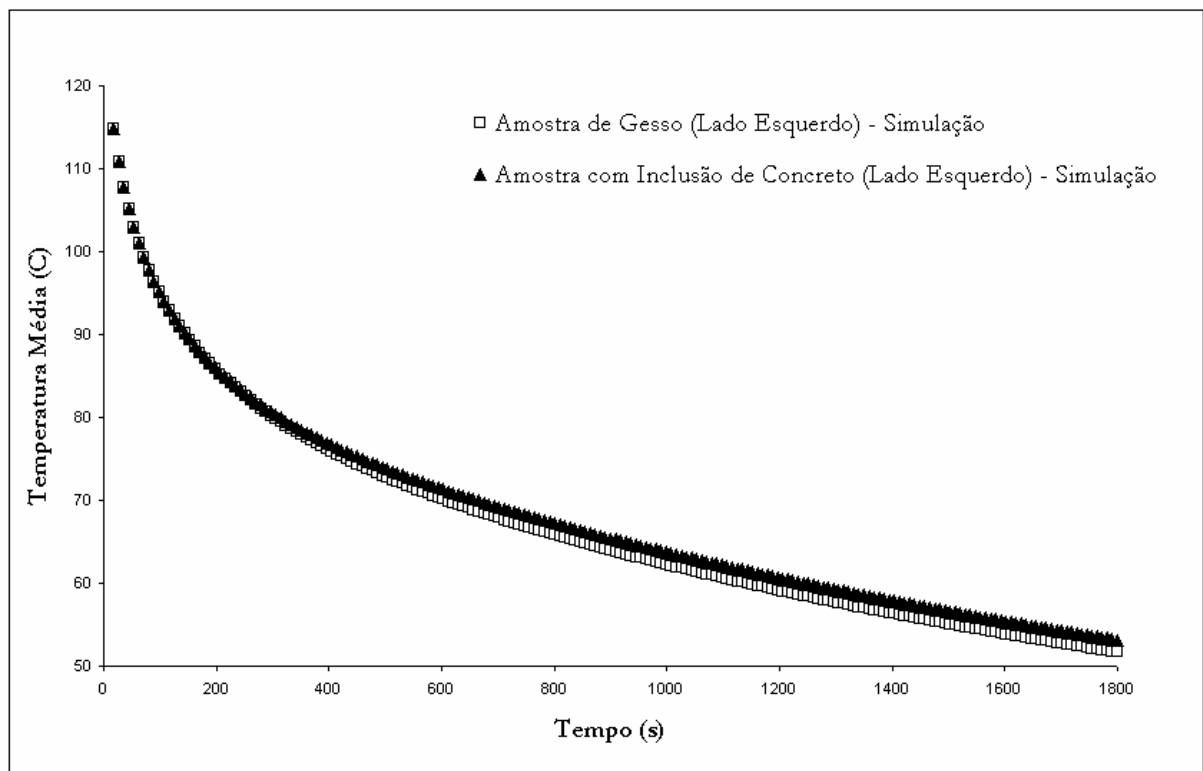


Figura 5.19 – Evolução da temperatura média simulada da amostra de gesso e da amostra com inclusão de concreto

