

THIAGO GHELFI SEMANN

**IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS INTERNOS
EM MATERIAIS METÁLICOS ATRAVÉS DA
TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA**

Curitiba - PR, Brasil

2019

THIAGO GHELFI SEMANN

**IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS INTERNOS EM
MATERIAIS METÁLICOS ATRAVÉS DA
TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA**

apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Pontifícia Uni-
versidade Católica do Paraná como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.

Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM

Orientador: Prof. Dr. LUÍS MAURO MOURA
Coorientador: Prof. Dr. STEPHAN HENNINGS OCH

Curitiba - PR, Brasil

2019

THIAGO GHELFI SEMANN

IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS INTERNOS EM MATERIAIS METÁLICOS ATRAVÉS
DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

THIAGO GHELFI SEMANN. – Curitiba - PR, Brasil, 2019-

84 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. LUÍS MAURO MOURA

Coorientador: Prof. Dr. STEPHAN HENNINGS OCH

Dissertação OU Tese –

Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM, 2019.

1. Termografia-Infravermelha. 2. Detecção-de-Defeito. 3. TIR. 4. MVF. 5. Identificação-de-Propriedades. 6. Otimização.

THIAGO GHELFI SEMANN

**IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS INTERNOS EM
MATERIAIS METÁLICOS ATRAVÉS DA
TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA**

apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Pontifícia Uni-
versidade Católica do Paraná como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.

Trabalho aprovado. Curitiba - PR, Brasil, 28 de fevereiro de 2019:

Prof. Dr. LUÍS MAURO MOURA
Orientador

**Prof. Dr. STEPHAN HENNINGS
OCH**
Coorientador

Prof. Dr. GILMAR GUIMARÃES
Convidado 1

**Prof. Dr. ROBERTO ZANETTI
FREIRE**
Convidado 2

Curitiba - PR, Brasil
2019

Agradecimentos

Ao meus pais, Adriana Ghelfi Semann e Luiz Fernando Semann, que estiveram sempre presentes com seu carinho e exemplo para me ajudar a conquistar meus objetivos. Que sem eles seria impossível a realização deste sonho.

A minha namorada, Fatima Thays Esthesne, pelo amor, carinho e compreensão em todos os momentos difíceis durante todos estes anos juntos, principalmente durante a realização deste trabalho.

A minha vó Iara Regina Cardoso Ghelfi que me apoiou e me incentivou para realização deste trabalho.

Ao meu Orientador, Luis Mauro Moura, pela paciência, dedicação, incentivo e sabedoria que muito me auxiliou para conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso.

A todos aqueles que fizeram parte de minha formação mesmo os não citados aqui que direta ou indiretamente

Resumo

O presente trabalho é referente a identificação das propriedades termofísicas e de uma análise de defeitos em objetos metálicos através da termografia infravermelha, a qual analisa um corpo que sofre uma estimulação externa de temperatura, para que haja uma variação térmica na superfície do objeto, estudando o comportamento da curva de decaimento da temperatura através de uma câmera de infravermelho. Também é proposto uma formulação numérica para simular o processo térmico através do método de volumes finitos, o qual consiste na subdivisão do bloco em volumes, e na aplicação da formulação do balanço de energia em três dimensões e variante no tempo. Com esta ferramenta é possível analisar a difusão interna do calor de acordo com as propriedades termofísicas do material e de posição e tamanho do defeito, e também comparar o resultado desta simulação numérica com os ensaios realizados (contraste térmico). Para os ensaios experimentais foi desenvolvida uma bancada de testes, o material em estudo foi um bloco de alumínio com dimensões de 50 mm x 50 mm x 50 mm com um defeito interno com dimensões 13,34 mm x 13,34 mm x 1,67 mm. Foram realizadas algumas análises sobre a temperatura inicial do bloco, a profundidade e as propriedades termofísicas do defeito, o tempo computacional entre outras, para verificar a importância desses fatores sobre a detecção de defeitos. Para a identificação das propriedades termofísicas foi utilizado um método de otimização evolutiva (Evolução Diferencial), paralelizado através do *open MPI*. Depois de obtido os valores das propriedades é utilizado outro método de otimização, o qual consiste em um método híbrido baseado no modelo de Hooke e Jeeves, paralelizado através da biblioteca *OpenMp*, para a identificação e localização do defeito. Os dois métodos se provaram eficientes em suas propostas. Para a identificação e localização do defeito o mesmo pode ser feito até a profundidade de 33,34 mm sem erro em suas coordenadas e com um tempo computacional aceitável, para defeitos mais profundos será necessário a realização de dois ensaios ou uma outra câmera posicionada na face oposta.

Palavras-chave: Termografia Infravermelha, TIR, Detecção de Defeito, Identificação de Propriedades, MVF, Otimização, Otimização Evolutiva.

Abstract

The present work is related to the identification of thermophysical properties and an analysis of defects in metallic objects through infrared thermography, which analyzes a body that undergoes an external temperature stimulation, so that there is a thermal variation in the surface of the object, studying the behavior of the temperature decay curve through an infrared camera. It is also proposed a numerical formulation to simulate the thermal process through the finite volume method, which consists of the subdivision of the block into volumes, and the application of the energy balance formulation in three dimensions and time variant. With this tool it is possible to analyze the internal diffusion of the heat according to the thermophysical properties of the material and the position and size of the defect, and also to compare the results of this numerical simulation with the tests performed (thermal contrast). For the experimental tests a test bench was developed, the material under study was an aluminum block with dimensions of 50 mm x 50 mm x 50 mm with an internal defect of 13,34 mm x 13,34 mm x 1,67 mm. Some analyzes were performed on the initial temperature of the block, the depth and the thermophysical properties of the defect, the computational time among others, to verify the importance of these factors on the detection of defects. For the identification of the thermophysical properties an evolutionary optimization method Differential Evolution was used, paralleled through open MPI. After obtaining the property values another optimization method is used, which consists of a hybrid method based on the Hooke and Jeeves model, parallelized through the OpenMp library, for the identification and location of the defect. Both methods proved to be efficient in their proposals. For the identification and location of the defect, the same can be done up to the depth of 33.34 mm without error in its coordinates and with an acceptable computational time, for deeper defects it will be necessary to perform two tests or another camera positioned on the face opposite.

Keywords: Infrared Thermography, FVM, TIR, Defect Detection, Property Identification, Optimization, Evolutionary Optimization.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Transferência de calor por radiação	5
Figura 2 – Espectro de radiação eletromagnética, (RODRÍGUEZ, 2010)	6
Figura 3 – Poder espectral emissivo de um corpo negro.	9
Figura 4 – Possíveis métodos de um ensaio por TIR.	14
Figura 5 – Métodos de TIR ativa.	17
Figura 6 – Ensaio através da TIR Ativa.	22
Figura 7 – Matriz de temperatura 3D. Termogramas por tempo.	23
Figura 8 – Sequência completa de termogramas	24
Figura 9 – Curva de decaimento da temperatura, (RODRÍGUEZ, 2010)	25
Figura 10 – Perfis de temperatura, (RODRÍGUEZ, 2010)	26
Figura 11 – Contraste térmico, (RODRÍGUEZ, 2010)	26
Figura 12 – Contraste térmico máximo, (IBARRA-CASTANEDO, 2005)	27
Figura 13 – Interpolação no tempo,(MALISKA, 1995)	30
Figura 14 – Áreas de superfície em um material cúbico	33
Figura 15 – Condições de contorno em volume de fronteira	34
Figura 16 – Sentido TDMA	36
Figura 17 – Temperatura de superfície em um certo instante de tempo	37
Figura 18 – Curvas de decaimento de temperatura do modelo e da equação analítica	39
Figura 19 – Contraste térmico entre a temperatura do modelo e da solução analítica	39
Figura 20 – Esquema do método de Evolução Diferencial,(OCH, 2014)	44
Figura 21 – Primeiras iterações do método de Hooke e Jeeves,(S. Bazaraa; SHERALI; M. Shetty, 1979)	47
Figura 22 – Forno elétrico (NOVA TÉCNICA NT 512)	49
Figura 23 – Câmara Térmica	50
Figura 24 – Câmera Térmica(<i>FLIR SC620</i>)	50
Figura 25 – Bancada Experimental	51
Figura 26 – Peça de alumínio	53
Figura 27 – Desenho técnico da peça em alumínio	54
Figura 28 – Contraste térmico das média das temperaturas de superfícies para os parâmetros encontrados em relação aos originais	56
Figura 29 – Contraste térmico das média das temperaturas de superfícies para os parâmetros encontrados na imagem com ruído de 1 K	58
Figura 30 – Contraste térmico das média das temperaturas de superfícies para os parâmetros encontrados na imagem com ruído de 4 K	58
Figura 31 – Contraste térmico da temperatura de superfície com o defeito localizado na profundidade de 3,34mm	59

Figura 32 – Contraste térmico da temperatura de superfície com o defeito localizado na profundidade de 25mm	60
Figura 33 – Contraste térmico da temperatura de superfície com o defeito localizado na profundidade de 48,34mm	60
Figura 34 – Contraste térmico na temperatura inicial de 500 K para as profundidades de 3,34 mm, 25 mm, 48,34 mm	61
Figura 35 – Curva de decaimento da temperatura para T_i de 500 K	61
Figura 36 – Curva de decaimento da temperatura para T_i de 400 K	62
Figura 37 – Curva de decaimento da temperatura para T_i de 350 K	62
Figura 38 – Contraste térmico da temperatura de superfície modificando a profundidade do defeito	64
Figura 39 – Contraste térmico da temperatura de superfície no tempo variando a condutividade térmica	65
Figura 40 – Contraste térmico da temperatura de superfície no tempo variando o calor específico	66
Figura 41 – Contraste térmico da temperatura de superfície no tempo variando a massa específica	67
Figura 42 – Variação do parâmetro X em volumes.	68
Figura 43 – Variação do parâmetro Y em volumes.	69
Figura 44 – Variação do parâmetro Z em volumes.	69
Figura 45 – Independência da variável Y.	70
Figura 46 – Independência da variável Z.	70
Figura 47 – Contraste térmico entre as médias das temperaturas de superfície.	75
Figura 48 – Curvas de decaimento da média da temperatura de superfície.	76

Lista de tabelas

Tabela 1 – Variáveis Utilizadas	38
Tabela 2 – Vocabulário específico de algoritmos evolucionários	42
Tabela 3 – Propriedades da câmara FLIR SC620.	51
Tabela 4 – Propriedades utilizadas	55
Tabela 5 – Resultados obtidos através da otimização para ruído de 1 K	56
Tabela 6 – Propriedades do alumínio	57
Tabela 7 – Resultados obtidos através da otimização em um bloco de alumínio com ruído de 1 K	57
Tabela 8 – Resultados obtidos através da otimização em um bloco de alumínio com ruído de 4 K	58
Tabela 9 – Especificações dos testes alterando a profundidade do defeito	63
Tabela 10 – Valor do contraste térmico máximo e tempo onde o contraste atingiu seu valor máximo	64
Tabela 11 – Especificações dos testes alterando o valor da condutividade térmica	65
Tabela 12 – Especificações dos testes alterando o valor do calo específico	66
Tabela 13 – Especificações dos testes alterando o valor da massa específica	67
Tabela 14 – Resultados das propriedades obtidas	71
Tabela 15 – Resultados da otimização para defeito com profundidade de 5 mm e com ruído de 1 K	72
Tabela 16 – Resultados da otimização para defeito com profundidade de 5 mm e com ruído de 4 K	72
Tabela 17 – Resultados da otimização para defeito com profundidade de 25 mm e com ruído de 1 K	73
Tabela 18 – Resultados da otimização para defeito com profundidade de 25 mm e com ruído de 4 K	73
Tabela 19 – Resultados da otimização para defeito com profundidade de 33,34 mm e com ruído de 1 K	73
Tabela 20 – Resultados da otimização para defeito com profundidade de 33,34 mm e com ruído de 4 K	73
Tabela 21 – Resultados para 5 mm variando o tempo.	74
Tabela 22 – Resultados para 33,34 mm variando o tempo.	74
Tabela 23 – Resultados das propriedades obtidas	75
Tabela 24 – Propriedades térmicas utilizadas para o ensaio da detecção do defeito	77
Tabela 25 – Resultados da localização do defeito	77

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo Geral	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
2	REVISÃO DE LITERATURA OU REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1	História	4
2.2	Radiação	5
2.2.1	Radiação Infravermelha	6
2.3	Radiação do corpo negro	7
2.3.1	Lei de Plank	7
2.3.2	Lei do Deslocamento de Wien	8
2.3.3	Lei de Stefan Boltzmann	10
2.4	Intensidade total do corpo negro e poder de emissão (SIEGEL; HOWELL, 2016)	10
2.5	Emissão de superfícies reais (SIEGEL; HOWELL, 2016)	11
2.5.1	Emissividade Direcional Espectral (SIEGEL; HOWELL, 2016)	11
2.5.2	Emissividade Total Direcional (SIEGEL; HOWELL, 2016)	12
2.5.3	Emissividade Espectral Hemisférica (SIEGEL; HOWELL, 2016)	13
2.5.4	Emissividade Total Hemisférica (SIEGEL; HOWELL, 2016)	13
2.6	Ensaio não destrutivo através da termografia infravermelha	14
2.6.1	Cenários para ensaios com termografia infravermelha	14
2.6.1.1	Abordagens	15
2.6.1.2	Configurações	16
2.6.1.3	Modos	18
2.6.1.4	Exploração	18
2.6.1.5	Fontes	19
2.6.1.6	Formas de Modulação da Onda	20
2.6.2	Técnicas de termografia infravermelhas ativa	20
2.6.3	Técnica Utilizada	22
2.6.3.1	Sequência completa de termogramas	23
2.6.3.2	Detecção de defeitos	24
2.6.3.3	Contraste térmico	25
2.7	Aplicações da Otimização	28
3	MODELO	29

3.1	Formulação Numérica	29
3.1.1	Formulação para volume interno genérico	29
3.1.2	Formulação para volumes na superfície	32
3.1.3	Solução do sistema linear de equações	34
3.2	Localização do defeito	36
3.3	Validação do modelo	37
3.4	Otimização	39
3.4.1	Métodos de Otimização	40
3.5	Minimização	43
3.5.1	Identificação das Propriedades do Material	43
3.5.1.1	Algoritmo de Otimização Evolucionária e Estratégia de Paralelização	45
3.5.2	Identificação e Localização dos Defeitos	46
3.5.2.1	Algoritmo para a Localização do defeito e Estratégia de Paralelização	47
4	MODELO EXPERIMENTAL	49
4.1	Realização do ensaio experimental	51
4.2	Cuidados na realização do ensaio experimental	52
4.3	Confecção das amostras	52
5	RESULTADOS OBTIDOS	55
5.1	Resultados Teóricos	55
5.1.1	Identificação das Propriedades Termofísicas do Material	55
5.1.2	Detecção de defeitos	59
5.1.2.1	Análise da Influência da Temperatura Inicial na Detecção de Defeitos	59
5.1.2.2	Influência da Posição do Defeito em sua Detecção	62
5.1.2.3	Análise da Importância das Propriedades Termofísicas do Defeito em sua Detecção	64
5.1.2.4	Mínimos Locais	67
5.1.2.5	Independência das Variáveis	70
5.1.2.6	Localização do Defeito	71
5.1.2.7	Influência do Tempo na Localização do Defeito	74
5.2	Resultados Experimentais	74
5.2.1	Identificação de Parâmetros	75
5.2.2	Detecção de Defeitos	77
6	CONCLUSÕES	79
6.1	Sugestões para Pesquisas Futuras	81
	REFERÊNCIAS	82

1 Introdução

Em decorrência da crescente demanda para o desenvolvimento de produtos e com a acirrada disputa no mercado competitivo nos dias de hoje, é necessário um aperfeiçoamento no controle de qualidade dos produtos desenvolvidos. Foi imprescindível o desenvolvimento de técnicas que realizassem uma inspeção de forma mais precisa, ágil e produtiva. Dessa maneira, as técnicas de Ensaio-Não-Destrutivo (END) começaram a desempenhar um papel mais importante nas empresas. (RODRÍGUEZ, 2014)

Estas técnicas END estão sendo desenvolvidas com o propósito de: monitorar os processos de produção; a integridade do material durante seu transporte, estoque e fabricação; e a depreciação do produto durante sua vida útil. As técnicas de END podem ser classificadas em sete maiores categorias: (HUNG et al., 2009)

1. Visual
2. Radiação Penetrante (Raio-X)
3. Eletricidade-Magnética (Corrente de Foucault)
4. Vibrações Mecânicas (Ultrassom)
5. Química
6. Radiação infravermelha e ensaios térmicos (Termografia Infravermelha)
7. Outros métodos ópticos

Estes métodos podem ser classificados em cinco categorias principais:

"1) fonte de energia ou meio usado para sondar o objeto (como raios-X, ondas ultra-sônicas e radiação térmica); (2) natureza dos sinais, imagem e / ou assinatura resultante da interação com o objeto (atenuação de raios-X ou reflexão de ultra-som, por exemplo); (3) meios de detectar sinais resultantes (fotoemissão, piezoelétrico bobina de cristal ou indutância); (4) método de indicação e / ou registro sinais (deflexão do medidor, traçado do osciloscópio ou radiografia); e (5) base para a interpretação dos resultados (indicação direta ou indireta, análise ou dependências quantitativas e pertinentes)." (RODRÍGUEZ, 2014)

Este trabalho é focado na área de Termografia Infravermelha (TIR). Consiste em analisar a variação temporal de temperatura de um corpo através de um sensoriamento

remoto, sem a necessidade de contato com o material, que interpreta as ondas eletromagnéticas emitidas e as transforma em termogramas para que se possa analisar e prever se existem defeitos no material estudado, este tipo de técnicas são conhecidas como *thermal nondestructive testing (TNDT)*. A TIR pode ser dividida em duas grandes áreas:

A termografia passiva se baseia em analisar um corpo sem uma estimulação externa de temperatura, contanto que o mesmo esteja em uma temperatura diferente do meio. Este método tem como objetivo procurar irregularidades no histórico de temperatura através de pontos quentes ou frios (*hot spots or cold spots*). Normalmente é utilizado para monitoração de componentes elétricos ou para problemas em isolamento térmicos em prédios. (MALDAGUE, 2001)

Já termografia ativa constitui em examinar um corpo que sofre uma estimulação externa de temperatura, para que haja uma variação térmica na superfície. Para analisar um objeto com um defeito interno (cavidades, inclusões, etc.) é necessário submeter o material a uma variação de temperatura, para que possa produzir padrões térmicos distintos entre os defeitos e o corpo do mesmo. A termografia ativa pode ser aplicada em uma grande escala de Ensaios-Não-Destrutivos (END), pois praticamente qualquer forma de energia pode ser utilizada para estimular o objeto estudado (MALDAGUE, 2001).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

A identificação e a localização de defeitos internos no material de metálico é o objetivo principal deste trabalho. O objetivo secundário é a identificação das propriedades termofísicas do material. Serão utilizadas algumas ferramentas numéricas, uma delas um modelo matemático (MVF) para representar as condições físicas do material e dois métodos de otimização. O primeiro método a ser implementado é o da evolução diferencial o qual serviu para a identificação das propriedades do material, o segundo é um método adaptado de Hooke e Jeeves o qual foi utilizado para a identificação de vazios (cavidades). Dessa forma temos os seguintes objetivos:

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Validação do modelo matemático (MVF).
2. Analisar e quantificar a precisão da detecção de defeitos através do modelo matemático, alterando as propriedades termofísicas, a profundidade do defeito, o tempo de ensaio e a temperatura inicial da peça.
3. Analisar a eficiência do método proposto.

4. Realizar a identificação das propriedades termofísicas $[\rho, h, c_p, k, e]$.
5. Identificar a existência do defeito e sua localidade.

Para isso serão necessários os seguintes passos:

1. Desenvolver um modelo matemático que represente as condições físicas do material (MVF).
2. Integrar o método de otimização (Evolução diferencial com o MVF).
3. Integrar o método de otimização (Hooke e Jeeves com o MVF).
4. Confeccionar os defeitos no material em questão.
5. Realizar os ensaios térmicos no material proposto.
6. Analisar os resultados obtidos.

2 Revisão de literatura ou referencial teórico

2.1 História

No ano de 1800 a região infravermelha do espectro eletromagnético foi descoberta por William Herschel, através de uma experiência utilizando um prisma e alguns termômetros. Herschel concluiu que poderiam existir raios luminosos que não eram perceptíveis à visão (raios invisíveis), mas que produziam calor. Estes raios posteriormente serão denominados de raios infravermelhos.([OLIVEIRA; SILVA, 2014](#)).

Em 1840 Jonh Herschel descobriu a primeira imagem infravermelha utilizando a técnica evaporográfica, ou seja, a evaporação do álcool obtido de uma superfície pintada com carbono ([HOLST, 2000](#)).

Em 1900 Max Planck esclareceu o experimento de Herschel com sua teoria, que descreve a distribuição de energia emitida por um corpo negro de acordo com o comprimento de onda para uma temperatura dada.

Em 1929 foi obtido por Czerny o primeiro termograma, que mais tarde (1940) passou a ser utilizado pela Alemanha para desenvolver um sistema de visão noturna com o objetivo de invadir a Rússia. Em resposta a este sistema os americanos desenvolveram o FLIR(Foward Looking Infra Red), utilizado inicialmente para a localização dos inimigos, e mais tarde em mísseis com detectores de calor. ([VERRATTI, 1992](#))

A partir da Segunda Guerra Mundial veio um grande avanço na área da TIR, embora muitas dessas aplicações desenvolvidas ficaram na área militar, dificultando assim o uso civil. ([RODRÍGUEZ, 2010](#)).

Durante os anos de 1960 e 1970 o domínio dessa técnica começou a passar da área militar para a civil, tendo suas primeiras aplicações nos mercados comerciais. Com esta mudança começou o desenvolvimento de algumas técnicas TIR, a qual hoje em dia é uma das técnicas END mais utilizadas. ([RODRÍGUEZ, 2010](#))

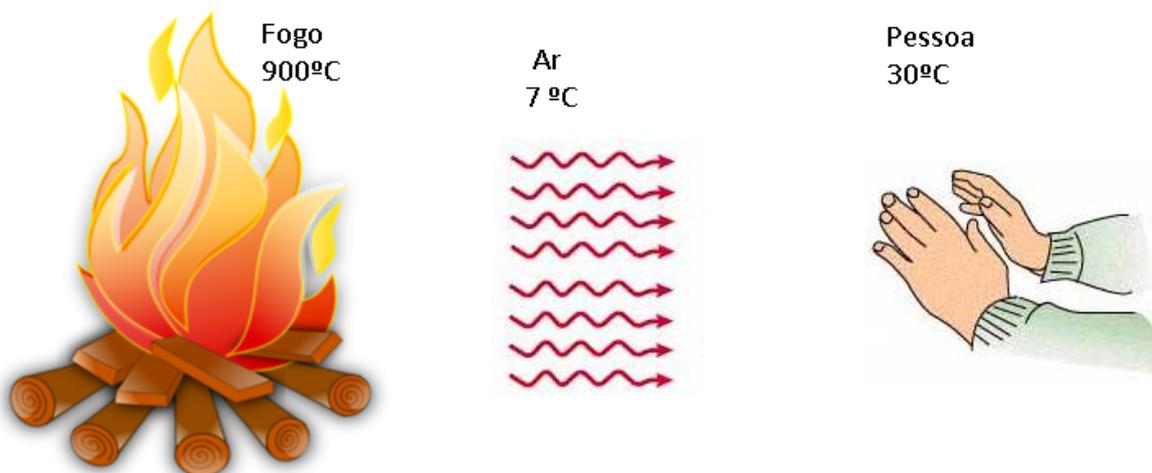
Com o crescimento do uso desta técnica na parte comercial, veio uma grande demanda para avanços tecnológicos, permitindo assim a melhora no hardware e software das câmeras infravermelhas, juntamente com o avanço dos computadores. ([RODRÍGUEZ, 2010](#))

2.2 Radiação

A radiação se mostra diferente dos outros mecanismos de troca de calor, no fato de que não necessita da presença de um suporte material. Esta transferência de energia por radiação na realidade é mais rápida (na velocidade da luz) que as outras, não sofrendo atenuação no vácuo. Na maior parte das vezes em situações práticas vemos a atuação dos três modos de transferência de calor, mas no vácuo esta só ocorrerá na forma de radiação, como por exemplo a propagação de energia do Sol no espaço até a Terra.

A transferência de calor sempre ocorre no sentido do mais quente para o mais frio, ou seja, necessita que haja dois corpos, sendo um com uma temperatura mais elevada que a do outro. É interessante ressaltar que a transferência de calor na forma de radiação pode ocorrer entre dois corpos separados por um meio mais frio, como mostra a figura 1, como por exemplo uma estufa, esta atinge uma temperatura na parte interior elevada se a compararmos com a de sua cobertura (normalmente de vidro ou plástico) que continua a ser relativamente fria.(INCROPERA; DEWITT, 1996)

Figura 1 – Transferência de calor por radiação

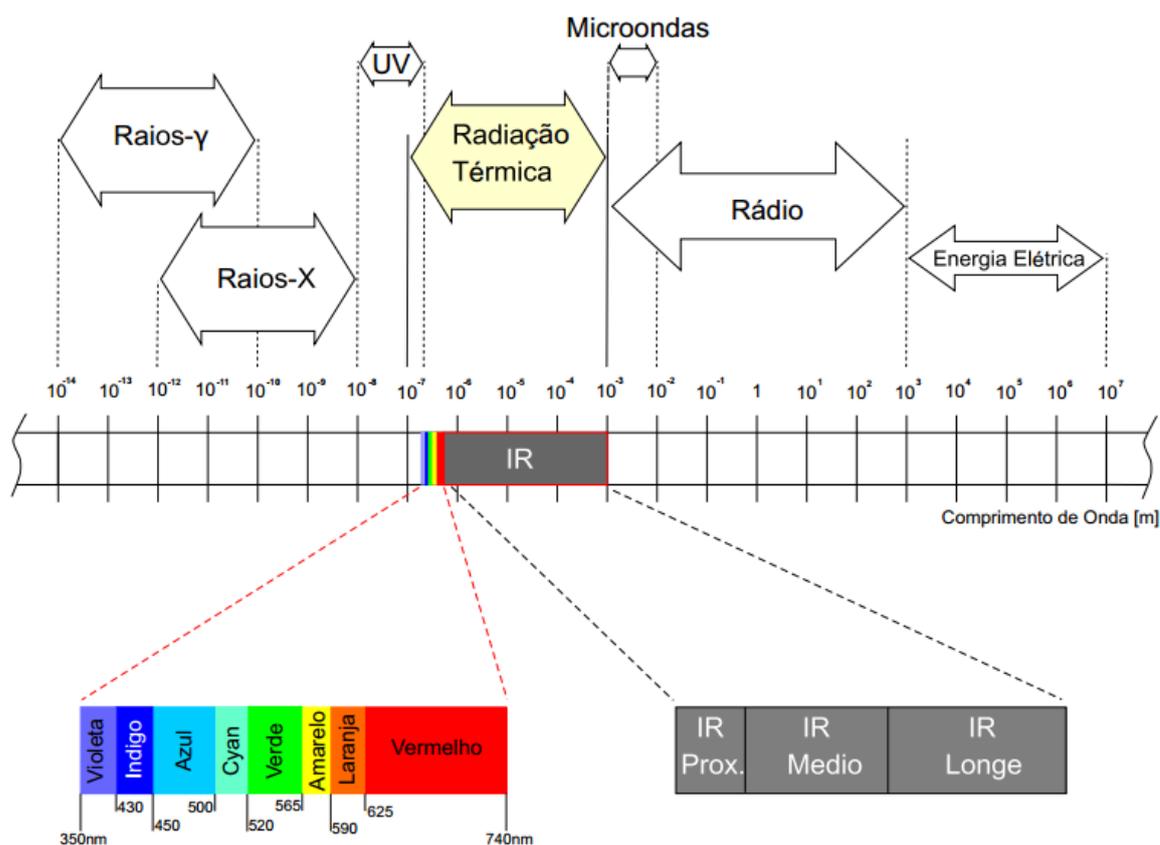


Considerando um material sólido que se encontra no vácuo e está inicialmente a uma temperatura, T_i , mais alta que a de sua vizinhança, T_{viz} , este corpo tende a entrar em equilíbrio térmico com sua vizinhança. Isto nos levará a crer que este resfriamento é associado a uma redução de energia interna armazenada pelo sólido e é consequente da emissão de radiação térmica de sua superfície. (INCROPERA; DEWITT, 1996)

Esta emissão de radiação térmica é consequência da perda de energia do material devido as oscilações ou transições de vários elétrons. Essas oscilações são principalmente causadas pela energia interna e, portanto, pela temperatura do meio. Com isto se consegue relacionar a emissão de radiação térmica com condições termicamente excitadas no interior da matéria.(INCROPERA; DEWITT, 1996)

A radiação térmica engloba uma faixa de valores de comprimento de onda que variam de 10^{-7} a 10^{-3} m, dentro desta faixa compreendendo o infravermelho, o ultravioleta e o visível, vistos na figura 2.(INCROPERA; DEWITT, 1996)

Figura 2 – Espectro de radiação eletromagnética, (RODRÍGUEZ, 2010)



2.2.1 Radiação Infravermelha

Dentro da radiação eletromagnética pode-se encontrar diversos tipos de ondas, sendo que uma delas é a radiação infravermelha (IR). Ela se encontra na faixa de $0,78\mu\text{m}$ até $1000\mu\text{m}$, onde é dividida em 3 partes IR próximo ($0,78\mu\text{m}$ - $1,50\mu\text{m}$), IR médio ($1,5\mu\text{m}$ - $20\mu\text{m}$) e IR distante ($20\mu\text{m}$ - $1000\mu\text{m}$). Esta faixa de onda não é visível ao olho humano que é sensível a banda espectral de $0,4$ - $0,8\mu\text{m}$. Para que haja uma emissão de radiação térmica é necessário que o corpo esteja em uma temperatura diferente de 0 K . (SIEGEL; HOWELL, 2016).

2.3 Radiação do corpo negro

O corpo negro é uma superfície ideal, ou seja, é considerado como o absorvedor e emissor perfeito, suas propriedades podem ser listadas em três tópicos:([INCROPERA; DEWITT, 1996](#))

1. "Um corpo negro absorve toda a radiação incidente, independentemente do comprimento de onda e da direção".
2. "Para uma temperatura e comprimento de onda dados, nenhuma superfície pode emitir mais energia do que um corpo negro".
3. "Embora a radiação emitida por um corpo negro seja uma função do comprimento de onda e da temperatura, ela é independente da direção. Isto é, o corpo negro é um emissor difuso".

Sendo um absorvedor e emissor perfeito, é possível o utilizar como padrão para ser comparado com as propriedades radiativas de superfícies reais. O corpo negro pode ser aproximado por algumas superfícies, mas nenhuma tem precisamente as mesmas propriedades para toda a banda espectral. Se sabe que sua emissão de radiação é difusa, a intensidade espectral de radiação emitida é independente da direção.

2.3.1 Lei de Plank

A lei de Planck descreve uma formulação que representa a distribuição espectral hemisférica do poder emissivo do corpo negro e sua intensidade de radiação no vácuo. Essa expressão, a qual foi verificada experimentalmente, é baseada no comprimento de onda e na temperatura absoluta do corpo negro, mostrada na equação 2.1 : ([SIEGEL; HOWELL, 2016](#))

$$E_{\lambda b} = \pi I_{\lambda b}(T) = \frac{2\pi hc_o^2}{n^2 \lambda^5 [\exp(\frac{hc_o}{nk_b \lambda T}) - 1]} = \frac{2C_1}{n^2 \lambda^5 [\exp(\frac{C_2}{n\lambda T}) - 1]} \quad (2.1)$$

Onde:

1. h = Constante de Plank = $6,62606957 \times 10^{-34}$ J.s
2. λ = Comprimento de onda em m^{-1}
3. T = Temperatura ao qual emite radiação o corpo negro em K.
4. $I_{\lambda,b}$ = Intensidade espectral em $W. m^{-2}. \mu m^{-1}. sr^{-1}$
5. k_b = Constante de Boltzmann = $1,3806488 \times 10^{-23}$ J.K⁻¹

6. c_o = Velocidade da luz no vácuo = $2,99792458 \times 10^8$ m/s
7. n = Índice de refração c_o/c .

Sabendo que o corpo negro é um emissor difuso, define-se o poder emissivo espectral pela equação (2.2):

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \pi I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1]} \quad (2.2)$$

Onde:

1. $C_1 = 2\pi^5 h^2 c^2 / 15 = 3,742 \times 10^8$ W. μ m⁴/m² (SIEGEL; HOWELL, 2016)
2. $C_2 = \frac{hc_o}{k_b} = 1,439 \times 10^4$ μ m.K (SIEGEL; HOWELL, 2016)

A equação (2.1) é conhecida como distribuição de Plank e pode ser representada graficamente como mostrado na figura 3, desta é possível perceber diversas características importantes: (INCROPERA; DEWITT, 1996)

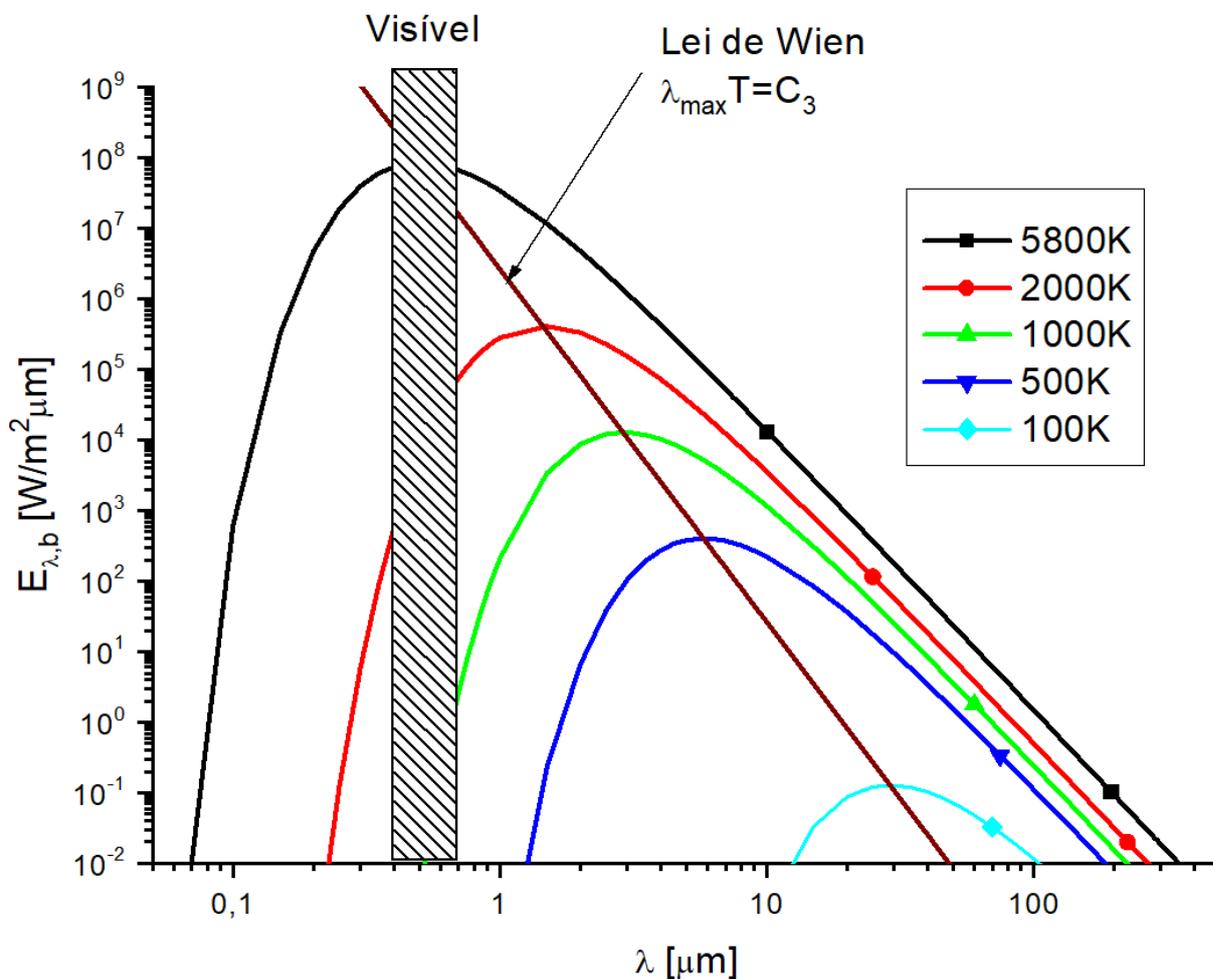
1. A radiação emitida varia continuamente com o comprimento de onda. (INCROPERA; DEWITT, 1996)
2. Independentemente do comprimento de onda, a intensidade da radiação emitida aumenta com a elevação da temperatura.
3. A região espectral onde se concentra a radiação depende da temperatura, com a concentração de radiação aparecendo comparativamente em menores comprimentos de onda.
4. Uma pequena parcela da radiação emitida pelo Sol, que pode ser aproximada a um corpo negro a 5800K, se encontra na parte visível do espectro.

2.3.2 Lei do Deslocamento de Wien

Na figura 3 observa-se que o poder emissivo espectral máximo é deslocado para menores comprimentos de onda com o aumento da temperatura. O comprimento de onda em que o pico ocorre para certa temperatura é dado pela Lei de Wien do deslocamento (2.3). Esta relação foi apresentada por Willy Wien em 1894 usando a termodinâmica clássica, mas pode ser obtida através da diferenciação da Eq.(2.2) em relação a λ , mantendo o T constante e obtendo-se o ponto de inflexão. É possível se visualizar na figura 3 a Eq (2.3). (ÇENGEL, 2002).

$$(\lambda T)_{pot \ máx} = 2897, 7721 \mu m.K \quad (2.3)$$

Figura 3 – Poder espectral emissivo de um corpo negro.



Com a elevação da temperatura, os comprimentos de ondas mais curtos se tornam mais proeminentes, até que por fim a emissão seja suficiente para que ocorra sobre todo o espectro visível, por exemplo: (INCROPERA; DEWITT, 1996)

“Um aquecedor de resistência elétrica começa a irradiar calor logo após ser ligado e podemos sentir a energia de radiação emitida mantendo as nossas mãos contra o aquecedor. Mas essa radiação está inteiramente na região do infravermelho e, portanto, não pode ser detectada pelo nossos olhos. O aquecedor parece avermelhado quando sua temperatura atinge cerca de 1000K, pois ele começa a emitir uma quantidade detectável (cerca de $1\text{W}/(\text{m}^2 \mu\text{m})$) de radiação vermelha visível nessa temperatura. À medida que a temperatura sobe ainda mais, o aquecedor parece vermelho brilhante e é chamado de vermelho quente. Quando a temperatura atinge cerca de 1500K, o aquecedor emite radiação suficiente em toda faixa visível do espectro para aparecer quase branco e é chamado de branco quente.” (ÇENGEL, 2002).

2.3.3 Lei de Stefan Boltzmann

Ao integrar a distribuição de Planck, Eq. (2.2), é possível obter o poder emissivo total de um corpo negro, E_b , como mostra a Eq. (2.4). (ÇENGEL, 2002).

$$E_b = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1]} d\lambda \quad (2.4)$$

Após esta integração obtemos:

$$E_b = \sigma T^4 \quad [W/m^2] \quad (2.5)$$

Sabe-se que a constante de Stefan-Boltzmann, que depende das constantes C_1 e C_2 mostradas na secção 2.3.1, possui o valor de: (SIEGEL; HOWELL, 2016).

$$\sigma = 5,670373 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \quad (2.6)$$

Este resultado é denominado **Lei de Stefan-Boltzmann**, com esta lei é possível determinar o fluxo de radiação total emitido em todas as direções e sobre todos os comprimentos de onda dependendo simplesmente da temperatura do corpo negro.

2.4 Intensidade total do corpo negro e poder de emissão (SIEGEL; HOWELL, 2016)

Para determinar a intensidade total do corpo negro, é necessário incluir a radiação em todos os comprimentos de onda.

A intensidade emitida por comprimento de onda em um intervalo $d\lambda$ é $I_{\lambda b}(T)d\lambda$. Integrando em todos os comprimentos de onda, obtêm-se a intensidade total de um corpo negro, definida pela equação :

$$I_b(T) = \int_0^{\infty} I_{\lambda b}(T) d\lambda \quad (2.7)$$

Isso é avaliado da forma que substituindo a equação 2.1 com $n = 1$ e transformando as variáveis utilizando $\zeta = C_2/\lambda T$ a equação 2.7 obtêm a forma:

$$I_b = \int_0^{\infty} \frac{2C_1}{\lambda^5 (\frac{C_2}{\lambda T} - 1)} d\lambda = \frac{2C_1 T^4}{C_2^4} \int_0^{\infty} \frac{\zeta^3}{e^{\zeta} - 1} d\zeta \quad (2.8)$$

Através de uma tabela de integrais definidas:

$$I_b(T) = \frac{2C_1 T^4}{C_2^4} \frac{\pi^4}{15} = \frac{\sigma}{\pi} T^4 \quad (2.9)$$

onde a constante σ é:

$$\sigma \equiv \frac{2C_1\pi^5}{15C_2^4} = 5,670373 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) \quad (2.10)$$

O poder emissivo total hemisférico de um corpo negro irradiando no vácuo é

$$E_b = \int_0^\infty E_{\lambda b} d\lambda = \int_0^\infty \pi I_{\lambda b} d\lambda = \pi I_b = \sigma T^4 \quad (2.11)$$

A equação 2.11 é a lei de Stefan Boltzmann e σ é a constante de Stefan Boltzmann. Já apresentados na secção 2.3.3.

2.5 Emissão de superfícies reais (SIEGEL; HOWELL, 2016)

A emissividade especifica a radiação de uma superfície real em comparação com a emissão do corpo negro em uma mesma temperatura. Pode ser espectral, normalmente depende da temperatura de superfície e de sua direção. Em cálculos detalhados sobre a troca de calor por radiação, dados para a emissividade direcional e espectral a uma certa temperatura de superfície são necessários. Tais dados para materiais específicos são escassos. Por esse motivo normalmente são utilizados valores médios para a emissividade. As médias podem ser sobre a direção, comprimento de onda ou sobre os dois.

Os valores médios que consideram todos os comprimentos de onda são denominados de quantidades totais, os valores que consideram todas as direções são denominados de quantidades hemisféricas.

2.5.1 Emissividade Direcional Espectral (SIEGEL; HOWELL, 2016)

A intensidade de radiação é a energia emitida por unidade de tempo na direção (θ, ϕ) por unidade de área normal projetada dA_p , por unidade de angulo sólido e pelo intervalo do comprimento de onda. Baseando a intensidade em uma área projetada tem a vantagem que para um corpo negro ela possui o mesmo valor em todas as direções. Diferente do corpo negro a intensidade emitida por um corpo real depende da direção. A energia emitida por uma superfície real dA a uma certa temperatura T e por unidade de tempo no comprimento de onda com intervalo $d\lambda$ e dentro de um angulo sólido $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$ é dado pela equação 2.12:

$$d^2Q_\lambda(\theta, \phi, T)d\lambda = I_\lambda(\theta, \phi, T)dA \cos\theta d\Omega d\lambda \quad (2.12)$$

Para o corpo negro a intensidade $I_{\lambda b}(T)$ é independente da direção. A notação de T é introduzida para demonstrar quando as quantidades são dependentes da temperatura,

com isso a intensidade do corpo negro é definida por $I_{\lambda b}(T)$. É importante explicar que as dependências de T especificam a variação espacial (x, y, z no plano Cartesiano) quando a temperatura de superfície é definida. A energia emitida por uma área negra por unidade de tempo dentro de $d\lambda$ e $d\Omega$ é demonstrada na equação 2.13:

$$d^2Q_{\lambda b}(\theta, \phi, T)d\lambda = I_{\lambda b}(T)dA\cos\theta d\Omega d\lambda \quad (2.13)$$

A emissividade então é definida como uma razão entre a habilidade de emissão de uma superfície real para a do corpo negro, visto na equação 2.14:

$$\text{Emissividade Direcional Espectral} \equiv \varepsilon_{\lambda}(\theta, \phi, T) = \frac{d^2Q_{\lambda}(\theta, \phi, T)d\lambda}{d^2Q_{\lambda b}(\theta, \phi, T)d\lambda} = \frac{I_{\lambda}(\theta, \phi, T)}{I_{\lambda b}(T)} \quad (2.14)$$

2.5.2 Emissividade Total Direcional (SIEGEL; HOWELL, 2016)

A radiação emitida em todos os comprimentos de onda na direção (θ, ϕ) é encontrada integrando a intensidade espectral direcional, obtendo a intensidade total direcional:

$$I(\theta, \phi, T) = \int_{\lambda=0}^{\infty} I_{\lambda}(\theta, \phi, T)d\lambda \quad (2.15)$$

Utilizando a equação 2.9 a intensidade total é mostrada na equação 2.16:

$$I_b(T) = \int_{\lambda=0}^{\infty} I_{\lambda b}(T)d\lambda = \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (2.16)$$

A emissividade total direcional é uma razão entre a superfície real, $I(\theta, \phi, T)$, e o corpo negro, $I_b(T)$, em uma mesma temperatura, mostrado na equação 2.17:

$$\text{Emissividade Total Direcional} \equiv \varepsilon(\theta, \phi, T) = \frac{I(\theta, \phi, T)}{I_b(T)} = \frac{\pi \int_{\lambda=0}^{\infty} I_{\lambda}(\theta, \phi, T)d\lambda}{\sigma T^4} \quad (2.17)$$

O $I_{\lambda}(\theta, \phi, T)$ no numerador pode ser substituído pelo termo $\varepsilon_{\lambda}(\theta, \phi, T)$ utilizando a equação 2.14 para obtermos a equação :

$$\begin{aligned} &\text{Emissividade Total Direcional (Em termos da emissividade espectral direcional)} \\ &\equiv \varepsilon(\theta, \phi, T) = \frac{\pi \int_{\lambda=0}^{\infty} \varepsilon_{\lambda}(\theta, \phi, T)I_{\lambda b}(T)d\lambda}{\sigma T^4} = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} \varepsilon_{\lambda}(\theta, \phi, T)E_{\lambda b}(T)d\lambda}{\sigma T^4} \end{aligned} \quad (2.18)$$

2.5.3 Emissividade Espectral Hemisférica (SIEGEL; HOWELL, 2016)

Voltando na equação 2.14 e considerando a média obtida ao integrar as quantidades espectrais em todas as direções. A radiação espectral emitida por uma unidade de área em todas as direções de um hemisfério é o poder emissivo espectral hemisférico encontrado integrando a energia espectral por unidade de um angulo sólido. Vista na equação 2.19:

$$E_{\lambda}(T) = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_{\lambda}(\theta, \phi, T) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi = \int_{\Omega} I_{\lambda}(\theta, \phi, T) \cos\theta d\Omega \quad (2.19)$$

Utilizando a equação 2.14, obtemos:

$$E_{\lambda}(T) = I_{\lambda b}(T) \int_{\Omega} \varepsilon_{\lambda}(\theta, \phi, T) \cos\theta d\Omega \quad (2.20)$$

Para o corpo negro, o poder emissivo espectral hemisférico é $E_{\lambda b}(T) = \pi I_{\lambda b}(T)$. A razão entre a emissão de uma superfície real e do corpo negro é mostrada na equação 2.21:

Emissividade Espectral Hemisférica (Em termos da emissividade espectral direcional)

$$\equiv \varepsilon_{\lambda}(T) = \frac{E_{\lambda}(T)}{E_{\lambda b}(T)} = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} \varepsilon_{\lambda}(\theta, \phi, T) \cos\theta d\Omega \quad (2.21)$$

2.5.4 Emissividade Total Hemisférica (SIEGEL; HOWELL, 2016)

A emissividade total hemisférica representa a média da emissividade espectral direcional em todos os comprimentos de onda e direções. Para derivar a emissividade total hemisférica, considerando uma unidade de área, o poder emissivo espectral em qualquer direção é derivado da equação 2.14 conforme $\varepsilon_{\lambda}(\theta, \phi, T) I_{\lambda b}(T) \cos\theta$. Para obter o poder emissivo total hemisférico é então integrado em todos os λ e em todas as direções. Dividido por σT^4 , o poder emissivo hemisférico do corpo negro, obtemos a emissividade mostrada na equação 2.22:

Emissividade Total Hemisférica (Em termos da emissividade espectral direcional)

$$\equiv \varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{\int_{\Omega} \int_{\lambda=0}^{\infty} [\varepsilon_{\lambda}(\theta, \phi, T) I_{\lambda b}(T) d\lambda] \cos\theta d\Omega}{\sigma T^4} \quad (2.22)$$

Utilizando a equação 2.18, pode-se exibir de uma segunda forma:

Emissividade Total Hemisférica (Em termos da emissividade total direcional)

$$\equiv \varepsilon(T) = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} \varepsilon(\theta, \phi, T) \cos\theta d\Omega \quad (2.23)$$

Se a ordem das integrações na equação 2.22 é alterada e a equação 2.23 é utilizada, então obtemos uma terceira forma, mostrada na equação 2.24:

Emissividade Total Hemisférica (Em termos da emissividade espectral hemisférica)

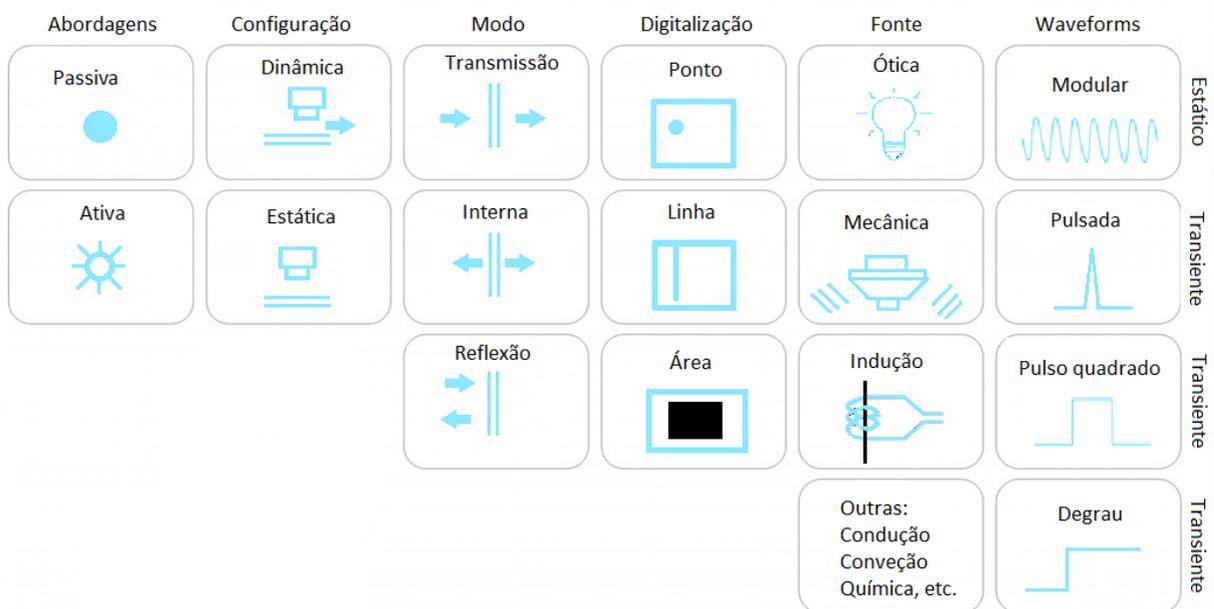
$$\equiv \varepsilon(T) = \frac{\pi \int_{\lambda=0}^{\infty} \varepsilon_{\lambda}(T) I_{\lambda b}(T) d\lambda}{\sigma T^4} = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} \varepsilon_{\lambda}(T) E_{\lambda b}(T) d\lambda}{\sigma T^4} \quad (2.24)$$

2.6 Ensaios não destrutivos através da termografia infravermelha

A termografia infravermelha (TIR) analisa os padrões de temperatura de uma superfície através da captação de radiação infravermelha que a mesma emite. Este padrão térmico se verá com alterações no fluxo de calor quando há anomalias ou defeitos internos, o que ocasiona contrastes no campo de temperatura na superfície em questão. Esta seção é baseada principalmente em (RODRÍGUEZ, 2010).

2.6.1 Cenários para ensaios com termografia infravermelha

Figura 4 – Possíveis métodos de um ensaio por TIR.



Para se realizar os testes END através da TIR é necessário entender que existem vários cenários possíveis, como mostrados na figura 4. Para conhecer todas essas possíveis abordagens, primeiramente se faz necessário conhecer algumas questões antes de se realizar os ensaios: (IBARRA-CASTANEDO; TARPANI; MALDAGUE, 2013).

1. É necessário uma fonte de calor externa?(Abordagens 2.6.1.1)
2. A câmera ou o objeto estão em movimento?(Configurações 2.6.1.2)
3. O modo como a energia é transferida/gerada no objeto?(Modo 2.6.1.3)
4. Como a energia é transferida para a superfície?(Exploração 2.6.1.4)
5. Qual o tipo de energia está sendo usada?(Fontes 2.6.1.5)
6. Qual a forma de excitação?(Tipos de onda 2.6.1.6)

2.6.1.1 Abordagens

A **TIR Passiva** se baseia em analisar um corpo sem uma estimulação externa de temperatura, observando-o em condições normais, contanto que o mesmo esteja em uma temperatura diferente do meio. Este método tem como objetivo procurar irregularidades no histórico de temperatura através de pontos quentes ou frios (*hot spots* ou *cold spots*), quando é possível observar uma diferença de temperatura de aproximadamente 1-2 K normalmente indica que existe algum problema, quando essa diferença passa de 4 K certamente haverá algum problema. Geralmente é utilizado para o monitoramento de componentes elétricos ou para problemas em isolamento térmicos em prédios.(MALDAGUE, 2001).