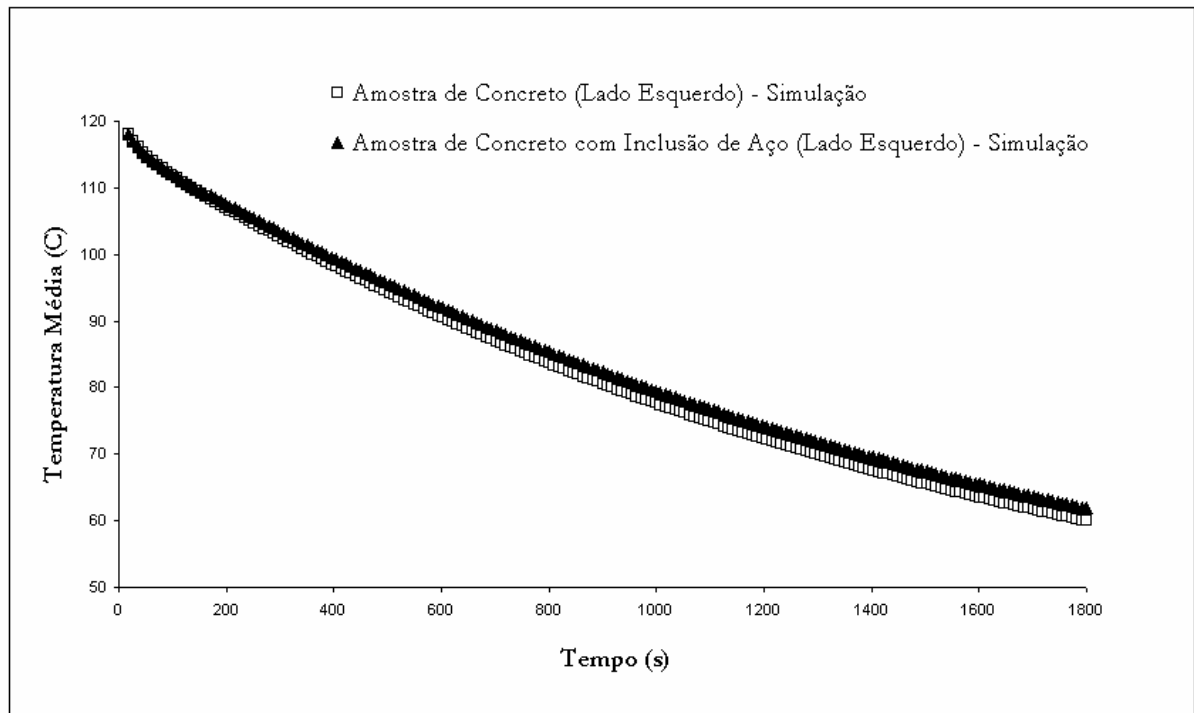


Figura 5.20 – Evolução da temperatura média simulada da amostra de concreto e da amostra de concreto com inclusão de aço

6. CONCLUSÃO

Imagens térmicas de superfícies podem ser obtidas através de termografia por infravermelho. A maior parte da utilização da termografia está no campo de análises qualitativas. Isso porque as câmeras modernas possuem uma relativa baixa precisão, apesar da grande sensibilidade. Mas as informações de temperatura dos termogramas também podem ser usadas em análises quantitativas, como na determinação de perdas de calor em equipamentos industriais de grande porte e na determinação de parâmetros termofísicos e geométricos, como mostrado neste trabalho.

O estudo da teoria do infravermelho, das grandezas e dos parâmetros do objeto estudado, bem como das nomenclaturas existentes na literatura, permitem uma medição termográfica mais próxima do real e uma comunicação melhor dos resultados obtidos. O operador de uma câmera de infravermelho precisa inserir corretamente os valores dos parâmetros solicitados pelo equipamento, pois esses estão presentes nas equações, mostradas no Capítulo 2, para a determinação da temperatura a partir de termografia. Também é importante que o inspetor termográfico reconheça as situações difíceis de medição. Essas acontecem quando há fontes perturbadoras de radiação ou a emissividade do objeto é baixa, e um cuidado maior deve ser tomado na entrada dos valores de parâmetros.

As aplicações da termografia apresentadas mostraram que este tipo de ensaio não-destrutivo pode ser usado desde a simples visualização de um fenômeno básico até a determinação de parâmetros termofísicos e geométricos. As imagens térmicas podem ser utilizadas tanto para um entendimento melhor de determinado processo, como uma mistura de fluidos em temperaturas diferentes, quanto para a visualização do formato e dos detalhes da chama do gás natural. Na engenharia, a distribuição de temperatura fornecida pelas imagens térmicas pode auxiliar no diagnóstico de falhas em edificações e na detecção de pontos quentes em instalações elétricas. Na medicina, alterações na temperatura da pele de um paciente podem levar a um diagnóstico precoce de doenças. Termogramas também podem ser utilizados para a identificação de avarias em refratários de fornos industriais e na quantificação de perdas de calor através das regiões com problemas. A partir da realização de inspeções termográficas em indústrias da região observou-se a importância de alguns cuidados a serem tomados, como o conhecimento prévio do processo a ser analisado e o ajuste da câmera de infravermelho para uma faixa de temperatura adequada ao objeto a ser analisado.