Essa técnica é usada extensivamente em manutenção preventiva. Mesmo os produtos que são produzidos de forma correta, irão degradar com o passar do tempo. É possível determinar a idade, qualidade e condições ambientais utilizando a TIR passiva. Um caso muito comum onde se é utilizado essa técnica é para procurar perda térmica em prédios, capturando imagens térmicas e determinando com precisão onde pode haver algum problema.(KALTMANN, 2008).

Existem algumas vantagens para a utilização dessa técnica como:

1. Detecção precoce de problemas, resultando em custos de reparo reduzidos.
2. Mínima intervenção na preparação da superfície em estudo.
3. Redução do desgaste desnecessário dos equipamentos utilizados.
4. Nenhuma interação física com o objeto estudado.
5. Análise em tempo real de algum processo de produção.
6. Capacidade de analisar grandes superfícies, procurando diferenças nos padrões térmicos na imagem termográfica.

Existem algumas limitações para o uso da TIR passiva, tais como:

1. Mudanças nas condições do ambiente.
2. Necessidade do surgimento natural de contrastes térmicos.
3. A imagem térmica dever ser feita sobre condições constantes.
4. Mudanças climáticas podem afetar o ensaio como, ventos fortes e chuva.

Esses exemplos mostram como os resultados de uma TIR passiva podem variar de acordo com as condições em que o ensaio é realizado, alterando os resultados obtidos.

A **TIR Ativa**, tema principal deste trabalho, necessita de uma fonte de calor externa para que se possa aplicar um gradiente de temperatura nas áreas com e sem defeito do material estudado. Como essa indução de calor é controlada é possível que seja feita uma análise qualitativa e quantitativa. Esta técnica revela os defeitos através de padrões de temperatura na superfície dependentes do tempo, após sua exposição a fonte de calor. Inicialmente a detecção de defeitos era inteiramente baseada na capacidade visual do operador para encontrar as anormalidades nos padrões de temperatura.

Com o passar dos anos e com os avanços tecnológicos tanto nas câmeras IR quanto na capacidade de processamento dos computadores, facilitou para o desenvolvimento de novas técnicas, mais rápidas e precisas conforme mostradas na figura 5. (IBARRA-CASTANEDO, 2005).

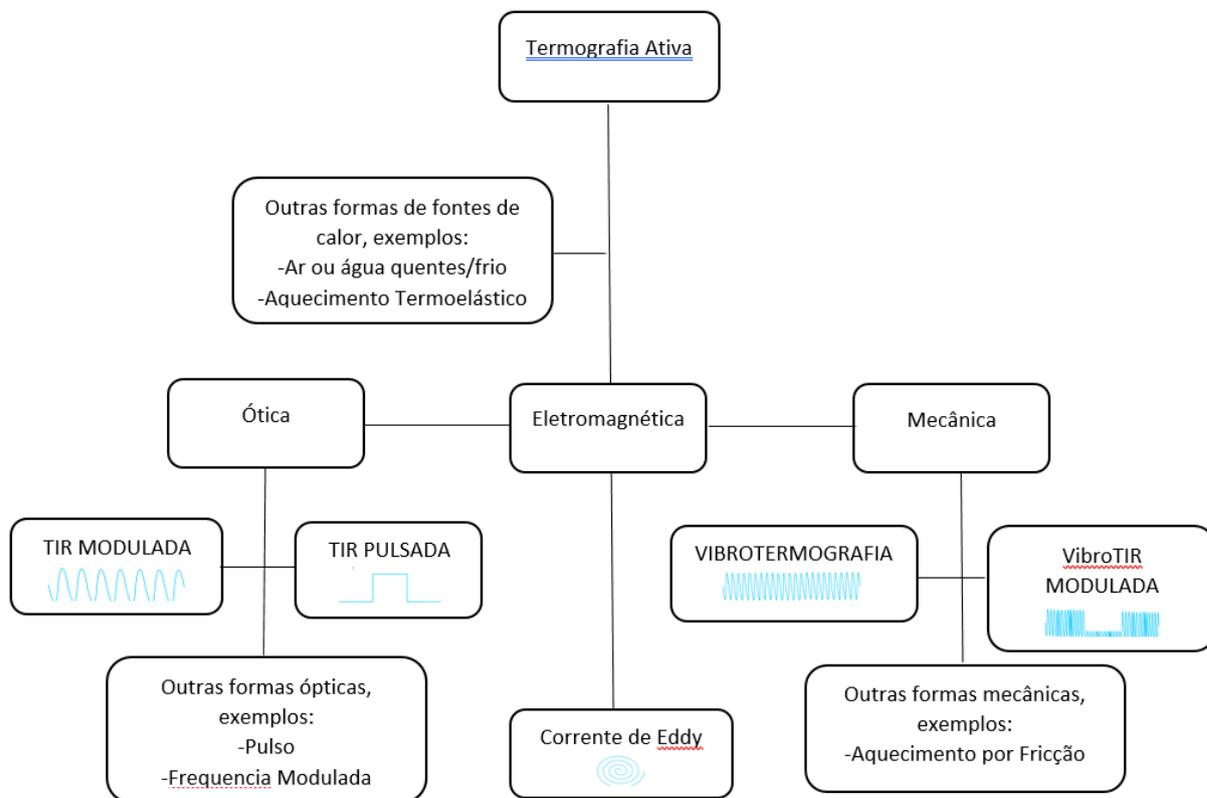
Como a TIR ativa é um método END é possível realizar os ensaios de maneira que não ocorra dano físico ao material estudado. Ao contrário das outras técnicas a TIR ativa permite que se realize uma inspeção e acesso ao material sem necessitar que o sistema seja desligado e pode ser utilizada para se examinar estruturas de grande porte como asas e fuselagem de aviões em alguns segundos. (KALTMANN, 2008).

Existem alguns problemas quando se utiliza a TIR ativa, pois se faz necessário aquecer uma peça de tamanho considerável de forma uniforme e se isso não acontece, o resultado desse ensaio fica inconclusivo. A localização do defeito também gera uma preocupação, pois a resposta fica mais sensível quanto mais perto da superfície o defeito se apresenta, faz com que dificulte a localização caso o mesmo esteja em uma profundidade considerável. Outro fator a ser levado em consideração é a emissividade do material, normalmente a mesma precisa possuir um valor acima de 0,20 para se possibilitar a análise. (KALTMANN, 2008).

2.6.1.2 Configurações

Existem dois tipos de configurações que podem ser adotadas em um teste por TIR, definidos por Castanedo como estática e dinâmica, mostrados na figura 4, e aqui designados por: (IBARRA-CASTANEDO; TARPANI; MALDAGUE, 2013).

Figura 5 – Métodos de TIR ativa.



1. **Estática:** Onde permanece imóveis os três principais elementos, a câmera, a fonte e o objeto.
2. **Dinâmica:** Onde pelo menos um dos três principais elementos está em movimento.

Existem algumas diferenças na maneira em como os dados são processados e armazenados dependendo da escolha de configuração. A maioria das técnicas que são comentadas nesse trabalho utilizam a configuração estática, através desse modo é possível ter acesso a todas as informações ponto a ponto do objeto em função do tempo. (IBARRA-CASTANEDO; TARPANI; MALDAGUE, 2013).

Para alguns ensaios a configuração dinâmica é mais recomendada para uso, pois objetos com uma geometria complexa, com tamanhos consideráveis e até mesmo redondos dificultam a utilização de um método estática. Nesses casos utilizando a inspeção dinâmica é possível fazer uma análise por inteiro do material. Existem alguns casos em que o objeto em estudo está em movimento, não deixando escolha a não ser utilizar uma inspeção dinâmica, como por exemplo o reconhecimento e busca por uma pessoa andando em uma via pública ou objetos em uma linha de produção. Algumas vezes é possível utilizar as

técnicas estáticas na inspeção dinâmica, para isso é necessário organizar os dados formando seqüências pseudo-estáticas.([IBARRA-CASTANEDO; TARPANI; MALDAGUE, 2013](#)).

2.6.1.3 Modos

Existem três fontes de energia diferentes para analisar o objeto em estudo, como visto na figura 4. Os três modos de acordo com ([IBARRA-CASTANEDO; TARPANI; MALDAGUE, 2013](#)) são :

1. **Reflexão:** A energia é entregue ao material do mesmo lado em que a câmera está atuando, filmando a energia refletida pelo material.
2. **Transmissão:** A energia é entregue ao material do lado oposto em que a câmera está atuando, filmando então a energia que foi transmitida através do material para a superfície sendo filmada.
3. **Interna:** A energia é gerada dentro do material, enquanto a câmera atua de qualquer lado do objeto.

Os modos de reflexão e transmissão utilizam as fontes de calor visto na seção 2.6.1.5. Para a detecção de defeitos mais próximos da superfície o modo de reflexão geralmente é utilizado, quando se é necessário descobrir a presença de defeitos nas partes mais posteriores do material usa-se o modo transmissão.([IBARRA-CASTANEDO; TARPANI; MALDAGUE, 2013](#)).

Para o modo interno geralmente é utilizado o ultrassom e as correntes de Eddy, a quais normalmente geram calor internamente. Dessa maneira o calor é gerado no centro do objeto, propagando pelo meio e levando as informações importantes sobre a condição interna do material para a superfície do objeto. ([IBARRA-CASTANEDO; TARPANI; MALDAGUE, 2013](#)).

2.6.1.4 Exploração

Na figura 4 é possível visualizar que existem três tipo de modos para realizar uma exploração no material desejado, os quais são:

1. **Ponto:** É realizado uma exploração em um ponto específico o qual é aquecido através de um laser, é possível analisar todos os pontos do material, mas este ensaio deve ser feito um ponto por vez. Normalmente é utilizado junto com a configuração dinâmica.
2. **Linha:** Uma faixa horizontal ou vertical é aquecida no material através de uma linha de lâmpadas movidas por um braço robótico. É possível analisar o material

por completo, mas isto deve ser feito uma linha por vez. Normalmente é utilizado junto com a configuração dinâmica.

3. **Área:** Uma área no material é aquecida onde a inspeção será realizada. Para se realizar um ensaio que todo o material seja estudado, este modo de exploração é o mais recomendado, pois a área estudada pode ser toda a superfície do material. Normalmente é utilizado junto com a configuração estática.

2.6.1.5 Fontes

Na inspeção por TIR as fontes de calor assumem um papel importante, essa energia transportada para o material em estudo pode ser feita de diversas maneiras, através de ondas de calor, fluidos quentes ou frios, por indução, entre outros. Na figura 4, é possível ver algumas dessas formas, as mais utilizadas em um ensaio por TIR, que são categorizadas da seguinte forma:

1. **Óptica:** A energia é transferida para o objeto em forma de radiação, a qual se transforma em calor na superfície do objeto. Normalmente é utilizado lâmpadas de halogênio, lâmpadas térmicas, entre outros. (IBARRA-CASTANEDO et al., 2009).
2. **Mecânica:** A energia é transferida em forma de oscilações mecânicas e se espalham por todas as direções dentro da amostra, quando essas oscilações encontram descontinuidades essa energia é dissipada em forma de calor, o qual viaja até a superfície do material. Como por exemplo ondas de som ou ultrassom. (IBARRA-CASTANEDO et al., 2009).
3. **Indução:** A energia é transferida através de uma indução magnética, em um material eletrocondutor gerando um perfil de temperatura. A técnica mais utilizada de indução em um ensaio TIR é a corrente de Eddy. (ZENZINGER et al., 2007)
4. **Outros:** Além desses três meios mais utilizados, ainda existem outros. Tais como, cobertores de calor (por condução), armas de calor (convecção), entre outros. (IBARRA-CASTANEDO; TARPANI; MALDAGUE, 2013).

Conforme a seção 2.6.1.1, nota-se que a termografia passiva não necessita de uma forma de calor externa (artificial) para que se realize a inspeção. Mas em alguns casos é possível identificar algumas fontes de calor e ainda utiliza-las para se realizar a inspeção. Como é o caso quando se necessita realizar uma inspeção em um prédio, o que faz do Sol uma fonte de calor natural a ser levada em consideração, o inspetor precisa esperar pelo momento certo do dia, normalmente ao entardecer, onde a temperatura do edifício esteja em seu valor máximo. Neste exemplo a inspeção foi realizada de forma passiva, sem a utilização de uma fonte de calor artificial.

2.6.1.6 Formas de Modulação da Onda

As fontes de calor transportam energia para o material observado, mas elas o fazem utilizando diferentes tipos de onda, que podem ser vistas na figura 4:

1. **Modular:** Ondas modulares em uma certa frequência.(IBARRA-CASTANEDO; TARPANI; MALDAGUE, 2013).
2. **Pulsada:** Um pequeno pulso de normalmente alguns milissegundos (IBARRA-CASTANEDO; TARPANI; MALDAGUE, 2013).
3. **Pulso Quadrado:** Um pulso longo de normalmente alguns minutos.(IBARRA-CASTANEDO; TARPANI; MALDAGUE, 2013).
4. **Degrau:** Aquecimento contínuo que pode variar de poucos segundos a vários minutos.(IBARRA-CASTANEDO; TARPANI; MALDAGUE, 2013).

Esses tipos de onda afetam diretamente em como será gravado e processado os dados dos ensaios. Na termografia utilizando aquecimento por degrau os dados de interesse estão na curva de aquecimento, então se faz por necessário fazer a gravação e o processamento de dados durante o estímulo térmico. Na termografia pulsada é imprescindível fazer esse procedimento durante o resfriamento do material, pois só é de interesse os dados referentes a curva de decaimento da temperatura. Na termografia por pulso quadrado é fundamental realizar esse procedimento durante todo o ensaio, pois os dados de interesse estão na curva de aquecimento e decaimento da temperatura.

2.6.2 Técnicas de termografia infravermelhas ativa

Com o passar dos anos e com os avanços tecnológicos, tanto nas câmeras IR quanto na capacidade de processamento dos computadores, foram desenvolvidas novas técnicas de ensaio TIR, mais rápidas e precisas, conforme a figura 5. As classificações das técnicas podem variar de acordo com o tipo de onda ou da fonte que estão sendo empregados.(IBARRA-CASTANEDO, 2005)

As técnicas categorizadas de acordo com o tipo de onda:

1. **Termografia Pulsada (TP)** : é um dos métodos mais rápidos e precisos de inspeção END, porém está sujeito a diversas fontes de erro, tais como reflexões do ambiente, variações na emissividade, aquecimento não uniforme do material e deformações geométricas na superfície. A técnica consiste em aplicar pulsos de calor normalmente variando entre 5 a 15 ms dependendo das propriedades físicas do material e do efeito estudado, também é possível a utilização de pulsos frios, como neve, pulso de ar, entre outros. Quando estes pulsos forem emitidos na mesma face em que a câmera IR

estará coletando os dados será chamado de reflexão, caso as ondas estejam na posição contrária da câmera este modo é chamado de transmissão. A análise dessa inspeção é feita através da curva de decaimento da temperatura.([IBARRA-CASTANEDO, 2005](#))

2. **Aquecimento de Pulso Longo (SPT)**: O aumento da temperatura de superfície é monitorado durante a aplicação de um longo pulso de aquecimento, muito semelhante a TP, mas com a diferença que é necessário o monitoramento tanto no aquecimento quanto no resfriamento. ([RODRÍGUEZ, 2010](#))
3. **Termografia Modulada (LT)**: Técnica derivada da radiometria fototérmica, em que uma pequena área da superfície é irradiada por um laser modular injetando ondas térmicas no material em estudo. A resposta térmica é armazenada usando uma câmera IR e decomposta através de um amplificador *lock-in* para poder extrair a amplitude e fase da modulação. Essa técnica possui um aproveitamento melhor em condições de não uniformidade de aquecimento no material, uma das principais desvantagens na termografia pulsada.([RODRÍGUEZ, 2010](#))
4. **Termografia por degrau, *Step heating thermography*, (SHT)**: Um objeto é aquecido durante segundos ou até minutos, muito similar a SPT, com a diferença que somente é necessário ser monitorado o aquecimento do material.

As técnicas categorizadas de acordo com o tipo de fonte:

1. **Termografia óptica (TO)**: Dividida em duas categorias clássicas, a TP óptica que normalmente utiliza um *flash* de fotografia e LT óptico que utiliza lâmpadas de halogênio.
2. **Vibrotermografia (VT)**: Essa técnica consiste em emitir ondas acústicas de alta frequência na peça em estudo, gerando vibração e fricção nas áreas com defeito, ocasionando um efeito térmico visto na superfície através da câmera IR.([RODRÍGUEZ, 2010](#)).
3. **Termografia por indução (IT)**: Essa técnica END consiste na detecção de rachaduras através de uma indução magnética, corrente de Eddy, em um material eletrocondutor gerando um perfil de temperatura. As rachaduras fazem com que o campo magnético na superfície do material sejam alterados, por consequência sua temperatura também será afetada. Com uma câmera IR é possível identificar essas mudanças, localizando os defeitos internos.([ZENZINGER et al., 2007](#)).

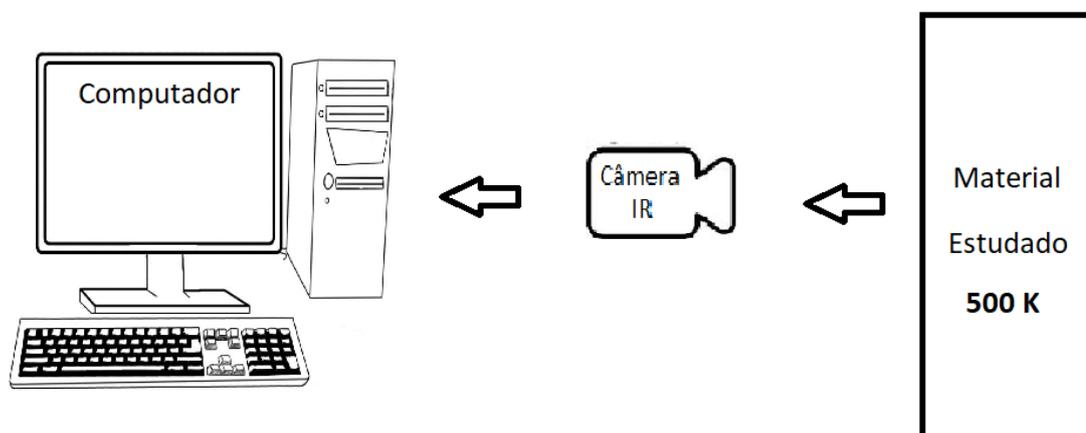
Quanto a nomenclatura das técnicas é exigido que se utilize o termo fonte e o tipo de onda, como Termografia pulsada ótica ou Aquecimento de pulso longo por ultrassom,

mas é notado que raramente é utilizada. A nomenclatura é feita dessa forma para que se evite confusão com o tipo de técnica que esta sendo empregada. Essas técnicas foram desenvolvidas para serem utilizadas com a TIR ativa, mas existem exceções tendo em vista que algumas delas conseguem ser utilizadas com a TIR passiva.

2.6.3 Técnica Utilizada

Como dito na seção 2.6.1, os ensaios por TIR ativa podem ser divididos em várias categorias, este trabalho irá se basear principalmente na Termografia Pulsada (TP), utilizando o mesmo método de análise da curva de resfriamento. Para se realizar o ensaio é necessário os seguintes itens, mostrados na figura 6: (IBARRA-CASTANEDO, 2005).

Figura 6 – Ensaio através da TIR Ativa.

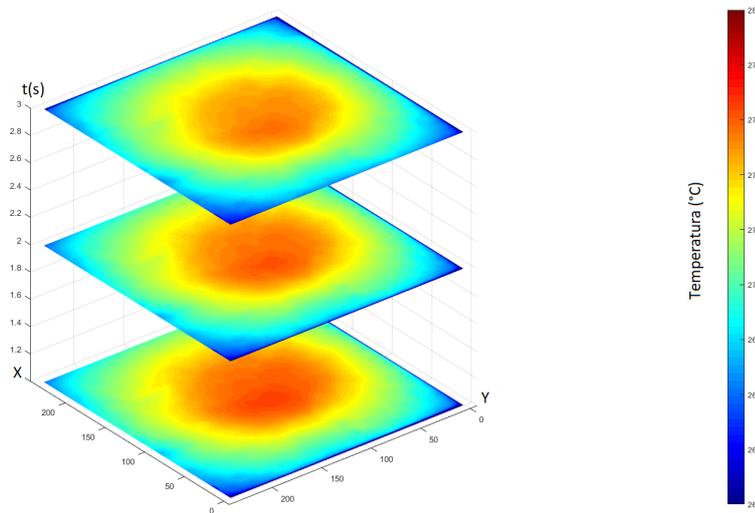


1. Uma fonte de calor, citada na seção 2.6.1.5, para elevar a temperatura inicial do material até o valor desejado, dessa forma a curva de resfriamento pode ser capturada pela câmera de infravermelho.
2. O material a ser estudado.
3. Uma câmera de infravermelho
4. Um computador para a aquisição e processamento de dados.

Os defeitos irão aparecer com gradientes de temperaturas diferentes em relação as áreas que não os apresentam. Então é utilizada a câmera de infravermelho para registrar

os dados em regime transiente, gravando um mapa térmico da superfície em intervalos de tempo pré-definidos. Com estes dados é possível gerar uma matriz 3D, sendo que as coordenadas x e y representam a área de superfície do material e a coordenada z representa a evolução do tempo, como mostra a figura 7. (IBARRA-CASTANEDO, 2005).

Figura 7 – Matriz de temperatura 3D. Termogramas por tempo.



Os termogramas apresentados na figura 7, podem ser analisados através de qualquer método apresentado na seção 2.6.2.

2.6.3.1 Sequência completa de termogramas

Durante um ensaio por TIR ativo é necessário realizar a gravação da curva de temperatura, que é realizada através da captura de diversas imagens em sequência. Este processo é denominado de sequência de termogramas.

Uma sequência completa é composta por 5 elementos distintos, mostrada na figura 8. Os mesmos estão dispostos a seguir:

1. **Imagem fria:** Obtida no tempo t_0 , não apresenta nenhuma utilidade para a análise térmica, mas sim para se eliminar reflexos indesejados devido a variação da emissividade (IBARRA-CASTANEDO, 2005).
2. **Termogramas Saturados:** Depois da obtenção da imagem fria o objeto é exposto a uma aplicação de um pulso de calor. Após este aquecimento o objeto entrará em uma temperatura de equilíbrio térmico T_{equi} . Como não oferece informações valiosas ao estudo estes termogramas podem ser descartados com segurança do ensaio.(RODRÍGUEZ, 2010).

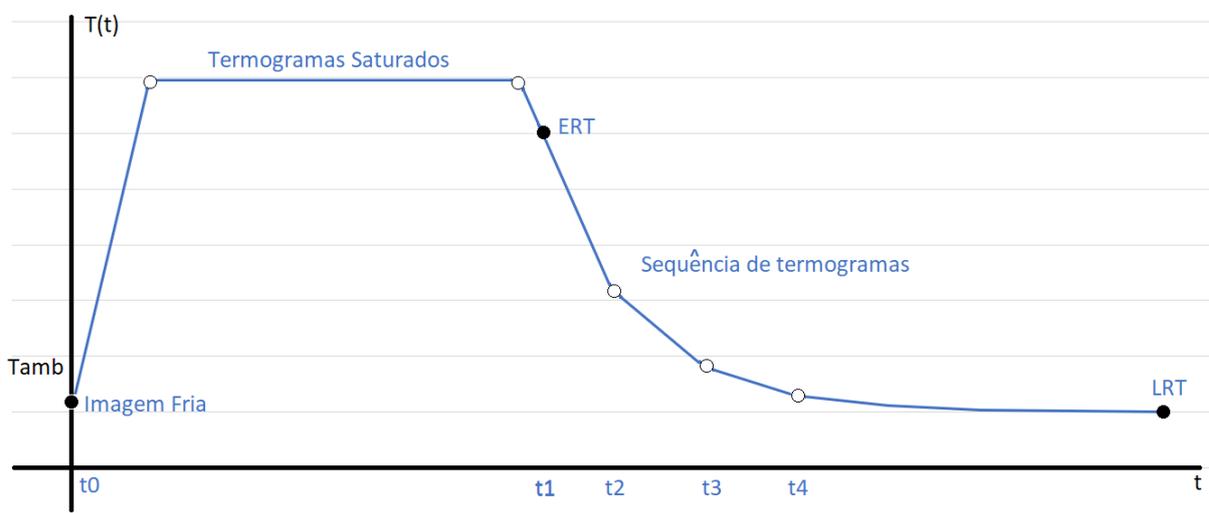
3. **ERT** (*Early Recorded Thermogram*): Depois da saturação a primeira imagem a fazer parte do estudo é a ERT capturada no instante t_1 . Idealmente os defeitos ainda não estão visíveis, podem haver exceções de acordo com as propriedades termofísicas do material.
4. **Sequência de termogramas**: Todos os termogramas subsequentes ao ERT são de interesse, formando a sequência de termogramas.
5. **LRT** (*Last Recorded Thermogram*): Este é o último termograma de interesse para o ensaio, pois a partir deste ponto as variações de temperaturas passam a ser mínimas.

O tempo necessário para se obter a sequência completa de termogramas é em função da profundidade do defeito (z) e da difusividade térmica do material (α) como mostrado na equação 2.25. (RODRÍGUEZ, 2010).

$$t \approx \frac{z^2}{\alpha} \quad (2.25)$$

Quando maior for a profundidade do defeito, maior será o tempo necessário para sua identificação. Por outro lado quanto maior for a difusividade térmica do material menor o tempo necessário para a identificação.

Figura 8 – Sequência completa de termogramas



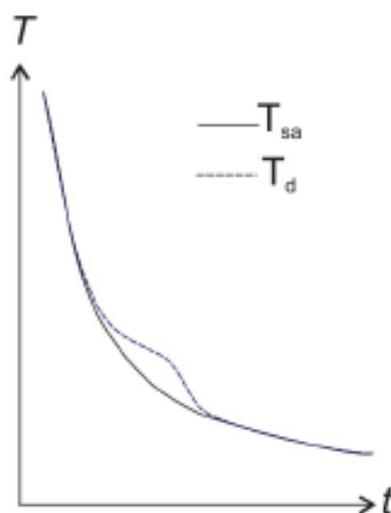
2.6.3.2 Detecção de defeitos

Após ter obtido a sequência completa de termogramas já é possível fazer uma análise baseada através de modelos físicos que permitem uma identificação quantitativa dos parâmetros em estudo. No ensaio por TIR o próximo passo após a obtenção da sequência

de termogramas é a detecção de defeitos, a qual pode ser feita de várias maneiras. Nesta secção será discutida as formas mais utilizadas. (BALAGEAS, 2007).

A curva de evolução de temperatura é usada da seguinte forma, após a aplicação de calor no objeto em estudo é possível se distinguir uma área sã de uma área defeituosa através da curva de decaimento de temperatura como mostrado na figura 9, a curva de defeito pode estar localizada acima ou abaixo da curva sem defeitos, dependendo da profundidade e propriedades termofísicas do defeito.

Figura 9 – Curva de decaimento da temperatura, (RODRÍGUEZ, 2010)



Os perfis de temperatura, vistos na figura 10, podem ser utilizados para fazer uma análise unidimensional, as regiões que apresentam defeitos internos manifestam perfis de temperatura anormais de um pixel em relação ao seu vizinho. Ao contrário da curva de evolução a qual estuda o comportamento transiente de um pixel em coordenadas $T(i,j)$. Entretanto esta análise apresenta dificuldades em sua realização tal como a não uniformidade no aquecimento, gerando falsos padrões térmicos que se assemelham ao de um defeito.(RODRÍGUEZ, 2010).

Um dos parâmetros mais atrativos na análise termografia infravermelha é o contraste térmico, o qual se baseia em fazer uma análise quantitativa dos defeitos através do contraste de temperatura entre uma zona sem defeito e outra com. Como mostra a figura 11. Este método terá uma secção dedicada para ele 2.6.3.3. (RODRÍGUEZ, 2010).

2.6.3.3 Contraste térmico

O método de análise em um ensaio TIR mais comum é o contraste térmico. O qual oferece uma informação quantitativa (localizando sua posição) e qualitativa (determinando suas características físicas) do defeito. Após o material ter sido exposto a uma fonte de calor, a frente térmica se propaga no interior do material a uma certa velocidade,

Figura 10 – Perfis de temperatura, (RODRÍGUEZ, 2010)

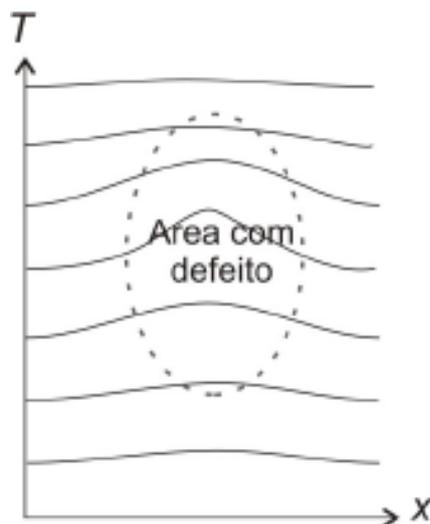
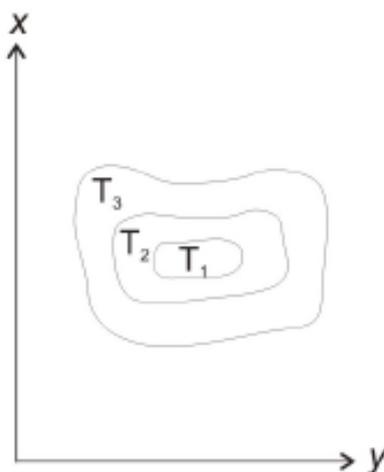


Figura 11 – Contraste térmico, (RODRÍGUEZ, 2010)



quando o material tem a presença de algum defeito interno a taxa de difusão do calor se altera ocasionando uma leve alteração na sua temperatura de superfície no processo de resfriamento. De acordo com este processo as áreas onde possuem defeitos aparecerão com temperaturas diferentes ao de seus vizinhos. Os defeitos que apresentarem uma profundidade mais elevada serão observados em um tempo maior e com um contraste reduzido (RODRÍGUEZ, 2010). A perda de contraste térmico c é proporcional ao cubo da profundidade z . Como mostrado na equação 2.26. (ALLPORT; MCHUGH, 1988).

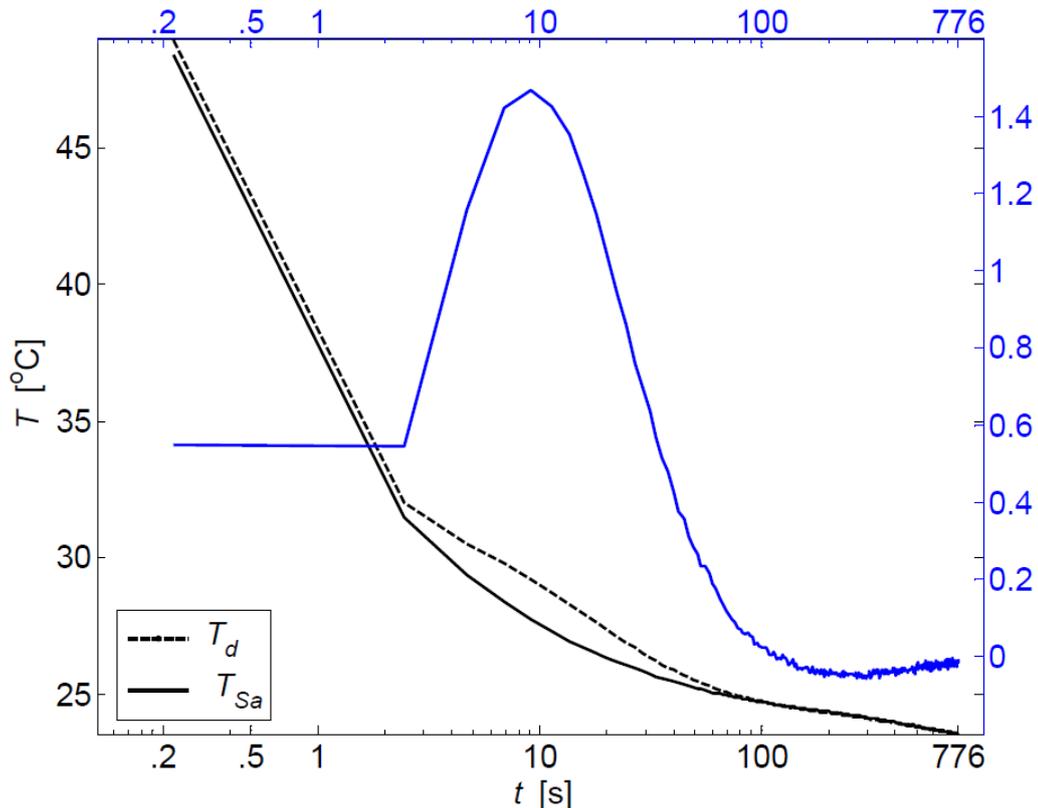
$$c \approx \frac{1}{z^3} \quad (2.26)$$

Podemos explicar o contraste térmico através do Contraste Térmico Absoluto (*Absolute Thermal Contrast*), o qual consiste em medir a diferença de temperatura entre uma parte sã T_{Sa} do material com uma parte defeituosa T_d , como mostrado na equação

2.27.(IBARRA-CASTANEDO, 2005).

$$\Delta T = T_d - T_{Sa} \quad (2.27)$$

Figura 12 – Contraste térmico máximo, (IBARRA-CASTANEDO, 2005)



Na figura 12, é possível ver o perfil do contraste térmico absoluto (em azul), calculado através da equação 2.26. Esse simples perfil térmico é o ponto inicial para uma análise mais elaborada, por exemplo é possível construir termogramas onde o contraste térmico seja o máximo (*Maximum Contrast*) localizando o tempo onde o maior valor é encontrado no perfil descrito. Através desse método é possível identificar o termograma no tempo que possui o maior número de informações úteis para o ensaio.

A curva de temperatura para os dois casos, com e sem defeito, nos primeiros instantes tem um comportamento similar, pois a propagação de calor contendo as informações do defeito ainda não atingiram a superfície. Como a difusividade térmica do defeito, habilidade do material em trocar calor com sua vizinhança, é diferente do resto do material, ocasionará um gradiente de temperatura quando a onda de calor contendo suas informações atinjam a superfície, como mostrado na figura 12.

2.7 Aplicações da Otimização

O termo otimização matemática é atribuído ao ramo da ciência computacional que procura responder a seguinte pergunta, "Qual o melhor?" para problemas que a qualidade da sua resposta possa ser definida através de um valor numérico. (PIRSIG, 1974).

Os autores Kravanja e Cucek, utilizaram a otimização para melhorar o índice relativo de sustentabilidade direta e no conceito de custo ecológico e lucro líquido. Com a resolução de maximização do lucro total é possível estabelecer um *trade-off* adequado entre critérios econômicos e ambientais.(KIRALY et al., 2013).

O autor Souza 2010, aperfeiçoa o coletor de admissão em uma certa rotação através da otimização. O mesmo conseguiu uma melhora na eficiência volumétrica a 3500 rpm de 6 %, o que permitiu o motor a apresentar um ganho de potencia indicada de 4,93 hp ekm relação a um utilizando o coletor quadriball por ele mesmo desenvolvido.(SOUZA, 2010).

Kannan utilizou o algoritmo genético NSGA-II para otimizar o problema de planejamento de expansão de geração. Onde era necessário minimizar o custo do investimento e o custo de interrupção, ou maximizar a confiabilidade.(SUBRAMANIAN et al., 2009).

O modelo de otimização denominado MUST, desenvolvido pelos autores Yang e Chou, tem a intenção de auxiliar na atribuição de mão-de-obra em empresas de consultoria de engenharia. Esse algoritmo tem como principais funções maximizar o lucro, evitar o excesso de horas extras, eliminar a ociosidade e dar preferencia aos projetos com propriedades específicas. Dessa forma o modelo auxilia para a escolha de um plano de ação adequado. (YANG; CHOU, 2011).

Em 2012 os autores Shadiya, Satish e High utilizaram a otimização para a redução de resíduos em uma organização. O objetivo principal foi a da minimização dos resíduos simultaneamente com a maximização do lucro. Depois da implementação da ferramenta os autores notaram uma melhoria expressante nos impactos ambientais. (Kafi Mallak et al., 2016).

Em 2006 a otimização foi utilizada para modelar dieta alimentar, onde o objetivo era minimizar o custo financeiro, maximizando a preferência alimentar. Atendendo aos requisitos mínimos necessários ao ser humano.(KALDIRIM, 2006).

3 Modelo

Será proposto um modelo matemático que reúna todas as informações importantes relacionadas as propriedades físicas que representam o material em questão. Este modelo deve levar em consideração tanto as alterações no ambiente. Após este modelo ter sido desenvolvido, será analisado numericamente em relação a um ensaio real, para que seja possível valida-lo. Para a detecção de defeitos será utilizado este modelo desenvolvido em conjunto com o método de otimização evolucional.

3.1 Formulação Numérica

Para se analisar os aspectos quantitativos de um ensaio TIR Ativo, é indispensável a formulação de um modelo matemático que descreva a fenomenologia física envolvida. Neste trabalho foi utilizado o Método de Volumes Finitos (MVF) com a finalidade de desenvolver um código em Fortran 90 capaz de gerar e resolver numericamente as equações diferenciais para qualquer número de volumes no tempo especificado. Este método consiste em subdividir o bloco em diversos volumes de mesmo tamanho criando uma malha de equações e as resolvendo para achar os valores de temperatura respectivos para o centro de cada volume. (MALISKA, 1995)

3.1.1 Formulação para volume interno genérico

Para obtermos o resultado numérico para um ensaio com TIR ativa na configuração proposta, é necessário realizar a solução 3-D no plano cartesiano da equação geral da condução em regime transiente, mostrada na equação 3.1.

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

Primeiramente antes de realizarmos a integração da equação 3.1, é preciso definir a função de interpolação no tempo, as quais podem ser vistas na figura 3.1.1, são representadas pela equação 3.2.(MALISKA, 1995).

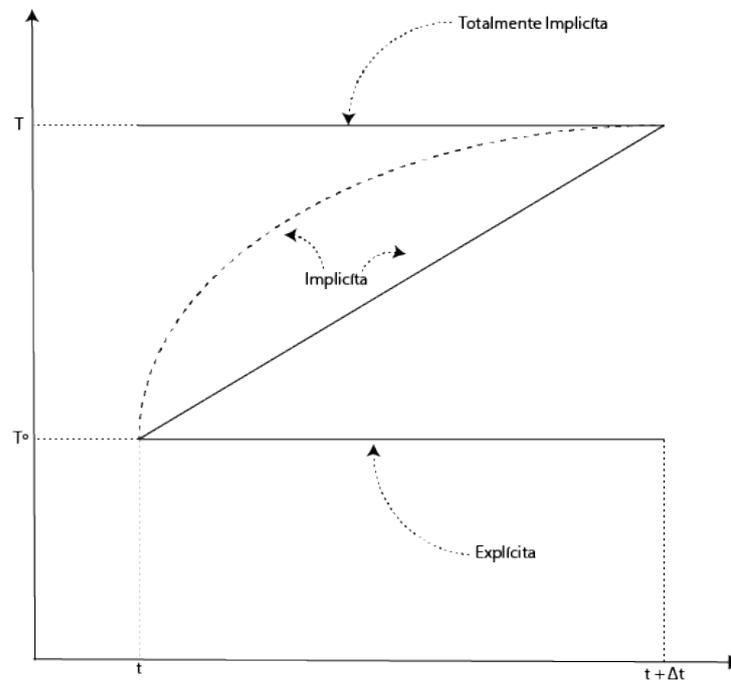
$$T^\theta = \theta T + (1 - \theta)T^0 \quad (3.2)$$

1. **Explícita:** Escolhendo $\theta = 0$, todas as temperaturas vizinhas ao ponto de estudo, avaliadas no instante de tempo anterior. Cria-se um conjunto de equações as quais são independentes entre si, ou seja podem ser resolvidas individualmente. A principal

restrição deste método é o valor máximo possível para o passo de tempo, pois é fundamental garantir o coeficiente de positividade do termo T_p^0 .

2. **Implícita:** θ basta ser diferente de 0. O método mais conhecido nesta classe é denominado de Crank-Nicolson em que a temperatura é tomada como média aritmética entre a temperatura do passado e a atual.
3. **Totalmente implícita:** Escolhendo $\theta = 1$ fará que com que todas as temperaturas vizinhas ao ponto de estudo, sejam avaliadas no instante de tempo atual. Cria-se um sistema de equações, as quais devem ser resolvidas em conjunto, a partir de resolver um sistema linear.

Figura 13 – Interpolação no tempo, (MALISKA, 1995)



No presente trabalho o método de interpolação utilizado será o totalmente implícito. Como já dito anteriormente, a formulação totalmente implícita gera um sistema de linear de equações. Na resolução real transiente deste problema, normalmente é utilizado um processo iterativo para se resolver o sistema linear dado pela equação 3.3, o termo T_p^0 não deve ser alterado até que as temperaturas para aquele intervalo de tempo ainda não tenham convergido, pois o intervalo de tempo dever ser limitado pela precisão.

Realizando a integração dessa equação no espaço e no tempo, fazendo uma aproximação das derivadas nas interfaces do volume elementar por diferenças centrais e usando uma formulação totalmente implícita, temos a equação

$$A_p T_p = A_e T_e + A_w T_w + A_n T_n + A_s T_s + A_{zf} T_{zf} + A_{zb} T_{zb} + B \quad (3.3)$$

A equação 3.3 é a equação aproximada para um volume elementar genérico, sendo deduzida levando em consideração um volume interno, todos os volumes internos possuem a mesma equação aproximada. Para obtermos os sistema de equações algébrico completo, também é necessário conhecer as equações para os volumes de fronteira. Os coeficientes apresentados na equação 3.3 são respectivamente:

$$A_e = \frac{k}{c_p \Delta x} \Big|_e \Delta y \Delta z \quad (3.4)$$

$$A_w = \frac{k}{c_p \Delta x} \Big|_w \Delta y \Delta z \quad (3.5)$$

$$A_n = \frac{k}{c_p \Delta y} \Big|_n \Delta x \Delta z \quad (3.6)$$

$$A_s = \frac{k}{c_p \Delta y} \Big|_s \Delta x \Delta z \quad (3.7)$$

$$A_{zf} = \frac{k}{c_p \Delta z} \Big|_{zf} \Delta y \Delta x \quad (3.8)$$

$$A_{zb} = \frac{k}{c_p \Delta z} \Big|_{zb} \Delta y \Delta x \quad (3.9)$$

$$M_p = \rho \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.10)$$

$$M_p^0 = \rho^0 \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.11)$$

$$B = \frac{M_p^0}{\Delta t} T_p^0 \Delta x \Delta y \Delta z + S_c \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.12)$$

$$A_p = A_e + A_w + A_n + A_s + A_{zf} + A_{zb} + \frac{M_p}{\Delta t} - S_p \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.13)$$

Neste trabalho as condições de contorno considera os mecanismos de transferência de calor por convecção e radiação. Aplicando um balanço de energia na superfície de controle onde a transferência de calor por condução é igualada a transferência de calor conjunta de convecção e radiação, dessa forma temos a equação genérica para os volumes de fronteira, mostrada na equação 3.14.

$$k_f \frac{T_f - T_p}{\Delta x_f} = h(T_{\text{inf}} - T_f) + \sigma \epsilon (T_{\text{amb}}^4 - T_f^4) \quad (3.14)$$

Nas equações 3.4 até a 3.14, a variável T representa a temperatura do objeto para qualquer ponto com coordenadas x , y e z . Já T_{amb} representa a temperatura do ambiente, considerando que o ar e a vizinhança estejam na mesma temperatura. Algumas das variáveis importantes citadas nas equações acima estão descritas a seguir:

1. σ : Constante de Stefan Boltzmann ($\sigma = 5,670367 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$).
2. k : Condutividade térmica do material.
3. h_{conv} : Coeficiente de transferência de calor por convecção.
4. c_p : Calor específico do material
5. ρ : Massa específica do material
6. t : Variável de controle do tempo.

Sabendo que cada face do material estudado representa uma condição de contorno diferente, como o material possui seis faces, teremos seis condições diferentes. Utilizando-as juntamente com a condição inicial permite expressar numericamente a temperatura de superfície a qual teoricamente se equivale aos termogramas obtidos com a câmera de infravermelho durante um ensaio por TIR ativa.

3.1.2 Formulação para volumes na superfície

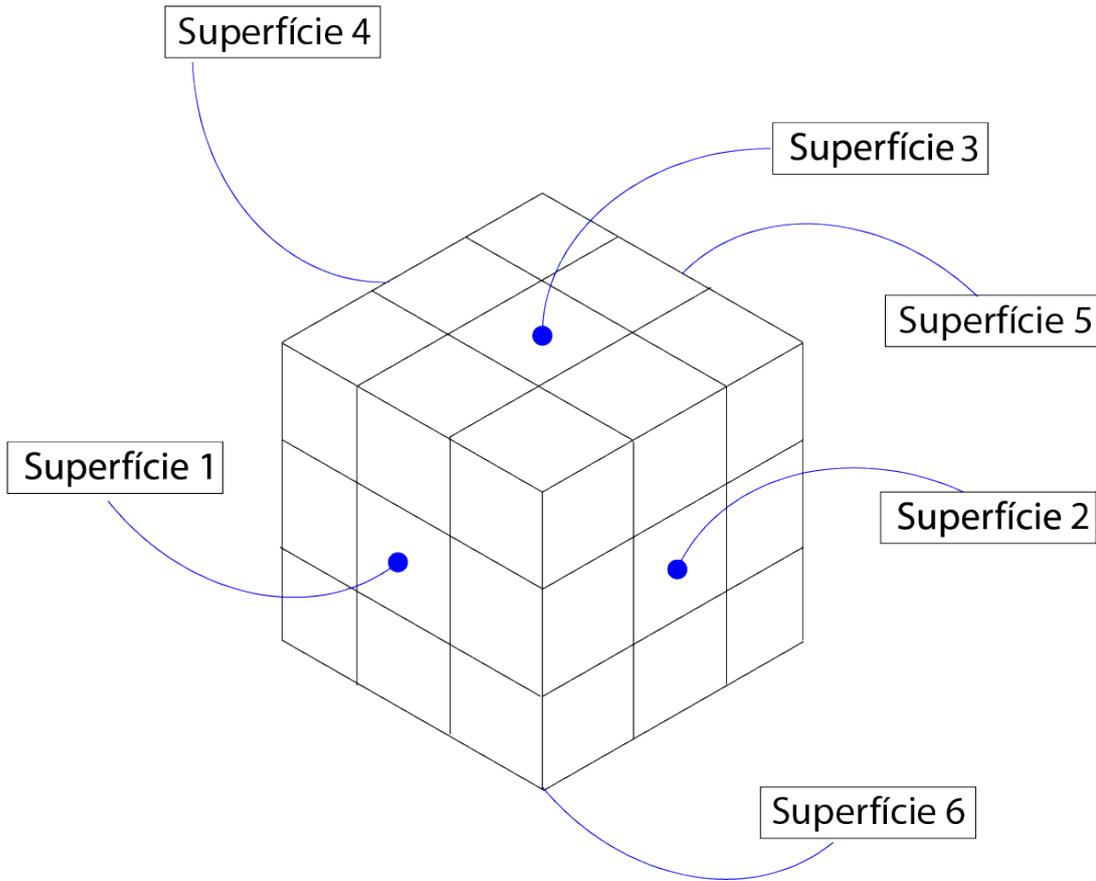
Os volumes de fronteira, que representam todos os volumes contidos na área de superfície mostrada na figura 14, utilizam equações diferentes dos volumes internos, pois as temperaturas de superfície são desconhecidas. Como elas dependem diretamente das trocas de calor por convecção e radiação que sofrem com o ambiente, é necessário realizar um balanço de energia na superfície em questão para obter as equações desejadas.

Para obter as equações dos volumes da superfície é fundamental realizar o balanço de energia nas fronteiras, como dito na seção 3.1.1. De acordo com a figura 15, é possível fazer a análise para a formulação do balanço. Pode-se ver que a energia recebida na superfície do material é transportada para dentro do volume por condução, visto que a distância do nó até a parede é de $\Delta x/2$ as equações das condições de contorno para os volumes centrais das superfícies, respeitando as coordenadas cartesianas, mostradas na figura 14, são:

- **Superfície 1:**

$$\frac{k}{\Delta z/2} (T_{(i,j,k+1)} - T_{(i,j,k)}) \Delta x \Delta y = h_{lat} (T_{amb} - T_{(i,j,k)}) \Delta x \Delta y + \sigma \epsilon (T_{amb}^4 - T_{(i,j,k)}^4) \Delta x \Delta y \quad (3.15)$$

Figura 14 – Áreas de superfície em um material cúbico



- Superfície 2:

$$\frac{k}{\Delta x/2} (T_{(i-1,j,k)} - T_{(i,j,k)})\Delta z\Delta y = h_{lat}(T_{amb} - T_{(i,j,k)})\Delta z\Delta y + \sigma\epsilon(T_{amb}^4 - T_{(i,j,k)}^4)\Delta z\Delta y \quad (3.16)$$

- Superfície 3:

$$\frac{k}{\Delta y/2} (T_{(i,j-1,k)} - T_{(i,j,k)})\Delta z\Delta x = h_{lat}(T_{amb} - T_{(i,j,k)})\Delta z\Delta x + \sigma\epsilon(T_{amb}^4 - T_{(i,j,k)}^4)\Delta z\Delta x \quad (3.17)$$

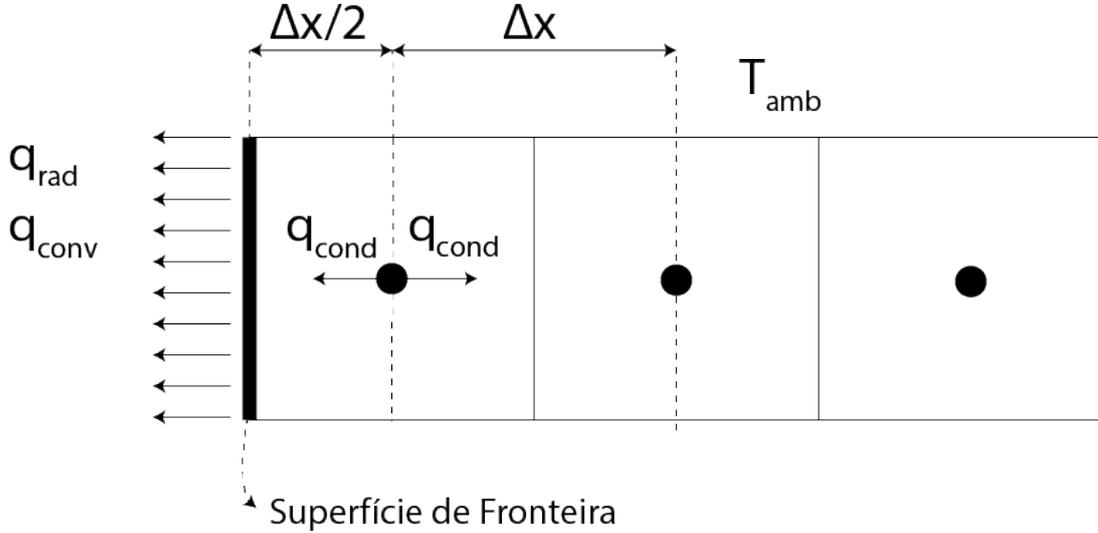
- Superfície 4:

$$\frac{k}{\Delta x/2} (T_{(i+1,j,k)} - T_{(i,j,k)})\Delta z\Delta y = h_{lat}(T_{amb} - T_{(i,j,k)})\Delta z\Delta y + \sigma\epsilon(T_{amb}^4 - T_{(i,j,k)}^4)\Delta z\Delta y \quad (3.18)$$

- Superfície 5:

$$\frac{k}{\Delta z/2} (T_{(i,j,k-1)} - T_{(i,j,k)})\Delta x\Delta y = h_{lat}(T_{amb} - T_{(i,j,k)})\Delta x\Delta y + \sigma\epsilon(T_{amb}^4 - T_{(i,j,k)}^4)\Delta x\Delta y \quad (3.19)$$

Figura 15 – Condições de contorno em volume de fronteira



- Superfície 6:

$$\frac{k}{\Delta y/2} (T_{(i,j+1,k)} - T_{(i,j,k)}) \Delta z \Delta x = h_{lat} (T_{amb} - T_{(i,j,k)}) \Delta z \Delta x + \sigma \epsilon (T_{amb}^4 - T_{(i,j,k)}^4) \Delta z \Delta x \quad (3.20)$$

3.1.3 Solução do sistema linear de equações

Para a resolução do sistema linear de equações apresentado nas secções 3.1.1 e 3.1.2, foi escolhido o método **TDMA** (*TriDiagonal Matrix Algorithm*), (MALISKA, 1995). Sabendo que o problema apresentado é tridimensional, este método deve ser executado iterativamente, fazendo varreduras através de linhas e colunas. Reescrevendo a equação 3.3 em uma forma mais conveniente para procedimentos recursivos temos:

$$A_m T_m + B_m T_{m-1} + C_m T_{m-1} = D_m \quad (3.21)$$

A razão de reescrever esta equação é para poder determinar uma relação recursiva de forma ,

$$T_m = P_m T_{m+1} + Q_m \quad (3.22)$$

que através das condições de contorno, seja possível varrer os volumes em um sentido determinando os valores de P e Q, após isso voltar no sentido oposto determinando os valores de temperatura para os volumes daquela linha. Diminuindo um índice em toda a equação 3.21, resulta em :

$$T_{m-1} = P_{m-1} T_m + Q_{m-1} \quad (3.23)$$

Substituindo a equação 3.23 na equação 3.21 e comparando o resultado com a equação 3.22, consegue-se obter as seguintes equações para P e Q:

$$P_m = \frac{-B_m}{A_m + C_m P_{m-1}} \quad (3.24)$$

$$Q_m = \frac{D_m - C_m Q_{m-1}}{A_m + C_m P_{m-1}} \quad (3.25)$$

Obtendo essas relações recursivas para P e Q, mostradas nas equações 3.24 e 3.25 respectivamente. É possível através dos valores de P_1 e Q_1 conhecer todos os valores para P e Q.