A comparação entre resultados experimentais e soluções de modelos matemáticos (computacionais ou analíticas) permite resolver problemas mal postos. Neste trabalho foi realizada a discretização do modelo matemático de amostras em forma de placa. Foram necessários quatro programas computacionais: (a) para a extração de temperaturas das imagens térmicas; (b) para a solução do problema numérico e a comparação entre dados experimentais e simulados das amostras; (c) para a comparação de resultados simulados das amostras; (d) para a comparação de dados experimentais extraídos dos termogramas da superfície das amostras.

Para o caso analisado, de determinação de parâmetros termofísicos e geométricos, bons resultados foram obtidos, com a grande vantagem de que o experimento é barato e simples: amostras foram aquecidas em uma estufa, suas distribuições de temperatura

foram gravadas através de termografia durante o processo de resfriamento por convecção natural e uma malha numérica pequena (20x20x20) foi usada para simular o fenômeno. A quase inexistente influência da manipulação das amostras, da baixa precisão das medições termográficas e do pequeno tamanho da malha numérica foi devido à grande resistência térmica interna do gesso e do grande número de pontos de temperatura que os termogramas forneceram. Primeiramente foram obtidos os valores da condutividade térmica e da capacidade térmica do gesso. Numa segunda análise foram obtidos os parâmetros da inclusão de aço. Para esta, apenas um parâmetro pôde ser determinado de cada vez, enquanto os outros três permaneciam constantes. A impossibilidade de encontrar os parâmetros simultaneamente é porque os seus efeitos na temperatura média superficial da amostra são muito parecidos.

A aplicação da termografia em uma análise quantitativa mostrou-se bem sucedida, levando-se em consideração a simplicidade do experimento, onde foi possível: (a) determinar a condutividade térmica e capacidade térmica do gesso; (b) determinar a posição, o raio, a altura e a capacidade térmica da inclusão de aço; (c) utilizar um modelo computacional relativamente grosseiro; (d) usar coeficientes de convecção calculados a partir de correlações empíricas clássicas; (e) manusear as amostras no início do experimento sem influenciar nos resultados; e (f) usar um equipamento com relativa baixa precisão (± 2 °C) para um problema inverso que, em geral, por ser um problema mal posto, necessita de boa precisão experimental.

Propostas para Trabalhos Futuros

O método apresentado para o caso de determinação de parâmetros termofísicos e geométricos, neste trabalho, demanda melhoramentos para aprimorar os procedimentos e expandir o número de casos estudados, tanto experimentalmente quanto computacionalmente.

Em relação às simulações são sugeridos: (a) uma simulação do processo de resfriamento, tanto da condução interna à amostra, realizada neste trabalho, quanto da convecção externa; (b) um estudo computacional mais completo sobre a influência do parâmetro estudado na evolução superficial da temperatura.

Algumas propostas relativas aos experimentos são: (a) a construção de uma bancada em que não seja necessário o manuseio da amostra, para que a convecção externa à amostra possa ser controlada; (b) a realização de experimentos sobre amostras em formatos diferentes de uma placa quadrada, e constituídas de outros pares de materiais e de outras configurações de inclusões escondidas.

Para a determinação de parâmetros são propostos: (a) a validação do modelo computacional em relação a alguns casos experimentais-limite; (b) a caracterização da evolução térmica das amostras usando outros índices além da temperatura superficial média; (c) a automatização do método de minimização de erros; (d) o uso de métodos mais robustos de solução de problemas inversos; (e) um estudo da influência do número de pontos experimentais usados no cálculo da temperatura média; (f) a determinação da propagação do erro experimental, em função do número de pontos, no parâmetro determinado.

7. BIBLIOGRAFIA

ALBUQUERQUE, R. F. *Refrigeração Solar para Leite: uma Proposta para o Semi-Árido Nordeste*. Recife, 2005. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco.