Agora é necessário conhecer as equações para os sentidos de varredura. Primeiramente realiza-se a varredura de linha em linha. Obtém-se os seguintes valores para os coeficientes da equação 3.21:

$$A_m = A_p ; B_m = -A_e ; C_m = -A_w \quad (3.26)$$

$$D_m = A_n T_n + A_s T_s + A_{z1} T_{z1} + A_{z2} T_{z2} + B_p \quad (3.27)$$

Quando a varredura for na ordem de coluna a coluna , tem-se os seguinte coeficientes:

$$A_m = A_p ; B_m = -A_n ; C_m = -A_s \quad (3.28)$$

$$D_m = A_w T_w + A_e T_e + A_{z1} T_{z1} + A_{z2} T_{z2} + B_p \quad (3.29)$$

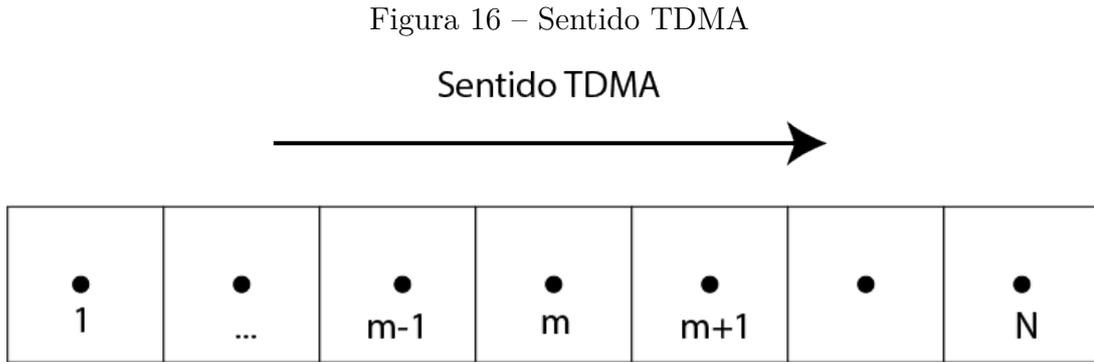
Quando a varredura for na ordem do eixo z , tem-se os seguinte coeficientes:

$$A_m = A_p ; B_m = -A_{z1} ; C_m = -A_{z2} \quad (3.30)$$

$$D_m = A_w T_w + A_e T_e + A_n T_n + A_s T_s + B_p \quad (3.31)$$

Assumindo que a varredura tenha ordem da esquerda para a direita, como mostrado na figura 16. Para se determinar os valores de P_1 e Q_1 , como são valores de fronteira, não poderão depender dos volumes à esquerda pois os mesmos não existem. Com isso o valor de C_1 deverá ser 0, deixando a equação com a forma:

$$P_1 = -\frac{B_1}{A_1} ; Q_1 = \frac{D_1}{A_1} \quad (3.32)$$



Para o outro volume de fronteira N , sabemos que o mesmo fato ocorrerá. Não poderá ser utilizado o volume à direita, pois o mesmo não existe, logo B_n deverá ser 0. Dessa forma o termo P também será 0, resultando pela equação 3.21, na equação 3.33.

$$T_N = Q_N \quad (3.33)$$

Para a aplicação do algoritmo TDMA, pode-se explica-lo em 6 passos:

- **Passo 1:** Estimar o valor das variáveis iniciais.
- **Passo 2:** Calcular os valores para P_1 e Q_1 através da equação 3.32.
- **Passo 3:** Calcular todos os valores restantes de P_m e Q_m de $m = 2$ até $m = N - 1$ utilizando as equações 3.24 e 3.25.
- **Passo 4:** Utilizar a equação 3.33.
- **Passo 5:** Calcular os valores de T para $N - 1$ até $N = 1$ utilizando a equação 3.23.
- **Passo 6:** Conferir a convergência, se o critério não for atingido. Alterar a direção ou repetir os passos.

3.2 Localização do defeito

Para a localização do defeito é utilizado a otimização evolucionária, apresentada na seção 3.5 em conjunto com o Contraste Térmico. Através das equações da seção anterior 3.1. É gerado um modelo matemático representando as condições de um ensaio por TIR. Esse modelo fornece a informação da temperatura de superfície para um certo instante de tempo. Pode-se então através da imagem 17, comparar os dois modelos gerando a função objetiva 3.34.

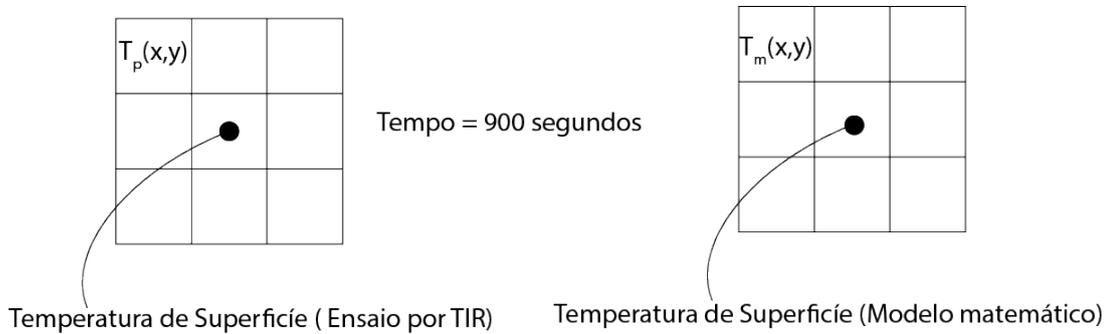
$$S = \sum (T_p(x, y) - T_m(x, y))^2 \quad (3.34)$$

Onde:

- T_p : Temperatura de superfície do material proposto em um ensaio por TIR.
- T_m : Temperatura de superfície do material proposto obtida através do modelo matemático

Com este método será possível a obtenção da posição e tamanho do defeito, se o mesmo existir. Para isso os parâmetros de entrada no problema de otimização, serão X,Y,Z sendo eles a localização em coordenadas cartesianas do defeito. O tamanho do defeito é considerado constante. Através da minimização do valor da equação 3.34, pode-se obter a posição e tamanho do defeito interno.

Figura 17 – Temperatura de superfície em um certo instante de tempo



3.3 Validação do modelo

Para garantir que o modelo proposto de resultados confiáveis, é necessário realizar uma validação do método. Em uma primeira análise verificar se o modelo se aproxima do método de capacitância global o que permitirá verificar o comportamento transiente do número de *Biot* (B_i), o qual é a razão entre as resistências interna e externa. O número de *Biot* é adimensional e representa a medida do decréscimo da temperatura do sólido relativo à diferença de temperatura entre o fluido e a superfície. (INCROPERA; DEWITT, 1996).

Realizando um balanço de energia na superfície temos a seguinte equação 3.35 :

$$\frac{kA}{L}(T_1 - T_2) = hA(T_2 - T_{inf}) \quad (3.35)$$

Rearranjando a equação 3.35, temos :

$$\frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_{inf}} = \frac{(L/kA)}{(1/hA)} = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} = \frac{hL}{k} \equiv B_i \quad (3.36)$$

Quando $B_i \ll 1$ é possível afirmar que haverá uma distribuição uniforme de temperatura, podendo então utilizar o método da capacitância global para validar o modelo proposto. (INCROPERA; DEWITT, 1996).

Para o modelo proposto, utilizando os valores da tabela 1, o número de *Biot* assume o seguinte valor :

$$B_i = \frac{9 * L_c}{204} = 0,0000023 \quad (3.37)$$

Tabela 1 – Variáveis Utilizadas

Variáveis	Valor
Condutividade térmica (k)	204 W/(mK)
Calor específico (c_p)	900J/(kgK)
Coefficiente de transferência de calor por convecção (h)	9 W/(m ² K)
Massa específica (ρ)	2800 W/(mK)
Volume (V)	6 * L
Área (A)	L ³
Comprimento do lado do material (L)	0,05 m
Comprimento característico (Lc)	$\frac{V}{A_s}$

Sendo o número de *Biot* $B_i \ll 1$, é possível utilizar a equação 3.38, para descrever a temperatura do corpo no tempo, sem considerar os gradientes espaciais:

$$T = T_{\text{inf}} + (T_s - T_{\text{inf}}) * e^{-mt} \quad (3.38)$$

Sendo que:

$$m = -\frac{hA_s}{\rho V c_p} \quad (3.39)$$

Desconsiderando a radiação no problema, é viável realizar uma comparação entre a média das temperaturas de superfície do modelo proposto e das temperaturas encontradas através da equação 3.38. Como se vê na figura 18, as curvas de decaimento de temperatura do modelo e da equação analítica ficam praticamente sobrepostas.

O contraste térmico entre as duas soluções, é mostrado através da figura 19. O contraste entre as duas curvas aumenta de acordo com o tempo, atingindo seu valor máximo de -0,4 K no instante de tempo de 400 segundos, o tempo computacional escolhido para os ensaios será tratado nas secções posteriores.

Através das figuras, 18 e 19, é possível validar o modelo proposto vendo que o mesmo demonstra o mesmo comportamento físico da curva analítica. Desse modo é possível utilizar este modelo apresentado para realizar a identificação de propriedades térmicas e de defeitos internos.

Figura 18 – Curvas de decaimento de temperatura do modelo e da equação analítica

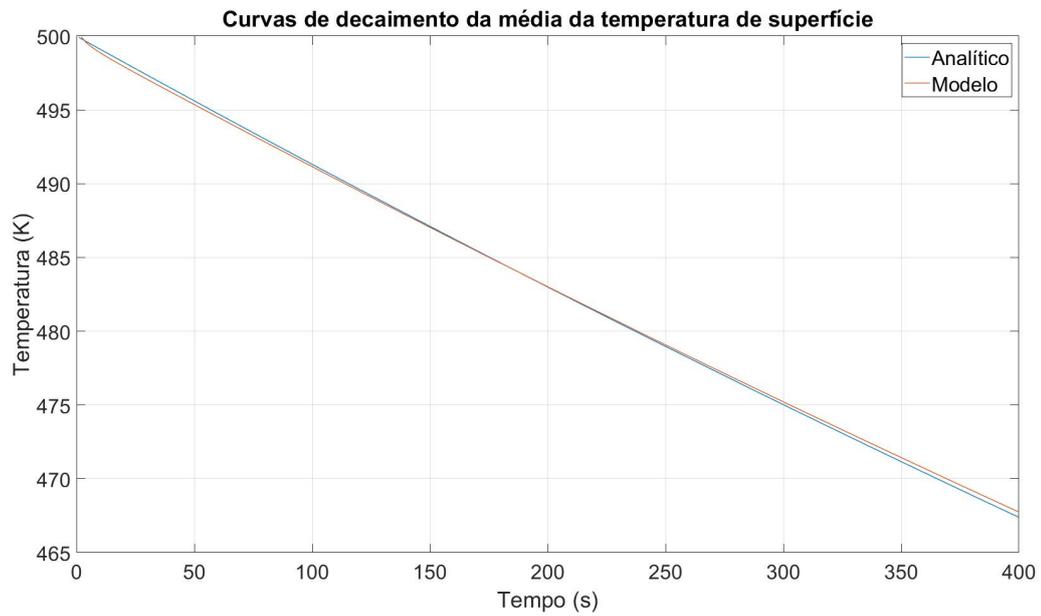
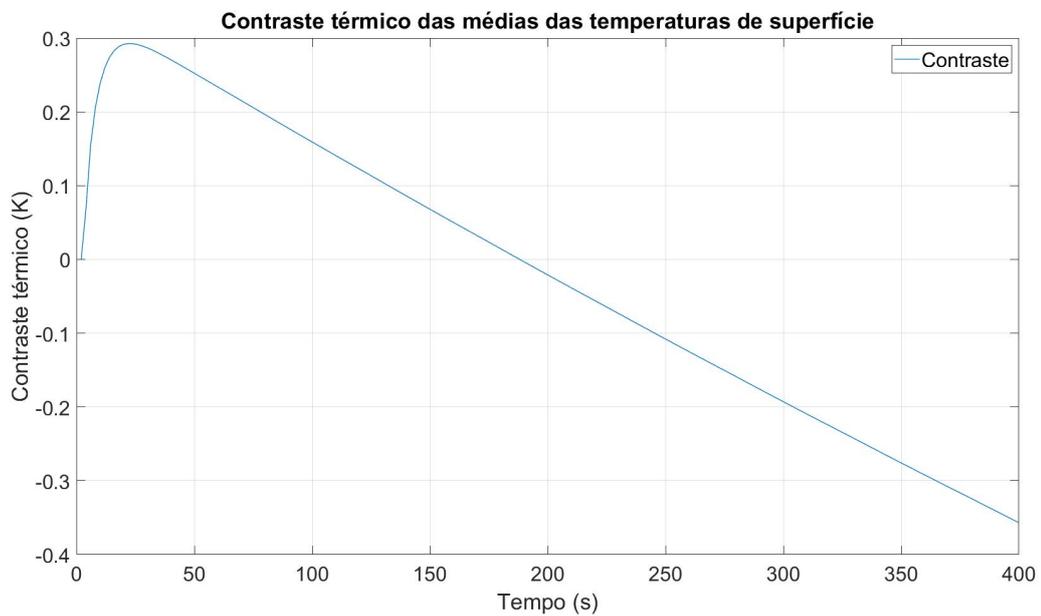


Figura 19 – Contraste térmico entre a temperatura do modelo e da solução analítica



3.4 Otimização

Alguns conceitos básicos na utilização de qualquer metodologia de otimização devem ser revisados, os quais são:

1. **Função Objetivo:** Função matemática que se deseja achar a melhor solução. Também chamada de *Fitness function*

2. **Parâmetros:** São variáveis de entrada na função objetiva, as quais variam durante o processo de otimização, visando encontrar o melhor resultado.
3. **Espaço de busca:** Durante a otimização os parâmetros de entrada devem variar. Esta variação pode ter um domínio limitado ou não. A dimensão deste espaço atribuída de acordo com o número de parâmetros, por exemplo para uma otimização com 2 parâmetros de entrada, o espaço de busca será bidimensional.
4. **Espaço de objetivos:** Conjunto imagem do espaço de busca.
5. **Restrições:** Especificações impostas para delimitar o espaço de busca e não permitir determinada faixa de valores no espaço dos objetivos.
6. **Domínio realizável:** Região onde as restrições são respeitadas.
7. **Domínio não-viável:** Região onde as restrições não são respeitadas.

Ao realizar uma abordagem de um problema de otimização se faz necessário a minimização(ou maximização) de uma função cujo sua imagem seja um escalar. Seja $\vec{x} \in \mathbb{R}^n$ o vetor de parâmetros que serão otimizados e $f(.) : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}$ o funcional objetivo que justifica cada solução \vec{x} , sabendo que a melhor solução será quando o valor de $f(\vec{x})$ for seu menor ou maior (ÁVILA, 2006).

3.4.1 Métodos de Otimização

Os métodos de otimização são classificados em dois grandes grupos os determinísticos e estocásticos. Nos métodos determinísticos a solução depende da direção do gradiente para cada iteração, e finaliza quando o gradiente se aproxima de zero, por esse motivo para a utilização deste método é necessário conhecer as derivadas ou aproximá-las por métodos numéricos, devido a isso pode acontecer da solução convergir para um ponto ótimo local. Os métodos estocásticos necessitam da avaliação da função objetiva, o que as vezes pode ser de difícil representação, descontínuas, multimodais e etc. (OCH, 2014).

Os métodos determinísticos são aqueles que em uma determinada entrada de valores, sempre produzirão a mesma saída. A solução depende do ponto de partida fornecido obtendo uma solução ótima, mas sem evidências de que ela é global. Os algoritmos determinísticos dependem do conhecimento das derivadas da função objetiva, os melhores resultados são para funções deriváveis e convexas. Uma grande vantagem deste método é a utilização de um baixo número de avaliações da função objetiva. (ALEXEY; MIKHAIL, 2014).

Os métodos estocásticos, naturais ou não-determinísticos, tem como comum característica a busca pelo ótimo através de regras de probabilidade. Estes métodos utilizam somente os valores da função objetivo, normalmente não utilizando as informações sobre suas derivadas. Estas técnicas começaram a ganhar popularidade devido a evolução dos

computadores, visto que requer um grande número de avaliações da função objetivo e das restrições. Sendo necessário dar espaço para o método explorar o espaço de busca onde está localizada a solução ótima. (ARAÚJO, 2016).

Algumas técnicas que utilizam este método são:

- **Algoritmo Genético (AG):** Foi desenvolvido na década de 70 por John Holland. Uma população inicial de cromossomos é gerada, sendo que cada um representa uma possível solução para o problema de otimização. Cada cromossomo é avaliado e recebe um valor de aptidão. Os cromossomos selecionados para a próxima geração transferem suas características para seus descendentes através da reprodução (cruzamento e mutação), até o critério de parada ser atingido. (HOLLAND, 1973), (HOLLAND, 1975)
- **Método de otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*):** Foi desenvolvido por Eberhart e Kennedy (1995) foi baseado no comportamento social de bandos de pássaros. E tem rápida convergência, simples implementação e poucos parâmetros a serem ajustados.(Eberhart, Russell, 1995)
- **Método do Recozimento:** É feito um deslocamento aleatório a partir de um ponto inicial, se o valor da função objetivo for maior ele é aceito, se for menor somente será aceito através de uma probabilidade. Esse método foi inspirado nos processos de recozimento utilizados na metalurgia, que visam chegar em uma configuração de energia mínima.
- **Algoritmos Evolucionários (AE):** Funcionam simulando a evolução de um conjunto de indivíduos, denominado de população, aos quais se aplicam diversas operações genéticas e para cada geração são submetidos a uma seleção. Devido a sua alta adaptabilidade a problemas de otimização, pois aceitam uma grande quantidade de parâmetros, são muito utilizadas nas áreas da indústria. (OCH, 2014).

Os AE são uma aproximação original, este método não irá descobrir a solução exata para o problema mas sim encontrar soluções que satisfaçam todas as restrições impostas. Quando não encontrar uma solução que satisfaça esses critérios, encontrará normalmente soluções melhores que outros métodos já conhecidos e em menos tempo computacional.

Para a execução da técnica de evolução diferencial, primeiramente é necessário escolher aleatoriamente uma população dentro do domínio. Esta população sofre uma perturbação com a adição da diferença vetorial entre dois ou mais indivíduos, escolhidos de forma também aleatória a um terceiro indivíduo. Com isso este método resulta em uma rápida convergência e fácil implementação.(OCH, 2014).

Para garantir a diversidade da população leva-se em consideração as seguintes etapas:

- **Mutação:** Cada indivíduo é alterado através da adição da diferença vetorial ponderada entre dois indivíduos aleatórios da população a um terceiro indivíduo. A partir disso são gerados os vetores doadores ou modificados. O operador de mutação é definido pela equação 3.41:

$$V_{novo} = V_{base} + F(V_1 - V_2) \quad (3.40)$$

Onde V_{novo} é o novo indivíduo gerado e F é a ponderação da diferença entre os vetores V_1 e V_2 . O V_{base} é o vetor que indica onde será realizada a perturbação. Esses vetores são escolhido de forma aleatória.

- **Cruzamento:** O cruzamento é feito na população para aumentar a diversidade dos indivíduos que foram afetados pela mutação (Price, 1999). Dessa forma os membros da população e os vetores mutantes forma o vetor modificado, trocando atributos.
- **Seleção:** O principal objetivo do operador seleção é selecionar os melhores indivíduos. Essa operação é feita escolhendo os com melhores características que serão preservados para próxima geração. Na evolução diferencial não é utilizado hierarquia (eletismos) nem seleção proporcional. O cálculo utilizado para esta escolha é através do valor da função objetivo com os valores do vetor alvo e do vetor experimental, o que apresentar o maior (ou o menor) valor contínua no processo.

Os AE como já dito são algoritmos estocásticos de otimização, que foram baseados na teoria darwiniana. De acordo com a sua teoria Darwin afirma que somente os indivíduos mais adaptados sobrevivem a seleção natural e se reproduzem de uma geração para outro. Traduzindo esse conceito em termos de otimização, tem se um processo iterativo de busca por um ótimo dentro do domínio de busca.

Na tabela abaixo é apresentado o vocabulário específico de algoritmos evolucionários que será utilizado neste trabalho:

Tabela 2 – Vocabulário específico de algoritmos evolucionários

Nomenclatura	Especificações
Indivíduos	Pontos do espaço de busca D
População	Conjunto finito de indivíduos
Função Objetivo	Função a ser otimizada
Avaliação	Cálculo da performance de um indivíduo
Geração	Corresponde a uma população de uma especifica iteração
Evolução	Processo de busca de ótimos indivíduos iterativamente
Operadores de variação	Mutação, cruzamento
Seleção	Selecionar os melhores indivíduos
Substituição	Geração de uma nova população, a partir dos pais e filhos

O custo computacional do algoritmo evolucionário é principalmente causado pelo número de avaliações que devem ser feitas. Por exemplo em um caso com algumas dezenas

de indivíduos durante algumas dezenas de gerações, alguns milhares de cálculos da função objetiva devem ser realizados. (OCH, 2014).

3.5 Minimização

Neste trabalho serão utilizados dois modelos de minimização, um deles para a identificação dos parâmetros do material e o outro para a localização dos defeitos.

3.5.1 Identificação das Propriedades do Material

O modelo de minimização que será utilizado para a identificação dos parâmetros é o de otimização evolucionária. Através de uma quantidade finita de indivíduos x_i escolhido aleatoriamente dentro do espaço de busca formando a população P_0 . Após isso vem a aplicação dos operadores de variação (mutação e cruzamento) que permite gerar um novo grupo de indivíduos, denominado de população de crianças (esta etapa é toda estocástica). A última etapa é a de seleção, onde as crianças serão avaliadas e combinadas com seus geradores com a intenção de decidir quem fará parte da próxima geração.

O método de evolução diferencial proposto por Storn e Price (1997), se difere dos demais na informação sobre a distância e a direção da população atual que é utilizado para guiar o processo de busca. As três etapas que dividem este método são mutação, cruzamento e seleção. (PRICE, 1999).

Para cada vetor alvo $x_{i,G}$ com $i = 1, 2, \dots, NP$ (sendo NP o número de indivíduos), o vetor mutação é gerado através da seguinte equação:

$$v_{i,G+1} = x_{r_1,G} + F(x_{r_2,G} - x_{r_3,G}) \quad (3.41)$$

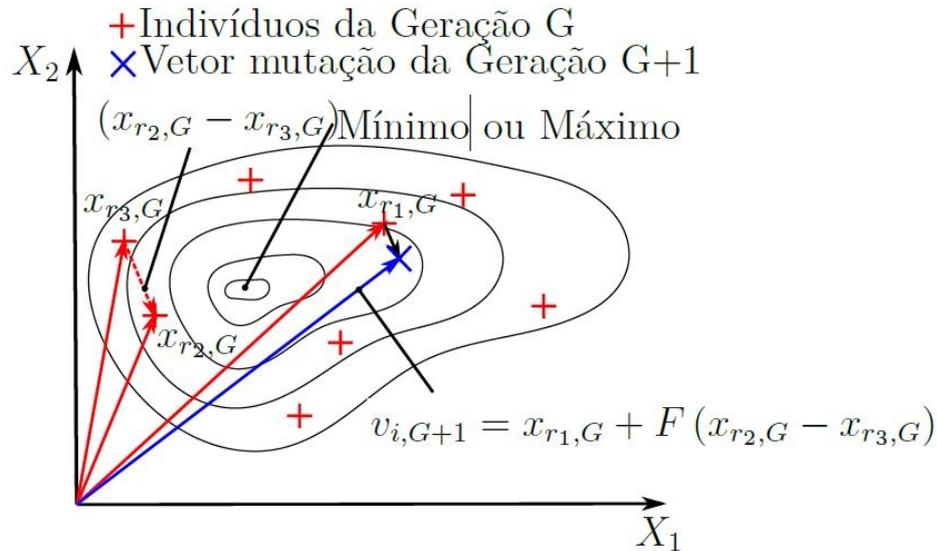
Os índices randômicos r_1, r_2 e $r_3 \in 1, \dots, NP$ são distintos entre si e $F > 0$. A escolha desses índices difere do valor corrente de i , por isso a quantidade de indivíduos (NP) deve ser maior ou igual a quatro. O valor de F é um valor real positivo entre zero e dois, controlando a amplificação da diferença ($x_{r_2,G} - x_{r_3,G}$).

Após ter sido efetuado a mutação dos valores, vem etapa do cruzamento que tem como objetivo aumentar a diversidade da população gerando uma perturbação no vetor mutação. Dessa forma o vetor experimento $u_{ji,G+1}$ é calculado de forma : (OCH, 2014)

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & \text{if } (randb(j) \leq CR) \text{ ou } j = rnbr(i), \\ x_{ji,G} & \text{if } (randb(j) > CR) \text{ e } j \neq rnbr(i) \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, D. \quad (3.42)$$

Na equação 3.42 :

Figura 20 – Esquema do método de Evolução Diferencial, (OCH, 2014)



- **randb(j)**: É o j th termo avaliado de uma geração de números randômicos entre 0 e 1.
- **CR**: Tem valor entre 0 e 1, é denominada de constate de cruzamento e é escolhida pelo usuário.
- **rnbr(i)**: É uma escolha randômica do índice pertencente ao domínio que garante que $u_{ji,G+1}$ recebe no mínimo um parâmetro de $v_{i,G+1}$.

A etapa a ser executada agora é a da seleção, que vai decidir se um indivíduo deve ou não virar membro da próxima geração ($G + 1$). O vetor experimento $u_{ji,G+1}$ é confrontado com o vetor alvo $x_{i,G}$ através do critério ambicioso. Se o vetor $u_{ji,G+1}$ gerar um valor de função de custo menor que $x_{i,G}$, então o valor de $x_{i,G}$ é igual a $u_{ji,G+1}$, caso o valor seja maior o valor é mantido igual ao de $x_{i,G}$. Este procedimento é mostrado de forma gráfica na figura 20.

Nos dias de hoje existe uma previsão do "fim da lei moore", a qual prevê um aumento exponencial para a capacidade de cálculo que pode haver em um processador. Mas as indústrias de desenvolvimento de *CPU* (*Central Process Unit*), ao invés de aumentar a capacidade de processamento para um núcleo de processamento, começaram a desenvolver chips com maior quantidade núcleos embutidos. Dessa forma uma solução foi a paralelização do algoritmo em vários processadores. (YAGOUBI, 2012).

Essa metodologia de paralelização foi utilizada neste trabalho através da biblioteca *open MPI* (*Message Precessing Interface*), onde cada núcleo fica encarregado de calcular o valor de uma função objetivo para cada indivíduo da população.

3.5.1.1 Algoritmo de Otimização Evolucionária e Estratégia de Paralelização

Escrito pelo Dr. Feng-Sheng Wang, da universidade National Chung Cheng University de Taiwan, no site oficial de Evolução Diferencial dos professores Price e Storn (2012), o código computacional de otimização em Fortran 90 que consiste na otimização de um problema de interpolação do polinômio de Chebychev, utilizando um único processador. Foi modificado por (OCH, 2014), para se tornar um código paralelizado utilizando a biblioteca do *open* MPI, com o intuito de diminuir o tempo computacional. O código foi modificado de forma a fazer as seguintes operações:

1. Permitir a execução de n-experimentos
2. Paralelização dos indivíduos de forma ordenada
3. Através da chamada de núcleos de processamento livres foi feita uma otimização no tempo de cálculo. Criado o `RANDOM_SEED` em função do tempo, dessa forma a população escolhida no início do programa seria diferente para cada vez que o mesmo fosse executado.

Entrando em mais detalhes sobre o funcionamento do código paralelizado. O início do programa se deve a um processador mestre que gera uma população randômica, dentro dos limites estabelecidos pelo usuário, de acordo com a hora do computador. Com isso para cada inicialização do programa uma população inicial diferente será criada. Em seguida este processador mestre envia um indivíduo da população para cada processador escravo livre que irá processar o código de simulação das temperaturas. Quando o código de simulação tiver atingido o critério de parada proposto, o mesmo irá enviar o valor minimizado de sua função objetivo para o processador mestre. Se nesse estágio ainda houver algum indivíduo a ser processado durante a geração atual, o mestre o envia novamente a algum processador escravo ocioso. Quando toda a população da geração atual tiver sido executada, o processador mestre então realiza as etapas de mutação, cruzamento e seleção como descritos anteriormente. Gerando assim uma nova população que será novamente distribuída aos processadores escravos. Como esse é um processo iterativo, seu fim chegará quando o número de iterações requisitados pelo usuário for atingido. Se o usuário requisitou um número de experimentos maior que um, todo o processo descrito acima será refeito até atingir o número de experimentos necessários.

Para a execução deste código de otimização serão utilizados dois computadores, um deles localizado no laboratório de sistemas térmicos da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, sendo que o mesmo contém um processador Intel I-9 com 20 núcleos. E o outro computador escolhido, de minha propriedade, com processador AMD Ryzen 7 2700 que possui 16 núcleos. Todos os resultados atingidos neste trabalho utilizaram os dois computadores descritos acima.

3.5.2 Identificação e Localização dos Defeitos

Para a localização e identificação dos defeitos foi utilizado um método baseado no Método de Hooke-Jeeves Pattern Search. O qual minimiza o valor da função objetivo, com vários parâmetros de entrada, sem o uso de derivadas. Normalmente apresenta um progresso rápido nas primeiras iterações mas após alguns passos pode se tornar lento. Segundo (NOCEDAL; WRIGHT; ROBINSON,), se a função for diferenciável, a convergência do método segue para um ponto estacionário.

O método funciona gerando um conjunto de direções de pesquisa de maneira iterativa. A pesquisa gera direções de tal forma que abranjam completamente o espaço de pesquisa. Em outras palavras, a partir de qualquer ponto no espaço de busca, qualquer outro ponto pode ser alcançado percorrendo ao longo dessas direções. Em um problema N-dimensional, isto requer pelo menos N linearmente independente direções de pesquisa. Por exemplo, em uma função de duas variáveis, pelo menos duas direções de pesquisa são necessárias para ir de qualquer ponto para qualquer outro ponto. Entre muitas combinações possíveis de N direções de busca, algumas combinações podem alcançar o destino mais rapidamente (com menores iterações), e algumas podem exigir mais iterações. (KIRGAT; SURDE, 2014)

Uma combinação de movimentos exploratórios e heurísticos são feitas iterativamente. O movimento exploratório é realizado na vizinhança do ponto atual, para localizar o melhor em suas redondezas. Posteriormente, são utilizados dois destes pontos para realizar um movimento padrão. Os quais serão descritos abaixo.

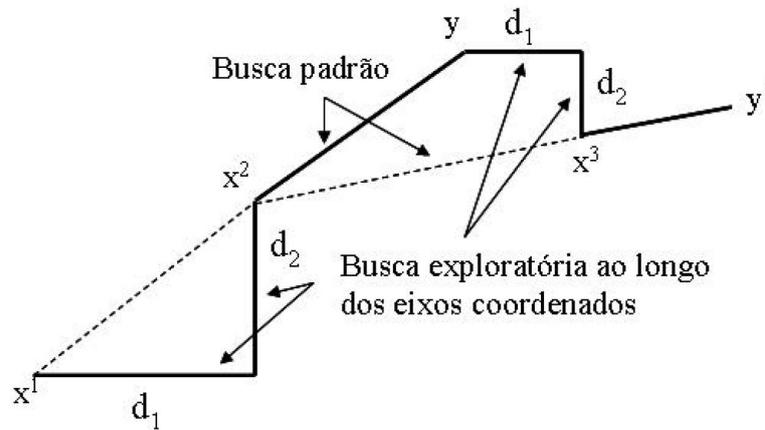
No movimento exploratório, o ponto atual é perturbado em direções positivas e negativas para cada variável, uma por vez, e o melhor ponto é guardado. O ponto atual é atualizado após o término das perturbações de cada variável. Se o ponto encontrado depois de todas as perturbações for diferente do ponto inicial desta iteração, então é possível dizer que a busca exploratória foi um sucesso, caso contrario é considerada como um fracasso. De qualquer forma, no final da busca o melhor ponto encontrado é dado como resultado.

Para o movimento padrão, um novo ponto é encontrado, saindo do melhor ponto desta iteração na direção que conecta o último melhor ponto e o ponto atual, mostrado na equação 3.43:

$$x_p(k+1) = x(k) + (x(k) - x(k-1)) \quad (3.43)$$

O método de Hooke e Jeeves, é realizado através de uma aplicação iterativa entre uma busca exploratória e um pulo utilizando o movimento padrão, mostrados na figura 21. Se o movimento padrão não levar a um melhor resultado, o mesmo não é aceito e a distancia da busca exploratória é reduzida, o critério de parada é escolhido pelo usuário, e o programa termina quando o valor da distancia da busca exploratória se torne menor que

Figura 21 – Primeiras iterações do método de Hooke e Jeeves, (S. Bazaraa; SHERALI; M. Shetty, 1979)



o critério de parada escolhido.

3.5.2.1 Algoritmo para a Localização do defeito e Estratégia de Parelização

O algoritmo implementado foi um método híbrido, fazendo inicialmente uma busca estocástica para a escolha do ponto inicial, e posteriormente o método de Hooke e Jeeves apresentado na secção 3.5.2. Para se realizar a busca do defeito, serão necessários 3 parâmetros de busca, X, Y e Z, os quais representarão o centro do defeito. O algoritmo pode ser apresentado nos seguintes passos:

- **1:** Para a escolha do ponto inicial(P), são gerados 15 vetores randômicos, contendo os valores dos 3 parâmetros, sendo comparados entre si através do valor da função objetivo. O que obtiver o menor valor será escolhido como ponto inicial(P) da busca.
- **2:** Feita a escolha do incremento dos parâmetros e do critério de parada. A variável de controle das iterações será definida como $i=0$.
- **3:** Realizar o movimento exploratório tendo como base o ponto $P(i)$, se o movimento exploratório for um sucesso vá para o passo 5 definindo o melhor valor da busca exploratória como $P_z(i)$, caso contrario vá para o passo 4.
- **4:** Se o incremento das variáveis for menor que o critério de parada, o programa se encerra. Caso contrário o incremento das variáveis é dividido por 2 e o programa retorna para o passo 3.
- **5:** Realizar o movimento padrão, de acordo com a equação.

$$P(i + 1) = P_z(i) + (P_z(i) - P(i - 1)) \quad (3.44)$$

- **6:** Ir para o passo 3.

Para melhorar a velocidade do algoritmo, foi então desenvolvido uma paralelização para o movimento exploratório, visto que para cada parâmetro, serão explorados 2 vizinhos. Para cada busca exploratória devia se obter os valores da função objetivo em série. Com a paralelização é possível separar as funções para serem executadas em núcleos de processamento separados.

Para o desenvolvimento da paralelização foi utilizada a biblioteca OpenMp para Fortran em conjunto com o Visual Studio. Tendo em vista que para cada busca exploratória a função objetivo deveria ser realizada sete vezes, foi necessário a utilização de sete núcleos de processamento. A ferramenta de paralelização também foi utilizada para auxiliar na velocidade para a localização do ponto inicial, vendo que a função objetiva deve ser executada quinze vezes, para esse caso foram utilizados 15 núcleos do CPU.

4 Modelo Experimental

Nesta secção são detalhados os equipamentos e materiais utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. O equipamento mais importante é a câmara de infravermelho *FLIR SC620*, a qual proporciona a captura de imagens térmicas necessárias para a realização do ensaio por TIR ativa. Todos os equipamentos pertencem ao Laboratório de Sistemas Térmicos, localizado na escola politécnica da Universidade Católica do Paraná.

Para a realização do ensaio prático é necessário os seguinte equipamentos:

- **Forno elétrico (NOVA TÉCNICA NT 512):** Forno elétrico que possui circulação de ar por convecção natural, controle de temperatura por termostato eletromecânico com faixa de trabalho de 50°C até 250°C com precisão de $\pm 15^{\circ}\text{C}$, indicação através de termômetro bimetálico analógico localizado no painel frontal, internamente é pintado na cor alumínio resistente a altas temperaturas e isolamento térmica entre a câmara interna e a externa em lã *Roofing*. É utilizado como fonte térmica para elevar a temperatura do material estudado.

Figura 22 – Forno elétrico (NOVA TÉCNICA NT 512)



- **Câmara Térmica:** Câmara climatizada para avaliação energética de sistemas e equipamentos com faixa de operação de -10°C a 60°C e umidade de 10% a 95%. Esta câmara opera como calorímetro para simular condições internas e externas de ambientes. É utilizada para garantir que não haja mudanças na temperatura do ambiente enquanto o ensaio térmico esteja sendo realizado. E também realiza toda

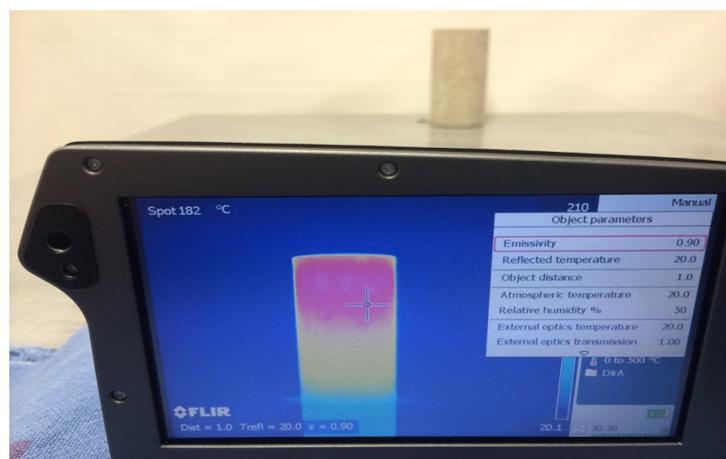
a parte de monitoramento e captura de dados relacionados a temperatura interna, para garantir esse valor foram utilizados dez sensores de temperaturas espalhados em pontos específicos.

Figura 23 – Câmara Térmica



- **Câmara Térmica:** O principal equipamento utilizado neste trabalho é a câmera térmica *FLIR SC620*, a qual permite fazer a filmagem térmica do resfriamento do bloco estudado com uma precisão elevada, a mesma permite alterações na escala de temperatura, na umidade relativa, na temperatura do ambiente, na emissividade do material, na distância em que o material esta sendo estudado e outros, os quais podem ser vistos na seguinte imagem. As especificações técnicas mais importantes estão relatadas na tabela 3.

Figura 24 – Câmera Térmica(*FLIR SC620*)



- **Bancada de testes:** Bancada de testes, construída especificamente para o proposto trabalho, a mesma conta com a regulagem de distância da câmera ao objeto. Proporcionando realizar as imagens térmicas do material estudado sempre na mesma

posição. Garantindo então que para todos os ensaios realizados a imagem térmica será realizada em condições semelhantes.

Figura 25 – Bancada Experimental

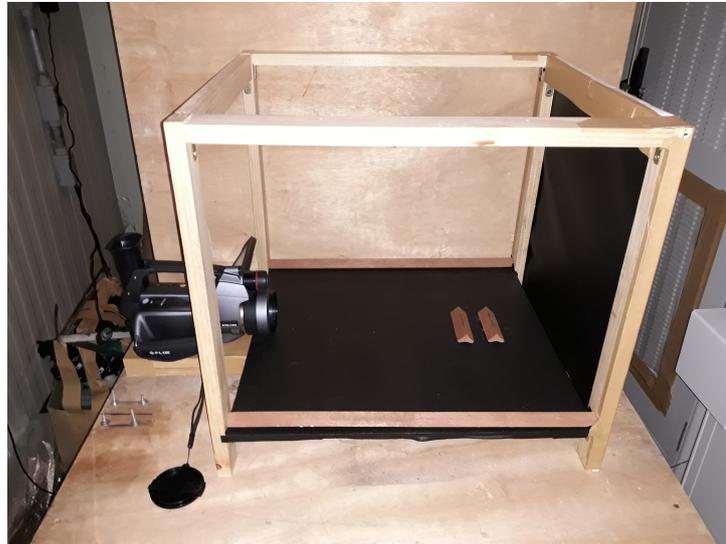


Tabela 3 – Propriedades da câmera FLIR SC620.

Fabricante	FLIR Systems
Modelo	SC 620
Faixa de temperatura	-40 a 500°C
Precisão	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 2\%$ da leitura
Correção de emissividade	Variável de 0,01 a 1
Correção de medição	Temperatura refletida, transmissão óptica, transmissão atmosférica e óptica externa
Resolução espacial(IFOV)	0,65 mrad
Sensibilidade térmica/ NETD	<40 mK @+ 30°C
Frequência de imagem	30 HZ(60/120 Hz)
Display	LCD wide screen, 1024 x 600 pixels
Ajuste de imagem automático	Contínuo/manual; linear ou baseado em histograma
Ajuste de imagem manual	level/span/max/min

4.1 Realização do ensaio experimental

O ensaio prático é realizado seguindo os seguintes passos:

- Aquecimento : O bloco de alumínio é aquecido à 500 K, utilizando o forno da figura 22. O mesmo é aquecido durante 2 horas, para garantir a uniformidade da temperatura inicial.

- Resfriamento : O bloco é colocado na bancada experimental, mostrada na figura 25, onde o mesmo é resfriado naturalmente dentro da câmara térmica, para não haver mudanças na temperatura do ambiente.
- Captura de imagens : Durante o processo de resfriamento, a temperatura de superfície do bloco é capturada pela câmera térmica, mostrada na figura 24.
- Processamento de imagens : Através do *software Flir Tools* é extraído a temperatura de superfície, para uma planilha em *Excel* onde é separada as temperaturas por pixel da imagem para cada tempo de captura.
- Identificação das propriedades físicas : Após ter sido obtida a temperaturas de superfície. É possível utilizar o código de minimização, apresentado neste trabalho, para identificar as propriedades físicas do material.
- Identificação do defeito : Com todas as informações obtidas anteriormente, é realizada a busca do defeito no bloco de alumínio.

4.2 Cuidados na realização do ensaio experimental

Para garantir o sucesso do ensaio experimental, primeiramente é essencial avaliar se todos os passos para um ensaio TIR foram atingidos. Deve verificar se o aquecimento da amostra foi uniforme e se atingiu a temperatura inicial utilizada no modelo matemático proposto. Após isso é fundamental realizar a configuração da câmera infravermelha, arrumando sua posição na bancada e configurando os parâmetros necessários para a realização do ensaio, a frequência de amostragem utilizada foi de 1 frame/s. Os dados são armazenados como um arquivo .SEQ, este arquivo é aberto com o *software Flir Tools* e através deste é possível extrair os dados indispensáveis para a utilização no modelo proposto.

Através do *software Flir Tools* é possível fazer uma rápida análise sobre o ensaio térmico, podendo verificar se houve algum tipo de interferência externa que possa ter no ensaio, caso constatado refaz-se todo o teste.

4.3 Confeção das amostras

Através de uma barra de alumínio com dimensões 50 mm x 50 mm x 300 m foram retirados três blocos com medidas de 50 mm x 50 mm x 50 mm os quais serão utilizados para os ensaios experimentais. A dimensão da amostra foi escolhida em função da disponibilidade e da facilidade de operação do material.

Para a confecção do defeito em um dos blocos foram utilizadas duas máquinas presentes no Laboratório de Usinagem localizado na Pontifícia Universidade Católica do

Paraná. Primeiramente foi utilizado a máquina de eletroerosão por fio para retirar do terceiro bloco uma peça, mostrada na figura 26, com dimensões 13 mm x 13 mm x 43,33 mm.

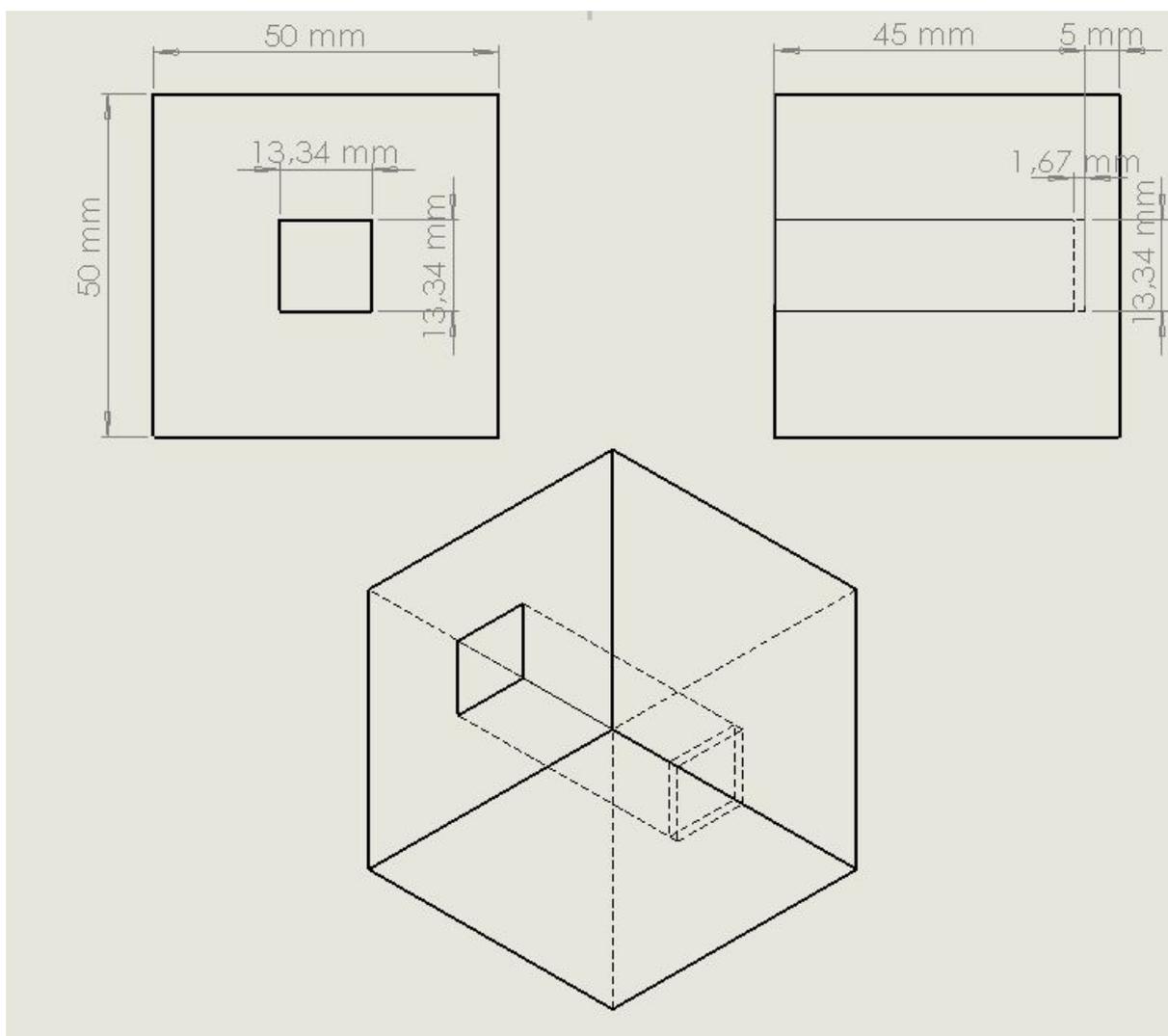
Figura 26 – Peça de alumínio



A segunda máquina utilizada foi a de eletroerosão por penetração para criar um buraco com dimensões 13 mm x 13 mm x 45 mm, mostrado na figura 27. Após a confecção deste buraco será inserido a peça da figura 26 dessa forma deixando um defeito interno no bloco com dimensões 13 mm x 13 mm x 1,67 mm.

Para tratar da emissividade do material, foi utilizado uma tinta preta fosca, a qual possuía uma emissividade de 0,95. Dessa forma todas as faces do bloco apresentam a mesma emissividade. Para garantir esse valor, foi colado uma fita isolante, com emissividade conhecida de 0,95, no bloco de alumínio pintado, inserindo-o durante 1 dia dentro da câmara de temperatura do LST para estabilização térmica. Após isto foi realizado um ensaio com a câmara térmica, vendo que não havia diferença de temperatura na imagem térmica, é possível então validar que a emissividade do bloco pintado é igual ao da fita isolante, possuindo um valor de 0,95.

Figura 27 – Desenho técnico da peça em alumínio



5 Resultados Obtidos

5.1 Resultados Teóricos

Esta secção se dedica exclusivamente a realizar uma análise do modelo matemático desenvolvido para ter uma previsão do comportamento térmico do material durante um ensaio por TIR experimental. Realizando os testes numericamente é possível avaliar a importância da posição do defeito e o que ela acarreta para sua detecção, a influência que temperatura inicial do bloco têm sobre o modelo e a importância das propriedades termofísicas do defeito em sua detecção. Para a identificação de parâmetros, é analisado a quantidade de ruído presente na temperatura de superfície que ainda permite a identificação dos mesmos.

5.1.1 Identificação das Propriedades Termofísicas do Material

Na realização do ensaio experimental um dos principais aspectos a ser levado em consideração é conhecer os valores das propriedades termofísicas deste material, para poder garantir que o modelo matemático represente fielmente a realidade. Nesta secção é proposto um método de identificação destas propriedades através da otimização de uma função objetiva, mostrada na equação 5.1.

$$S = \sum_{t=1}^{t=Máx} (T_p(x, y, t) - T_m(x, y, t))^2 \quad (5.1)$$

Na equação 5.1 a variável T_p representa a temperatura de superfície do modelo padrão, o qual queremos identificar as propriedades, já para T_m é a temperatura de superfície experimental para os valores utilizados pelo código de otimização. Minimizando o valor desta equação chega-se nas propriedades otimizadas. As propriedades térmicas que são utilizadas como base estão apresentadas na tabela 4:

Tabela 4 – Propriedades utilizadas

Propriedade	Valor
Condutividade térmica (k)	150 W/(mK)
Calor específico (c_p)	900 J/(kgK)
Coefficiente de transferência de calor por convecção (h)	9 W/(m ² K)
Emissividade (ϵ)	0,95

O primeiro teste realizado foi para um bloco de alumínio aquecido a 500 K, em sua imagem térmica foi gerado um ruído branco de ± 1 K em cada pixel e para cada instante

de tempo. Esse teste teve as seguintes características para a otimização, foram efetuadas trinta iterações com quatro parâmetros de entrada, o número de indivíduos utilizado foi de quarenta. O ensaio foi realizado com um critério de convergência de 10^{-4} . As propriedades obtidas pelo código foram:

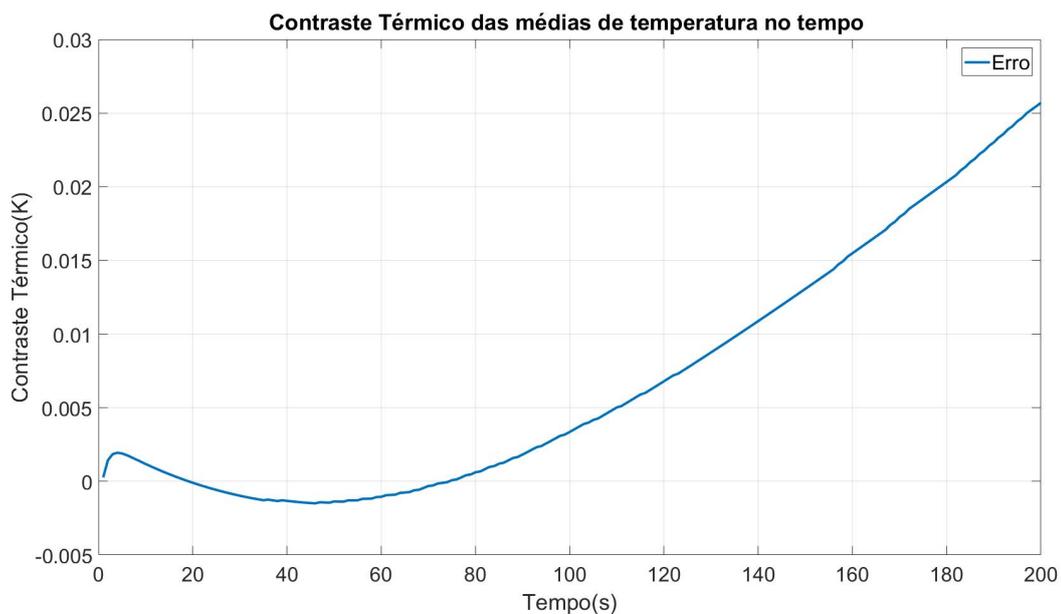
Tabela 5 – Resultados obtidos através da otimização para ruído de 1 K

Propriedade	Valor Real	Valor Obtido	Erro(%)
Condutividade térmica (k)	150W/(mK)	148W/(mK)	1,0
Calor específico (c_p)	900J/(kgK)	881J/(kgK)	2,1
Coefficiente de convecção (h)	9,0W/(m ² K)	8,7W/(m ² K)	3,1
Emissividade (ϵ)	0,95	0,93	1,3

É possível verificar na tabela 5 que o maior erro obtido foi para o parâmetro coeficiente de convecção(h) atingindo um valor de 3,1% e para o menor, condutividade térmica (k), foi de 1,0%.