AL-KASSIR, A. R.; FERNANDEZ, J.; TINAUT, F. V.; CASTRO, F. Thermographic study of energetic installations. *Applied Thermal Engineering*, v. 25, p. 183–190, 2005.

ALMEIDA, C. H. T.; da SILVA, N. A.; MICHALEWICZ, J. S.; MAGNANI, F. S.; GUERRERO, J. R. H. *Visualização da Chama do Gás Natural em Queimador Utilizando Termografia e Adição de Particulados*. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4, 2006. Recife-PE: Anais do CONEM 2006.

ANG, C. N.; WANG, Y. C. The Effect of Water Movement on Specific Heat of Gypsum Plasterboard in Heat Transfer Analysis under Natural Fire Exposure. *Construction and Building Materials*, v. 18, p. 505–515, 2004.

ARAÚJO, M. C.; LIMA, R. C. F.; MAGNANI, F. S.; SANTOS, F. G. S.; DA SILVA, R. N. T. *Uma Investigação Preliminar da Possibilidade de Utilização de Câmera de Infravermelho para Detecção de Diferentes Patologias em Clima Tropical*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA, 20, 2006. São Pedro-SP: Anais do CBEB 2006.

ASTHEIMER, R. W. *Handbook of Infrared Radiation Measurements*. Stamford: Banes Engineering Co., 1983. Citado por: DERENIAK, E. L.; BOREMAN G. D. *Infrared Detectors and Systems*. United States of America: Wiley-Interscience, 1996.

BARREIRA, E.; DE FREITAS, V. P. Evaluation of Building Materials using Infrared Thermography. *Construction and Building Materials*, 2005. (In Press)

BAUKAL, C. E. *The John Zink Combustion Handbook*. United States of America: CRC Press LLC, 2001.

BECK, J. V.; BLACKWELL, B.; HAJI-SHEIKH, A. Comparison of some Inverse Heat Conduction Methods using Experimental Data. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 39, p. 3649-3657, 1996.

BECK, J. V.; BLACKWELL, B.; ST. CLAIR JR., C. R. *Inverse Heat Conduction. Ill-posed problems*. New York: Willey-Interscience Publication, 1985.

BEZERRA, L. A.; DA SILVA, R. N. T.; GUERRERO, J. R. H.; MAGNANI, F. S. *Estudo da Influência de Parâmetros na Medição por Termografia*. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4, 2006. Recife-PE: Anais do CONEM 2006.

BÜYÜKÖZTÜRK, O. Imaging of Concrete Structures. *NDT&E International*, v. 31, n. 4, p. 233-243, 1998.

CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. *Conduction of Heat in Solids*. Second Edition. New York: Oxford University Press, 1959.

CASTELETTI, C. E. M. *Análise Energética Experimental e Estudo da Viabilidade Econômica de um Grupo Gerador de 30kW e a Gás Natural em Diferentes Níveis e Cargas Elétricas*. Recife, 2005. 115p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco.

CASTELETTI, C. E. M.; MAGNANI, F. S.; PERES, S.; DUTRA, J. C. C. *Testing of a 30 kW Stationary Reciprocating Engine in Different Operational Loads – Perspective of the Microgeneration Using Natural Gas*. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 18, 2005. Ouro Preto-MG: Anais do COBEM 2005.

CHURCHILL, S. W.; USAGI, R. *A General Expression for the Correlations of Rates of Transfer and Other Phenomena*. AIChE J., 1972, (18): 1121-1128. Citado por: ROSHENOW, W. M.; HARTNETT, J. P.; CHO, Y. I. *Handbook of Heat Transfer*. Third Edition. United States of America: McGraw Hill, 1998.

CLARK, M. R.; McCANN, D. M.; FORDE, M. C. Application of Infrared Thermography to the Non-destructive Testing of Concrete and Masonry Bridges. *NDT&E International*, v. 36, p. 265-275, 2003.

DA SILVA, R. N. T.; MAGNANI, F. S. *Deteção de Inclusões Metálicas em Placas de Gesso através de Termografia Ativa*. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4, 2006. Recife-PE: Anais do CONEM 2006.