Fazendo a média da temperaturas de superfície para cada instante de tempo para os dois casos, e utilizando a equação do contraste térmico entre essas médias é possível analisar a diferença de temperatura obtida para cada instante de tempo nos 200 segundos de ensaio. É visto na figura 28 que no final do teste o contraste atinge seu maior valor que chega a 0,026 K.

Figura 28 – Contraste térmico das média das temperaturas de superfícies para os parâmetros encontrados em relação aos originais



O segundo e o terceiro teste foram realizados com as propriedades termofísicas do alumínio, conforme a tabela 6, pois elas representam o bloco utilizado no ensaio prático.

Tabela 6 – Propriedades do alumínio

Propriedade	Valor
Condutividade térmica (k)	204 (W/mK)
Calor específico (c_p)	921,096 (J/kgK)
Massa específica (ρ)	2800 (kg/m ³)
Coefficiente de convecção (h)	9 W/(m ² K)
Emissividade (ϵ)	0,95

No segundo teste foi utilizado o mesmo ruído branco de ± 1 K para cada volume de superfície e para cada instante de tempo. Mas para esse caso alguns parâmetros da otimização foram alterados, agora são cinco variáveis de entrada, cinquenta indivíduos e trinta gerações. A convergência de 10^{-4} é mantida a mesma e o tempo de ensaio também é mantido nos 200 segundos.

Tabela 7 – Resultados obtidos através da otimização em um bloco de alumínio com ruído de 1 K

Propriedade	Valor Real	Valor Obtido	Erro(%)
Condutividade térmica (k)	204(W/mK)	203(W/mK)	0,2
Calor específico (C_p)	921,096(J/kgK)	919(J/kgK)	0,2
Massa específica (ρ)	2800(kg/m ³)	2891(kg/m ³)	3,3
Coefficiente de convecção (h)	9W/(m ² K)	9,38W/(m ² K)	4,3
Emissividade (ϵ)	0,95	0,96	1,7

É possível verificar na tabela 7 que o maior erro obtido foi para o parâmetro coeficiente de convecção (h) atingindo um valor de 4,3% e para o menor, condutividade térmica (k), foi de 0,2%.

Na figura 29 é possível verificar o contraste térmico das médias de temperaturas de superfície entre os parâmetros encontrados e os originais. O contraste máximo atingido foi de 0,14 K no tempo de 200 segundos.

Para o terceiro teste realizado também foi utilizado as propriedades termofísicas do alumínio como valores originais, mas o valor do ruído branco na temperatura de superfície para cada volume foi alterado para ± 4 K. Os parâmetros da otimização foram mantidos iguais ao do segundo teste. Após as trinta gerações encontramos os valores mostrados na tabela 8:

Na tabela 8 diferentemente dos outros dois ensaios a propriedade que obtêm o maior erro desta vez é a condutividade térmica, chegando a 5,13%, e a com menor erro é o coeficiente de transferência térmica (h) atingindo 0,97%. Na figura 30 é visto que o maior valor para o contraste térmico das médias de temperaturas de superfície também é atingido no final do ensaio com um tempo de 200 segundos e valor de 0,024 K.

Figura 29 – Contraste térmico das média das temperaturas de superfícies para os parâmetros encontrados na imagem com ruído de 1 K

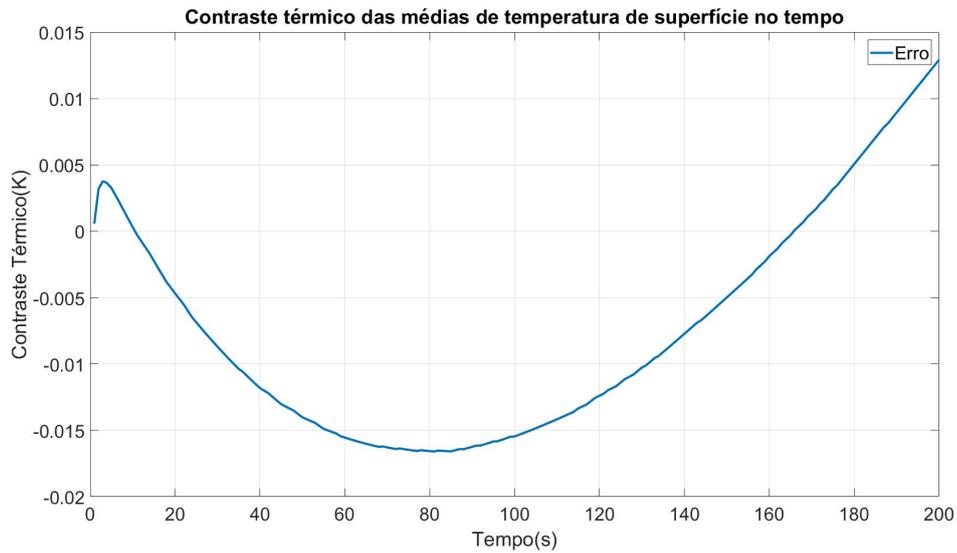
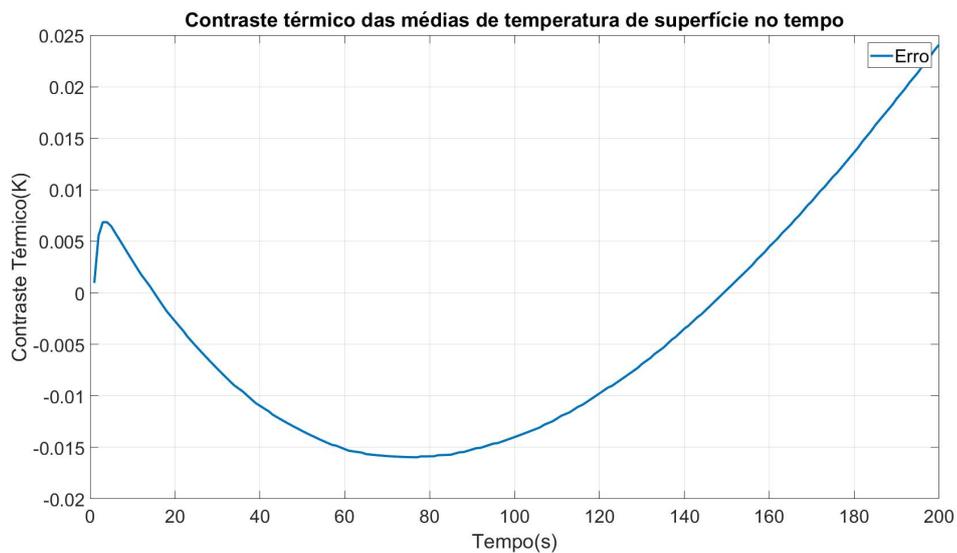


Tabela 8 – Resultados obtidos através da otimização em um bloco de alumínio com ruído de 4 K

Propriedade	Valor Real	Valor Obtido	Erro(%)
Condutividade térmica (k)	204(W/mK)	193,5(W/mK)	5,1
Calor específico (C_p)	921,096(J/kgK)	945,1215(J/kgK)	2,6
Massa específica (ρ)	2800(kg/m ³)	2726,75(kg/m ³)	2,6
Coefficiente de convecção (h)	9W/(m ² K)	9,9W/(m ² K)	0,97
Emissividade (ϵ)	0,95	0,936	1,5

Figura 30 – Contraste térmico das média das temperaturas de superfícies para os parâmetros encontrados na imagem com ruído de 4 K



5.1.2 Detecção de defeitos

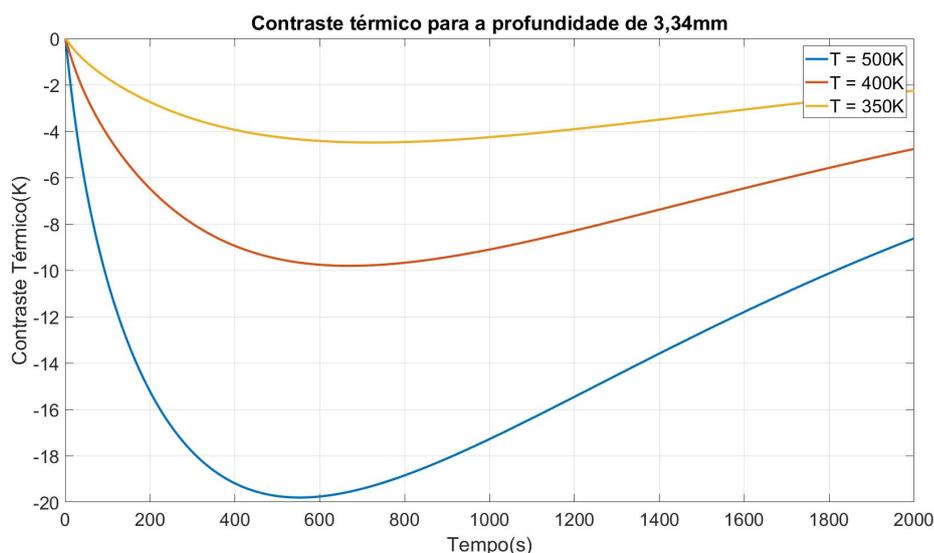
5.1.2.1 Análise da Influência da Temperatura Inicial na Detecção de Defeitos

Para realizar está análise, é necessário assumir que no modelo proposto utiliza as propriedades termofísicas do alumínio e o defeito é considerado como ar estagnado, para poder representar o ensaio experimental.

O objetivo é verificar o contraste térmico absoluto na temperatura de superfície variando a temperatura inicial do modelo e da profundidade em que se encontra o defeito. O ensaios são realizados para as temperaturas iniciais de 500 K, 400 K e 350 K. Já para os defeitos gerados os mesmos possuem as dimensões de 1,6 mm x 1,6 mm X 1,6 mm e estão localizados nas profundidades de 3,34 mm, 25 mm e 48,34 mm. A análise é realizada da seguinte forma, para cada profundidade e temperatura é sempre realizado dois ensaios um com defeito e outro sem, para que possa ser possível calcular o contraste térmico.

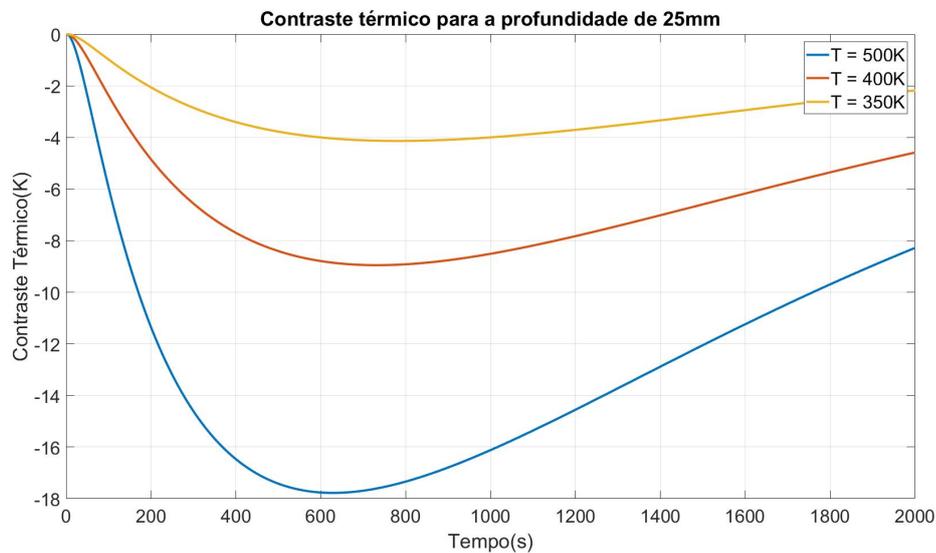
Na figura 31 é possível verificar a resposta transiente da temperatura de superfície para o defeito na profundidade de 3,34 mm. É visto que com o incremento da temperatura inicial (T_i) no modelo, a amplitude do contraste térmico aumenta chegando quase a 20 K na curva de T_i igual a 500 K. Já para o caso de T_i igual a 350 K pode-se ver que essa amplitude é de apenas 5 K. Na figura 32, onde a profundidade do defeito já é um pouco maior posicionado no meio do bloco pode-se ver na curva de $T_i = 500\text{K}$ que o contraste térmico máximo é de aproximadamente 18 K já para $T_i = 350\text{K}$ é de 4 K.

Figura 31 – Contraste térmico da temperatura de superfície com o defeito localizado na profundidade de 3,34mm



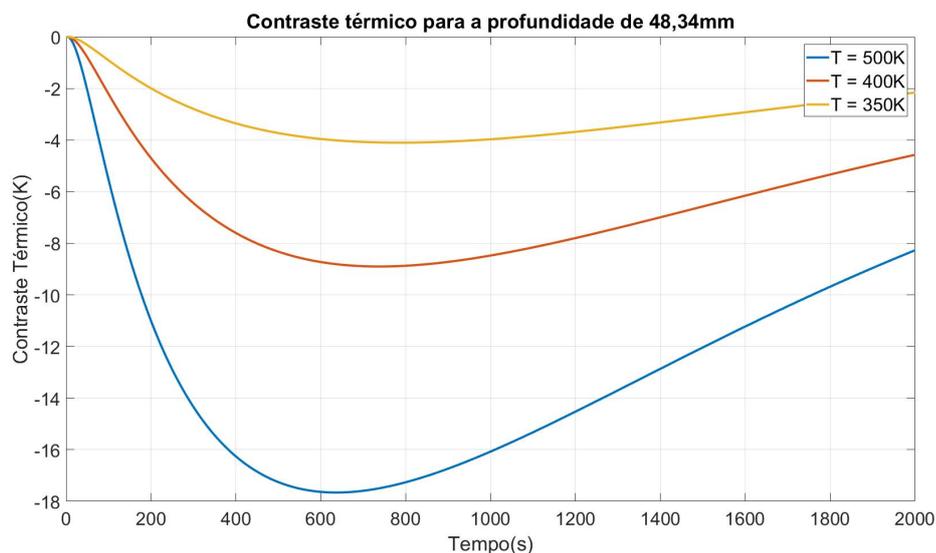
Para a profundidade de 48,34 mm o defeito se encontra praticamente na fronteira da parte de trás do bloco, suas curvas de contraste térmico estão representadas na figura 33 e é possível verificar que sua resposta é muito parecida com as da curva de profundidade

Figura 32 – Contraste térmico da temperatura de superfície com o defeito localizado na profundidade de 25mm



25 mm, sendo que a principal diferença é que elas atingem seu contraste máximo em um tempo mais elevado, indicando que quanto mais profundo o defeito se encontra mais tempo leva para a sua perturbação atingir a temperatura de superfície.

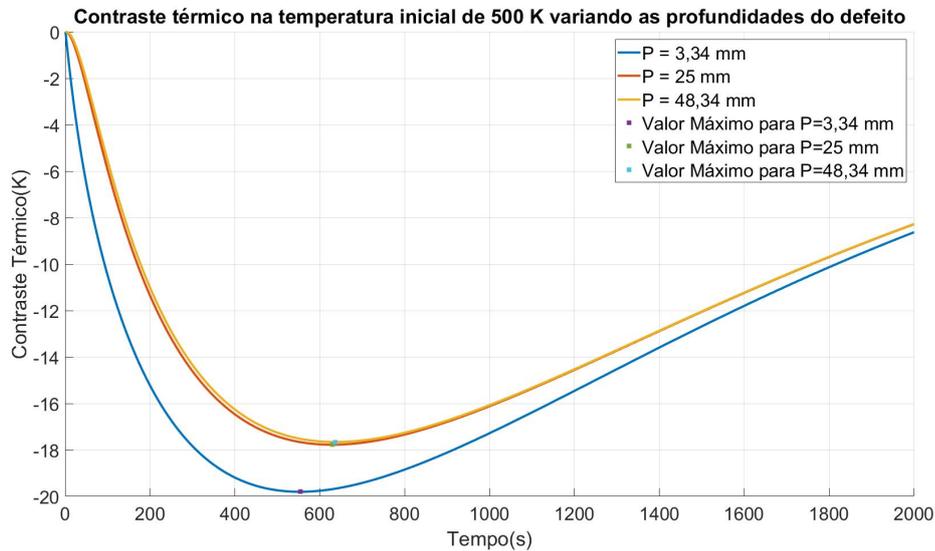
Figura 33 – Contraste térmico da temperatura de superfície com o defeito localizado na profundidade de 48,34mm



Na figura 34 é possível verificar que quanto mais próximo da superfície o defeito se encontra, maior é a amplitude do contraste térmico. A diferença de contraste térmico entre o mais próximo da superfície ao mais distante é de aproximadamente 3 K. É visto que o tempo em que o contraste térmico chega ao seu valor máximo aumenta de acordo com a profundidade do defeito chegando a apresentar uma diferença de aproximadamente 140 segundos do de 3,34 mm para o de 48,34 mm. Através dessa análise é possível concluir

que quanto mais próximo da superfície estiver o defeito maior é sua detectabilidade e o tempo de ensaio necessário é menor.

Figura 34 – Contraste térmico na temperatura inicial de 500 K para as profundidades de 3,34 mm, 25 mm, 48,34 mm



Outro ponto importante da análise do comportamento da temperatura de superfície em relação a temperatura inicial do modelo, é a curva de decaimento de temperatura do volume de fronteira que se encontra na direção do defeito. Nas figuras 35, 36 e 37 pode-se ver que a evolução da curva de temperatura se apresenta diferente para cada localidade do defeito, sendo o resfriamento mais lento para os defeitos próximos a superfície.

Figura 35 – Curva de decaimento da temperatura para T_i de 500 K

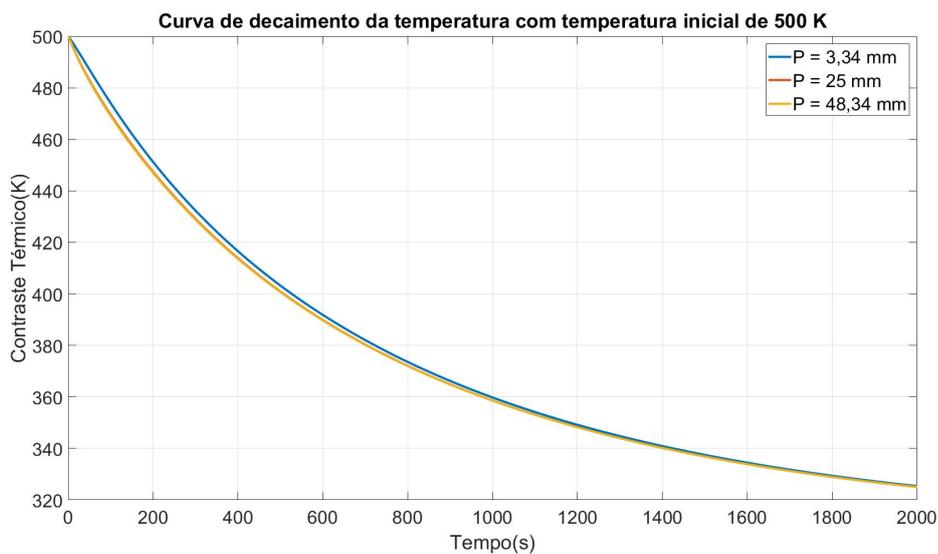
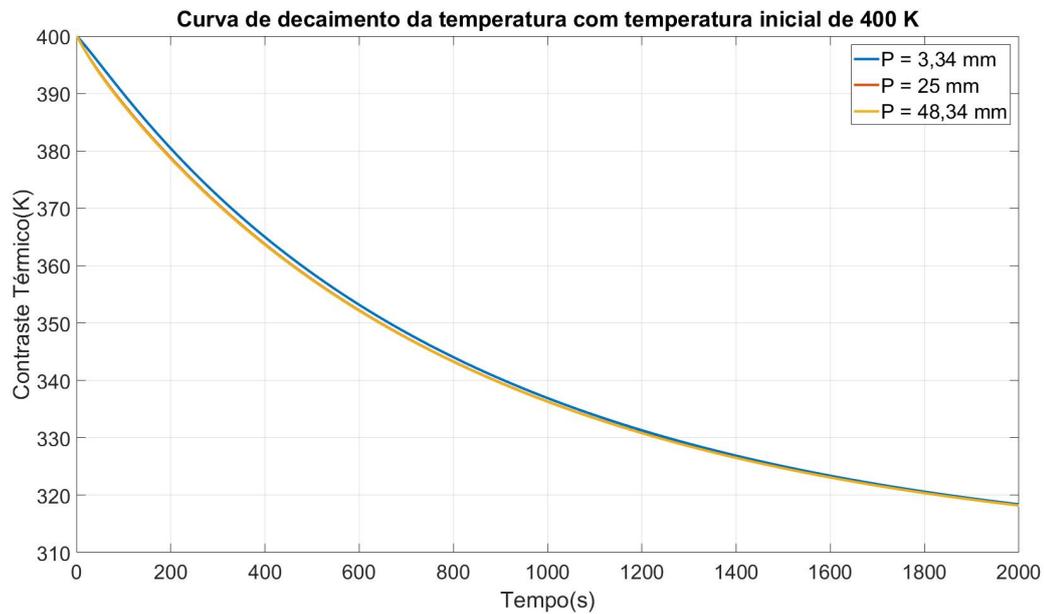
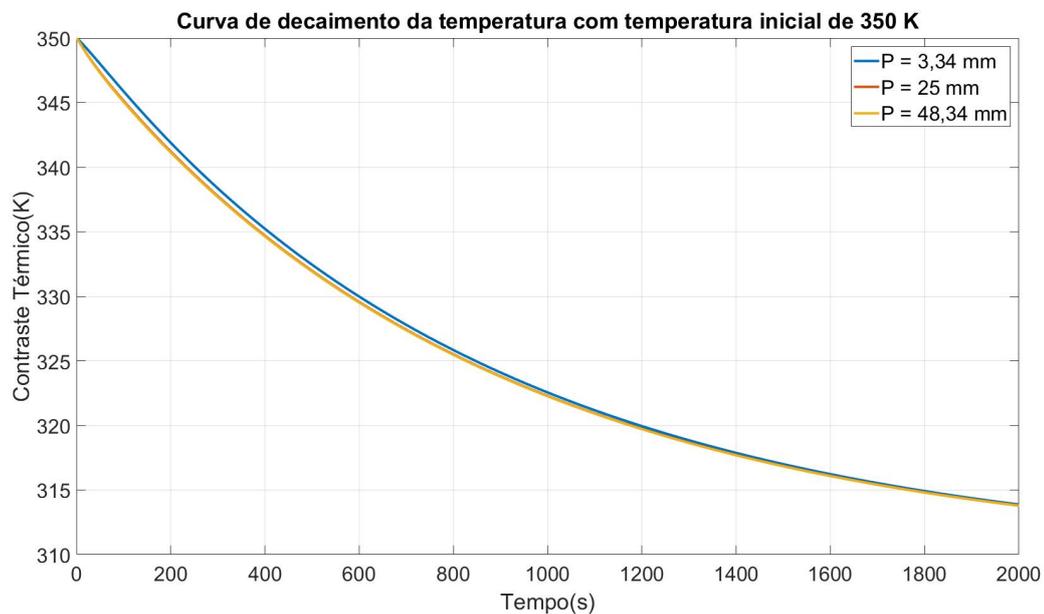


Figura 36 – Curva de decaimento da temperatura para T_i de 400 KFigura 37 – Curva de decaimento da temperatura para T_i de 350 K

5.1.2.2 Influência da Posição do Defeito em sua Detecção

Para determinar o a variação do contraste térmico com a profundidade do defeito. É importante realizar uma análise desta variação do contraste no modelo matemático em questão. Para realizar essa identificação, o modelo terá um formato cúbico com dimensões 50 mm x 50 mm x 50 mm e é dividido em 30 x 30 x 30 volumes iguais, nessa análise a profundidade do defeito irá variar no eixo Z do volume 2 ao volume 29, os volumes 1 e 30

são descartados pois se localizam nas regiões de fronteira, assumindo que cada volume possui dimensões de 1,667 mm x 1,667 mm x 1,667 mm, o defeito simulado apresenta dimensões de um volume. Os testes realizados no modelo simularam um ensaio de 6.000 segundos. Na tabela 9 pode-se ver as especificações para cada teste.

Tabela 9 – Especificações dos testes alterando a profundidade do defeito

Teste	Tempo(s)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
1	6000	25	25	3,34
2	6000	25	25	8,34
3	6000	25	25	13,34
4	6000	25	25	18,34
5	6000	25	25	23,34
6	6000	25	25	28,34
7	6000	25	25	33,34
8	6000	25	25	38,34
9	6000	25	25	43,34
10	6000	25	25	48,34

Para estas análises o material escolhido foi o alumínio e o defeito foi considerado como vazios com ar. Todas as suas propriedades termofísicas do material e do defeito foram mantidas constantes, somente a profundidade em que o defeito se encontra foi alterada. O método escolhido foi Mínimos Quadrados. Para isso primeiramente foi realizado um teste sem o defeito, para ter como base sua temperatura de superfície. Tendo esta referência foi realizado os outros 10 ensaios, através da equação 5.2 foi calculado um valor para o contraste térmico para cada instante de tempo para cada ensaio.

$$\text{ContrasteTérmico}(t) = (T_{(S/Def)}(x, y, t) - T_{(C/Def)}(x, y, t))^2 \quad (5.2)$$

Dessa forma é possível verificar através da figura 38 os contrastes térmicos de todos os ensaios realizados. Com essa análise é possível localizar para cada profundidade do defeito um tempo onde seu contraste tenha atingido o valor máximo, nesse ponto pode-se afirmar que para esta localidade e neste instante de tempo a temperatura de superfície já apresenta todas as informações fundamentais para a localização do defeito. Como é visto na tabela 10:

As informações obtidas nesta secção são de grande importância para a realização dos ensaios práticos, pois para cada profundidade do defeito é possível saber qual é o tempo ideal, onde a temperatura de superfície já recebeu todas as informações necessárias sobre o defeito, de execução dos testes.