DA SILVA, R. N. T.; MAGNANI, F. S.; LIMA, R. C. F. *Algumas Aplicações do Uso da Termografia na Deteção de Falhas*. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4, 2006a. Recife-PE: Anais do CONEM 2006.

DA SILVA, R. N. T.; LIRA Jr., J. C.; MAGNANI, F. S.; GUERRERO, J. R. H. *Análise Energética Global de um Forno de Aquecimento de Tarugos com Auxílio de Termografia*. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4, 2006b. Recife-PE: Anais do CONEM 2006.

DATTOMA, V.; MARCUCCIO, R.; PAPPALETTERE, C.; SMITH, G. M. Thermographic Investigation of Sandwich Structure made of Composite Material. *NDT&E International*, v. 34, p. 515-520, 2001.

DEPARTMENT OF PHYSICS & ASTRONOMY OF GEORGIA STATE UNIVERSITY. Disponível em: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph>>. Acesso em: 03 nov. 2006

DERENIAK, E. L.; BOREMAN G. D. *Infrared Detectors and Systems*. United States of America: Wiley-Interscience, 1996.

DOUZANE, O.; ROUCOULT, J. M.; LANGLET, T. Thermophysical Property Measurements of Building Materials in a Periodic State. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 42, p 3943-3958, 1999.

FLIR SYSTEMS. *ThermaCam S45 Manual do Operador*, 2005.

FLIR SYSTEMS. Disponível em: <www.flir.com>. Acesso em: 05 dez. 2006.

FUJII, T.; HONDA, H.; MORIOKA, M. *A Theoretical Study of Natural Convection Heat Transfer from Downward-facing Horizontal Surface with Uniform Heat Flux*. Int. J. Heat Mass Transfer, 1973, (16), 611-627. Citado por: KREITH, F. *The CRC Handbook of Thermal Engineering*. United States of America: CRC Press, 2000.

GONZÁLEZ, D. A.; MADRUGA, F. J.; QUINTELA, M. A.; LÓPEZ-HIGUERA, J.M. Defect Assessment on Radiant Heaters using Infrared Thermography. *NDT&E International*, v. 38, p. 428–432, 2005.

GUERRERO, I. C.; OCAÑA, S. M.; REQUENA, I. G. Thermal–physical Aspects of Materials used for the Construction of Rural Buildings in Soria (Spain). *Construction and Building Materials*, v. 19, p. 197–211, 2005.

HUANG, C-H.; CHIN, S-C. A Two-dimensional Inverse Problem in Imaging the Thermal Conductivity of a Non-homogeneous Medium. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 43, p. 4061, 2000.

HUANG, C-H.; TSAI, Y-L. A Transient 3-D Inverse Problem in Imaging the Time-dependent Local Heat Transfer Coefficients for Plate Fin. *Applied Thermal Engineering*, v. 25, p. 2478–2495, 2005.

HUDSON Jr., R. D., *Infrared System Engineering*. John Wiley and Sons Inc., 1969. Disponível em: <www.las.inpe.br/~cesar/Infrared/espectro.htm>. Acesso em 30 out. 2006.

IBARRA-CASTANEDO, C.; GONZÁLEZ, D.; KLEIN, M.; PILLA, M.; VALLERAND, S.; MALDAGUE, X. Infrared Image Processing and Data Analysis. *Infrared Physics & Technology*, v. 46, p. 75–83, 2004.

INAGAKI, T.; ISHII, T.; IWAMOTO, T. On the NDT and E for the Diagnosis of Defects using Infrared Thermography. *NDT&E International*, v. 32, p. 247–257, 1999.

INCROPERA, F. P.; DeWITT, D. P. *Introduction to Heat Transfer*. Second Edition. Singapore: John Wiley & Sons, Inc., 1990.

INFRARED SOLUTIONS. Disponível em: <www.infraredsolutions.com>. Acesso em: 03 nov. 2006

KIM, S. K.; JUNG, B. S.; KIM, H. J.; LEE, W. I. Inverse Estimation of Thermophysical Properties for Anisotropic Composite. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 27, p. 697–704, 2003.

KOTLARCHYK, M. *Electromagnetic Radiation and Interactions with Matter*. Citado por: HORNAK, J. *Encyclopedia of Imaging Science and Technology*. New York: Wiley, 2002.

KREITH, F. *The CRC Handbook of Thermal Engineering*. United States of America: CRC Press, 2000.

LABORATÓRIO ASSOCIADO DE SENSORES E MATERIAIS (LAS) DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Disponível em <www.las.inpe.br/~cesar/Infrared/espectro.htm>. Acesso em 30 out. 2006.

LEGRAND, A. -C.; MERIAUDEAU, F.; GORRIA, P. Active infrared non-destructive testing for glue occlusion detection within plastic lids. *NDT&E International*, v. 35, p. 177-187, 2002.

LIMA, R. C. F.; MAGNANI, F. S.; DA SILVA, R. N. T. *Deteção de Falhas em Monumentos Históricos de Olinda através de Imagens por Infravermelho – Uma Análise Preliminar*. In: SIMPÓSIO DE TÉCNICAS AVANÇADAS EM PRESERVAÇÃO DE BENS CULTURAIS, 3, 2006. Olinda-PE: ARC- Revista Brasileira de Arqueometria, Restauração e Conservação.

MAGNANI, F. S.; GUERRERO, J. R. H.; LIMA, R. C. F. *Studies of the Applicability of Infrared Imaging of Thermal Processes in Tropical Regions*. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 18, 2005. Ouro Preto-MG: Anais do COBEM 2005.

MAGNANI, F. S.; DA SILVA, R. N. T. Infrared Thermography Applied to the Quantitative Determination of Spatial and Thermophysical Parameters of Hidden Included Objects. *Applied Thermal Engineering*, 2006a. (SUBMETIDO E ACEITO COM MODIFICAÇÕES)

MAGNANI, F. S.; DA SILVA, R. N. T. *Relatório Interno do Grupo de Engenharia Térmica da UFPE: Relatório de Inspeção Termográfica de Caldeira*. Recife-PE, 2006b.

MALISKA, C. R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2004.

MEOLA, C.; CARLOMAGNO, G. M.; GIORLEO, L. The Use of Infrared Thermography for Materials Characterization. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 155-156, p. 1132-1137, 2004.

NILLOT, C.; CALLET, P. Infrared Thermography Applied to the Resolution of Inverse Heat Conduction Problems: Recovery of Heat Line Sources and Boundary Conditions. *Rev. Gén. Therm.*, v. 37, p. 629-643, 1998.

ÖZISIK, M. N.; ORLANDE, H. R. B. *Inverse Heat Transfer*. New York: Taylor & Francis, 2000.

RAINIERI, S.; PAGLIARINI, G. Data Filtering Applied to Infrared Thermographic Measurements Intended for the Estimation of Local Heat Transfer Coefficient. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 26, p. 109-114, 2002.

RAITHBY, G. D.; HOLLANDS, K. G. T. *A General Method of Obtaining Approximate Solutions to Laminar and Turbulent Free Convection Problems*. Citado por: IRVINE, T. F.; HARNETT, J. P. *Advance in Heat Transfer*. New York: Academic, 1975. Citado por: ROSHENOW, W. M.; HARTNETT, J. P.; CHO, Y. I. *Hanbook of Heat Transfer*. Third Edition. United States of America: McGraw Hill, 1998.

ROSHENOW, W. M.; HARTNETT, J. P.; CHO, Y. I. *Hanbook of Heat Transfer*. Third Edition. United States of America: McGraw Hill, 1998.

SIEGEL R. S.; HOWELL J. R. *Thermal Radiation Heat Transfer*. Fourth Edition. United States of America: Taylor Francis, 2002.

VENKATESAN, G.; JIN, G-P.; CHYU, M-C.; ZHENG, J-X.; CHU, T-Y. Measurement of Thermophysical Properties of Polyurethane Foam Insulation during Transient Heating. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 40. p. 133-144, 2001.

7.1 LEITURA ADICIONAL

SPECTOR, N. *Manual para Redação de Teses, Projetos de Pesquisa e Artigos Científicos*. Segunda Edição. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2001.

WIEBELT, J. A. *Engineering Radiation Heat Transfer*. United States of America: Holt, Rinehart and Winston, 1966.

ANEXO 1

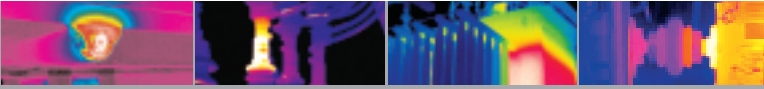
Datasheet ThermaCam S45 FLIR Systems



The Global Leader in Infrared Cameras

ThermaCAM® S45

INFRARED CAMERA



The ThermaCAM® S45 is a refined infrared research system. Its powerful new features and conveniences enable the professional thermographer to work with unprecedented efficiency and productivity. Working in concert with ThermaCAM Researcher and database software, the S45 greatly facilitates the process of collecting, reporting, and archiving infrared images and thermal data.



- > Outstanding Thermal Image Quality
- > Radiometric JPEG Image Storage
- > Removable CompactFlash Memory
- > Radiometric FireWire and Ethernet Connectivity
- > High Thermal Sensitivity and Precise Temperature Measurement
- > Auto-focus Plus Auto-hot-spot Tracker & Digital Zoom

Extraordinary Thermal Sensitivity and Imaging Quality

A thermal sensitivity of 0.08°C lets you see the smallest temperature differences clearly. The S45 is ready for action in seconds, thanks to its state-of-the-art 320 x 240 uncooled microbolometer detector. A total of 76,000 pixels provide real-time, crisp, high-resolution 16-bit thermal images.

Real-time Digital Storage and Analysis

Video rate imaging (60 Hz) allows you to inspect fast moving objects and scan while moving without image smear. The built-in color viewfinder provides bright, crisp images under virtually all conditions. Radiometric FireWire (IEEE 1394) output provides the bandwidth for fast downloading of calibrated thermal video of high-speed events.

Easy to Operate

Ergonomic, intuitive controls make operation seamless and efficient. User-friendly joystick, familiar menus, and soft control buttons on the camera body provide easy one-handed operation.

Rugged and Lightweight

The S45 was designed for use in harsh environments. It has an IP54 industrial shock rating and complete environmental encapsulation. At only 3 lbs. including battery, it is the lightest full-featured infrared camera available.

Flexible Image Storage

With the S45, memory capacity is infinite. Images can be stored in Windows-friendly JPEG format on a removable CompactFlash® memory card and can be transferred from RAM to the memory card. The image gallery feature allows you to browse through thumbnails and select the image you need quickly and easily.

Voice Recording

The S45 can record up to 30 seconds of voice comment with each image using the included headset.

Special Features Boost Your Efficiency

Powerful auto-focus and auto-hot-spot features save time and effort. The S45 can automatically indicate the temperature and position of the hottest spot in the image and instantly calculate the difference between different measurement points. Sound and color alarms warn when targets exceed temperature maximums set by the user.

Wide Range of Accessories

Optional optics range from microscopic through wide-angle and telescopic to meet diverse applications requirements. Innovative, miniature wearable infrared heads-up displays (IR-HUD) are available, which can augment situational awareness. Lightweight, longlife Li-Ion batteries assure uninterrupted inspections. The S45 comes with an external 2-bay battery charger and an internal battery charger. A 12 VDC car/truck charger adapter is also available.

Optional Software Does the Work For You!

ThermaCAM Researcher reporting and analysis software analyzes your data in real time. ThermaCAM Database software enables you to trend, archive, and organize inspection data and reports quickly and easily. ThermaCAM Image Builder knits multiple IR images together to create a single radiometric composite.

Upgradeability

Designed to grow with your thermal imaging needs, the S45 is upgradeable to the full-featured ThermaCAM S65 automated IR research system specification.

ThermaCAM® S45 Technical Specifications

Imaging Performance	
Field of view/min focus distance	24° x 18° / 0.3 m
Spatial resolution (IFOV)	1.3 mrad
Electronic zoom function	2.4, interpolating
Focus	Automatic or manual
Digital image enhancement	Normal and enhanced
Detector type	Focal plane array (FPA) uncooled microbolometer; 320 x 240 pixels
Spectral range	7.5 to 13 µm
Image Presentation	
Viewfinder	Built-in high-resolution color LCD (TFT)
External display (optional)	Built-in high-resolution color LCD (TFT) with redundant controls
Video output	RS170 EIA/NTSC or CCIR/PAL
Measurement	
Temperature ranges	-40° C to +120° C (-40° F to +248° F), Range 1 0° C to +500° C (+32° F to 932° F), Range 2 +350° C to +1500° C (+662° F to +2732° F), Range 3 Up to +2000° C (+3632° F), optional
Accuracy (% of reading)	± 2° C or ± 2%
Measurement modes	Up to 10 movable spots. Automatic temperature difference (Δ) and placement and reading of maximum and minimum temperatures. Up to 5 movable circle areas or boxes. Up to 2 Isotherms. Line profile.
Emissivity corrections	Variable from 0.1 to 1.0 or select from listings in pre-defined material list
Measurement features	Automatic corrections based on user input for reflected ambient temperature, distance, relative humidity, atmospheric transmission, and external optics
Optic transmission correction	Automatic, based on signals from internal sensors
Image Storage	
Type	Removable CompactFlash® (256 MB) memory card
File format	Standard JPEG; 14 bit thermal measurement data included
Voice annotation of images	Input via supplied headset up to 30 seconds of digital voice clip" per image stored with image
System Status Indicator	
LCD display	Shows status of battery and storage media. Indication of power, communication and storage modes.
Power Source	
Battery type	Li-Ion, rechargeable, field-replaceable
Battery operating time	2 hours continuous operation
Charging system	In camera or 2 bay intelligent charger 12V
External power operation	AC adapter 110/220 VAC, 50/60Hz or 12V from car (cable with standard plug optional)
Power saving	Automatic shutdown and sleep mode (user-selectable)
Environmental	
Operating temperature range	-15° C to +50° C (5° F to 122° F)
Storage temperature range	-40° C to +70° C (-40° F to 158° F)
Humidity	Operating and storage 10% to 95%, non-condensing
Encapsulation	IP 54 IEC 529
Shock	Operational: 25G, IEC 68-2-29
Vibration	Operational: 2G, IEC 68-2-6
Physical Characteristics	
Weight	1.4 kg (3 lbs), including battery
Size	100mm x 120mm x 220 mm (3.9" x 4.7" x 8.7")
Tripod mounting	1/4" - 20

ThermaCAM S45 System Includes:	
IR camera	
Carrying case, lens cap, shoulder strap, hand strap	
Manual (multi-lingual)	
Batteries (2)	
Power supply	
Battery charger	
FireWire® (IEEE 1394) cable	
Video cable with RCA plug	
USB cable	
S-video cable	
256 MB CompactFlash® card	
ThermaCAM QuickView™ software	
Lenses (optional)	
Field of view/ minimum focus distance	3X Telescope (7° x 5.3°/4m) 2X Telescope (12° x 9°/1.2m) 0.5X Wide angle (45° x 34°/0.1m) 0.3X Wide angle (80° x 60°/0.1m) 200 µm Close-up (64mm x 48mm/150mm) 100 µm Close-up (34mm x 25mm/80mm) 50 µm Close-up (15mm x 11mm/19mm) Wearable Optics/Heads-up Display
Interfaces	
Firewire output (IEEE 1394)	Real-time (60 Hz) digital transfer of radiometric thermal images or digital video (DV) out
USB / RS232	Image (thermal and visual), measurement data, voice and text transfer to PC
IrDA	Two-way data transfer from laptop, PDA



The Global Leader in Infrared Cameras

1 800 464 6372
www.flirthermography.com/S45data

Specifications subject to change. ©Copyright 2005, FLIR Systems, Inc. All rights reserved. I061405PL