Figura 38 – Contraste térmico da temperatura de superfície modificando a profundidade do defeito

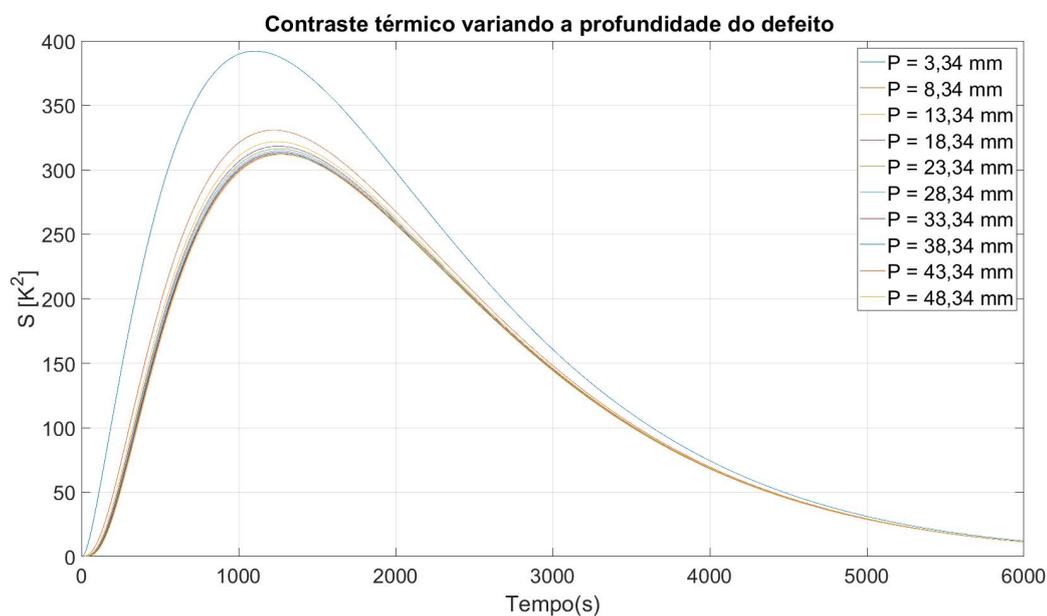


Tabela 10 – Valor do contraste térmico máximo e tempo onde o contraste atingiu seu valor máximo

Teste	Profundidade(mm)	Tempo(s)	Contraste Térmico Máximo	Tempo(s)
1	3,34	6000	392,0981	1108
2	8,34	6000	330,7576	1226
3	13,34	6000	321,9179	1244
4	18,34	6000	318,3528	1250
5	23,34	6000	316,4243	1254
6	28,34	6000	314,9958	1260
7	33,34	6000	313,7551	1262
8	38,34	6000	312,8261	1264
9	43,34	6000	312,1470	1268
10	48,34	6000	311,8298	1274

5.1.2.3 Análise da Importância das Propriedades Termofísicas do Defeito em sua Detecção

As propriedades termofísicas do defeito são de extrema importância para sua detecção, por isso é necessário analisar a sensibilidade da temperatura de superfície em função de sua variação. As propriedades estudadas nesta seção são a condutividade térmica (k), o calor específico (c_p) e a massa específica (ρ). As propriedades utilizadas como padrão são as do alumínio. A primeira propriedade estudada é a condutividade térmica, primeiramente são realizados quatro ensaios conforme a tabela 11:

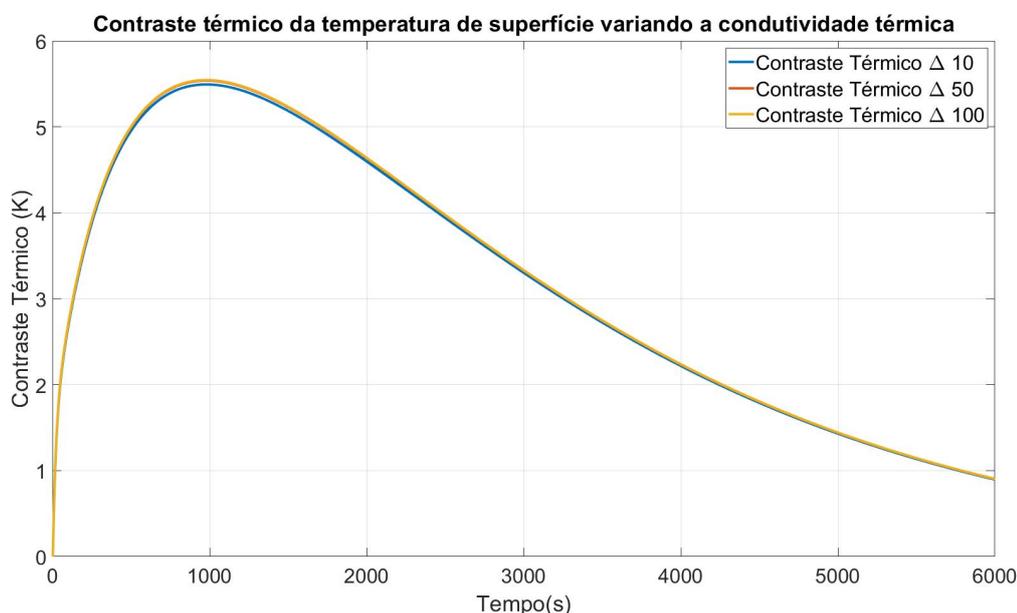
O ensaio número um é utilizado como valor padrão para o uso do contraste térmico da temperatura de superfície, dessa forma tem-se três variações no valor da condutividade

Tabela 11 – Especificações dos testes alterando o valor da condutividade térmica

Ensaio	Tempo(s)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	$k[W/(mK)]$	$C_p [J/(kgK)]$	$\rho [kg/(m^3)]$
1	6000	25	25	3,34	00,1	921,00	2800
2	6000	25	25	3,34	10,1	921,00	2800
3	6000	25	25	3,34	50,1	921,00	2800
4	6000	25	25	3,34	100,1	921,00	2800

térmica, teremos um delta de 10, 50 e 100.

Figura 39 – Contraste térmico da temperatura de superfície no tempo variando a condutividade térmica



Como visto na figura 39, é possível verificar que para uma variação no valor da condutividade térmica a temperatura de superfície tem uma resposta sensível, sendo que para a menor diferença de resposta já é elevada tendo como valor máximo 5,3 K. Para as variações de 50 K e 100 K é observado que suas curvas são muito parecidas, chegando as duas em seu valor máximo de 5,5 K. As variações nos valores da condutividade térmica geram uma sensibilidade elevada na temperatura de superfície do material estudado, mas é observado na figura 39, que essa variação se altera moderadamente de acordo com o incremento no valor.

A segunda propriedade a ser estudada é o calor específico (C_p), nesse caso todas as propriedades do material serão consideradas constantes, somente a em estudo terá sua variação. São realizados quatro ensaios conforme visto na tabela 12:

Igualmente aos ensaios da condutividade térmica, o primeiro ensaio é utilizado como valor padrão para o uso do contraste térmico da temperatura de superfície, fazendo

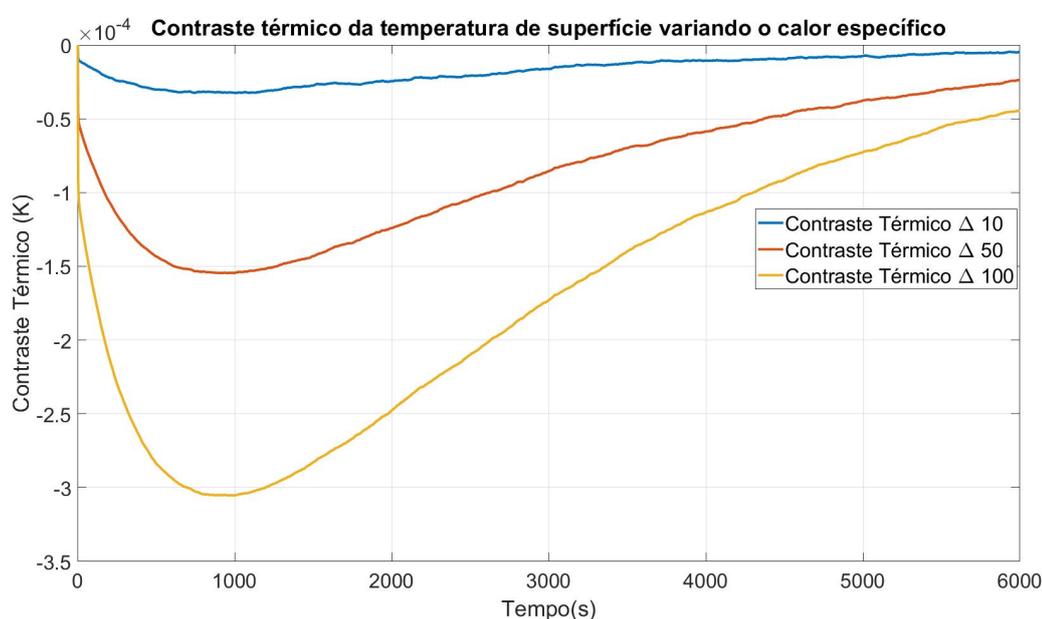
Tabela 12 – Especificações dos testes alterando o valor do calco específico

Teste	Tempo(s)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	$k[W/(mK)]$	$C_p [J/(kgK)]$	$\rho [kg/(m^3)]$
1	6000	25	25	3,34	204	00,1	2800
2	6000	25	25	3,34	204	10,1	2800
3	6000	25	25	3,34	204	50,1	2800
4	6000	25	25	3,34	204	100,1	2800

com que tenhamos três diferenças de temperatura de dez, cinquenta e cem nas variações do calor específico.

A sensibilidade da temperatura de superfície em relação a variação do calor específico é baixa, como visto na figura 40, para uma diferença de temperatura de dez seu valor máximo atinge $-0,25 * 10^{-4}$, já para um uma diferença de temperatura de cinquenta e de cem seus valores máximos respectivamente são de $-1,6 * 10^{-4}$ e $-3,1 * 10^{-4}$. Levando em consideração que os ensaios foram realizados com uma precisão de $1 * 10^{-4}$, podemos considerar que o nível de sensibilidade para uma diferença de temperatura de dez é desprezível, somente os de cinquenta e cem podem ser levados em conta.

Figura 40 – Contraste térmico da temperatura de superfície no tempo variando o calor específico



A terceira propriedade em estudo é a massa específica do defeito, como já mostrado anteriormente os ensaios realizados para esta propriedade seguiram na mesma ordem que os demais, primeiramente foram realizados 4 ensaios variando seu valor, como visto na tabela 13:

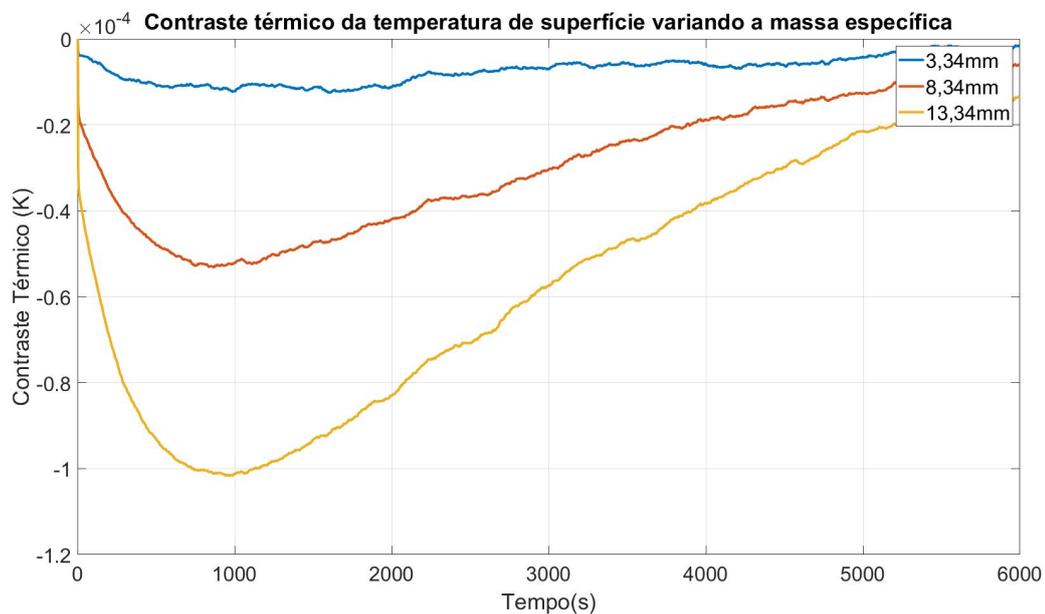
A partir destes quatro ensaios, obtém-se o contraste térmico da temperatura de superfície para três variações, dez, cinquenta e cem. A figura 41, mostra as sensibilidades

Tabela 13 – Especificações dos testes alterando o valor da massa específica

Teste	Tempo(s)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	k[W/(mK)]	C_p [J/(kgK)]	ρ [kg/(m ³)]
1	6000	25	25	3,34	204	921	00,1
2	6000	25	25	3,34	204	921	10,1
3	6000	25	25	3,34	204	921	50,1
4	6000	25	25	3,34	204	921	100,1

no tempo.

Figura 41 – Contraste térmico da temperatura de superfície no tempo variando a massa específica



Como já dito anteriormente a precisão em que os ensaios foram realizados foi de 1×10^{-4} , e como se vê na figura 41 para os três deltas o valor máximo ainda ficou a baixo desta precisão. Sendo assim as variações da massa específica que possuem valor menor de cem são consideradas desprezíveis para os ensaios.

5.1.2.4 Mínimos Locais

Para utilizar o método de Hooke e Jeeves com maior confiabilidade, é necessário confirmar a ausência de mínimos locais na função objetivo, dessa forma é mostrado nesta seção a curva da função objetivo em relação a alteração dos valores nos parâmetros de entrada. Sabendo que para esta análise serão utilizados para as propriedades do material os valores mostrados na tabela 6.

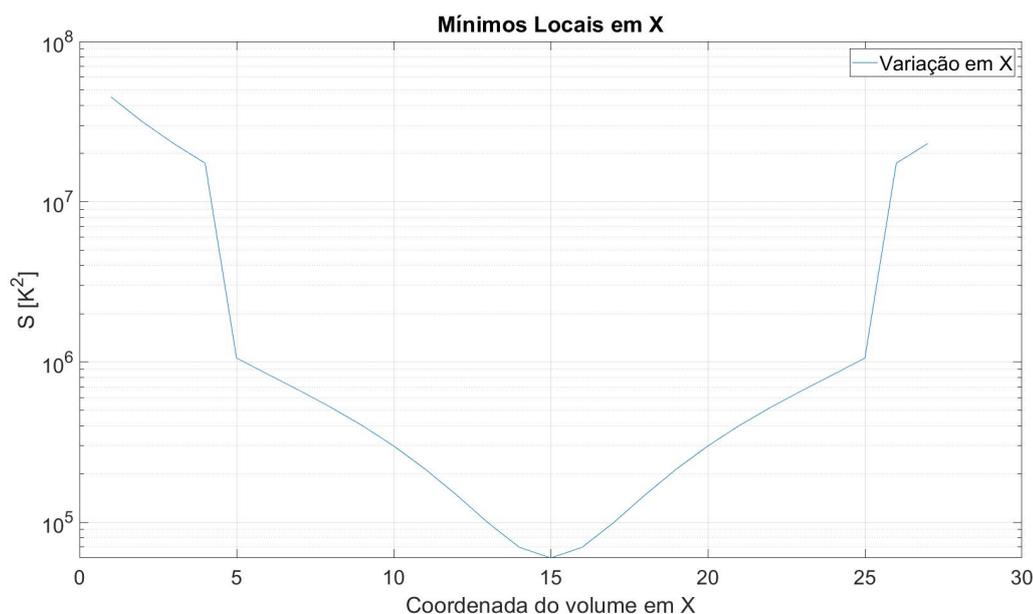
O defeito tem como suas características principais:

- **Localização em X:** Entre 20 mm : 31,67 mm.

- **Localização em Y:** Entre 20 mm : 31,67 mm.
- **Localização em Z:** Entre 05 mm : 06,67 mm.
- **Dimensões:** O defeito apresenta dimensões em volumes de 8 x 8 x 2 e de 13,34 mm x 13,34 mm x 5 mm. Para a busca do defeito o programa estará procurando seu ponto central.
- **Condutividade térmica (k):** 0,025 W/(mK)

O primeiro parâmetro a ser analisado é a coordenada X. Variando seu valor de 1,67 mm até 48,34 mm, deixando fixo a localidade do defeito em Y e em Z. Na figura 42, a abscissa está em volumes, tendo em vista que cada volume tem dimensões de 1,67 mm x 1,67 mm x 1,67 mm.

Figura 42 – Variação do parâmetro X em volumes.



O gráfico 42 está na escala logarítmica para melhor representar o resultado. É visto que não existem mínimos locais para o parâmetro X, somente um mínimo global localizado no volume 16 o qual melhor condiz com o centro do volume.

Para a busca de mínimos locais no parâmetro Y, o mesmo é submetido a uma variação no seu valor de 1,67 mm até 48,34 mm, deixando fixo os valores de X e Z durante o processo. Na figura 43, o qual está em uma escala logarítmica, que o parâmetro Y também não possui mínimos locais. Tendo seu mínimo global no volume 16 o qual representa o centro do volume em sua coordenada.

A variação do parâmetro Z, é feita da mesma forma que dos outros parâmetros. É visto no gráfico 44, que a variação do parâmetro Z também não possui mínimos locais

Figura 43 – Variação do parâmetro Y em volumes.

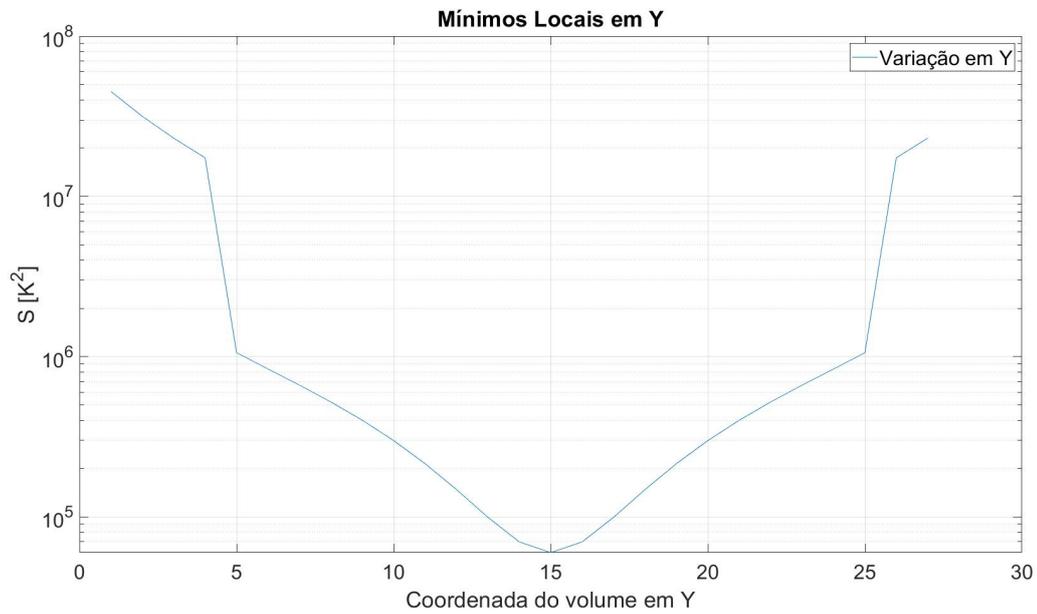
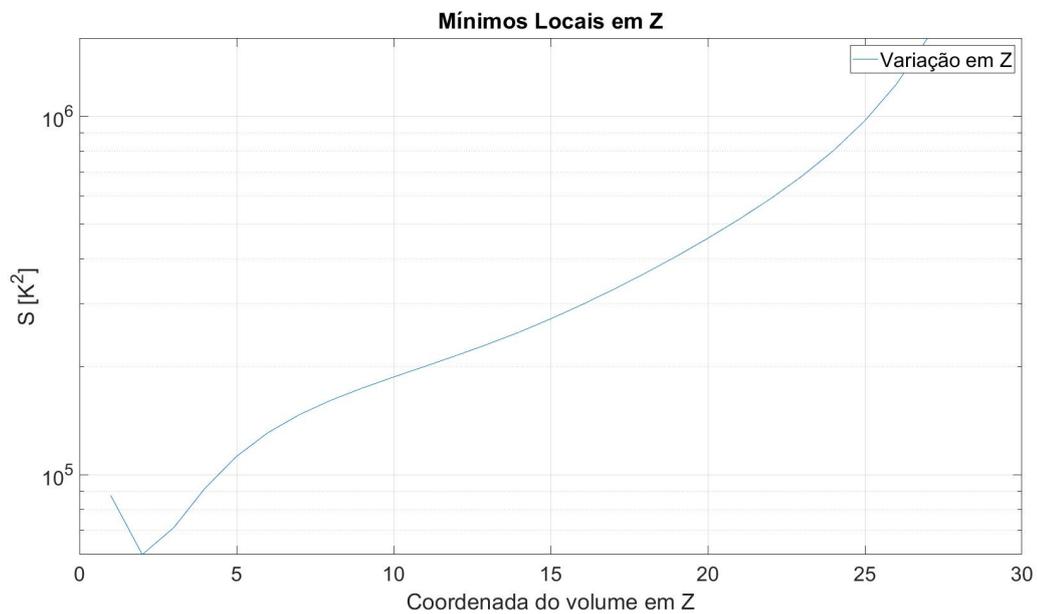


Figura 44 – Variação do parâmetro Z em volumes.



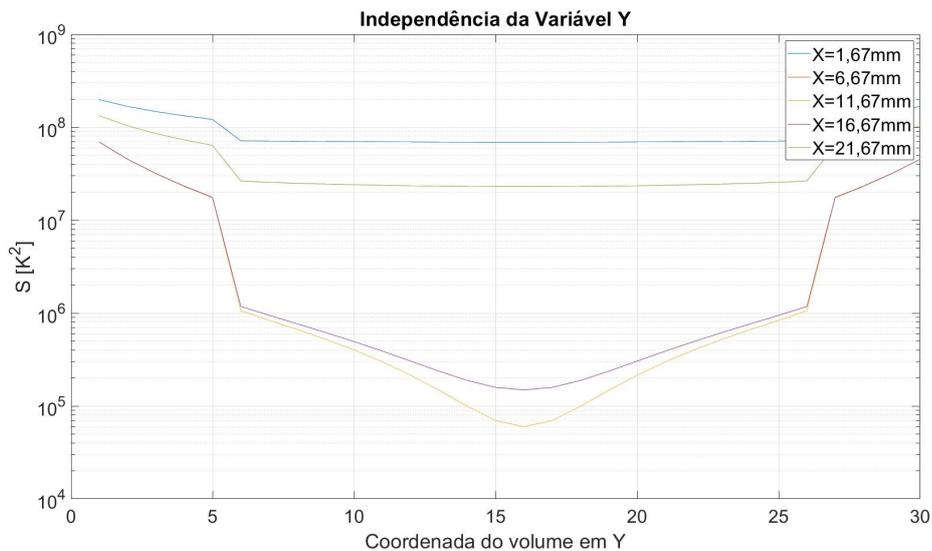
e sim somente um mínimo global no volume 3 o qual representa o centro do defeito na coordenada Z.

Tendo em vista que na variação dos três parâmetros de entrada, nenhum apresenta mínimos locais é possível então utilizar o método de Hooke e Jeeves.

5.1.2.5 Independência das Variáveis

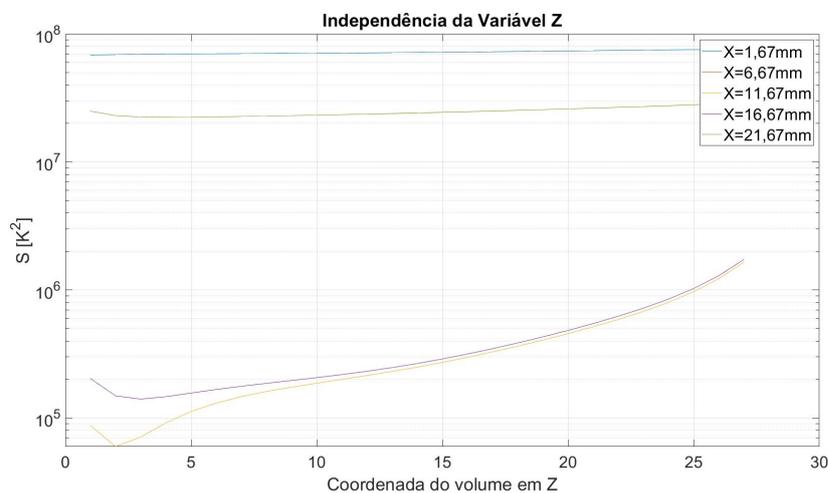
Para averiguar a independência das variáveis, foi realizado o mesmo teste da busca pelos mínimos locais, mas desta vez a variação dos parâmetros não ocorreu de forma isolada. No primeiro teste, foi realizada a variação de valor de 1,67 mm até 48,34 mm em Y, tendo sido variado em conjunto o valor da variável X, de 1,67 mm a 46,67 mm, foi mantido o valor de Z fixo.

Figura 45 – Independência da variável Y.



Na figura 45 está em escala logarítmica para melhor visualização. Nele é possível verificar que o valor mínimo para cada curva se localiza no mesmo ponto com Y no volume dezesseis. Para o segundo teste, foi feita uma variação de valor no parâmetro de entrada Z de 1,67 mm até 48,34 mm e em X de 1,67 mm a 46,67 mm, a variável Y foi mantida constante durante todo o teste.

Figura 46 – Independência da variável Z.



Na figura 46, podemos ver que variável Z também apresenta a independência em relação a X, tendo visto que para cada valor de X, o valor mínimo apresenta o mesmo resultado na posição do volume em Z.

5.1.2.6 Localização do Defeito

Depois de ter obtido as melhores propriedades termofísicas do material, é possível obter a localização do defeito. A qual consiste em descobrir se existe um defeito e consequentemente sua posição. Para os resultados numéricos os ensaios foram realizados com as propriedades mostradas na tabela 14:

Tabela 14 – Resultados das propriedades obtidas

Propriedade	Valor
Condutividade térmica (k)	204 W/(mK)
Calor específico (c_p)	921,096 J/(kgK)
Massa específica (ρ)	2800 kg/(m ³)
Coefficiente de convecção (h)	9 W/(m ² K)
Emissividade (ϵ)	0,95

O bloco possui uma geometria cúbica de aresta com medida de 0,05 m e foi dividido em 30 x 30 x 30 volumes iguais, ficando cada um com medidas de 1,6 mm x 1,6 mm x 1,6 mm. O defeito gerado, e o qual deve ser localizado pelo modelo, tem dimensões de 13,34 mm x 13,34 mm x 1,67 mm e se encontra no centro do bloco para as coordenadas x e y, para a profundidade o mesmo se encontra a 5 mm.

Para a função objetiva da otimização, a qual deve ser minimizada, é utilizada a seguinte equação 5.3:

$$S = \sum_{t=1}^{t=200} (T_p(x, y, t) - T_r(x, y, t))^2 \quad (5.3)$$

Sendo que T_p são os valores da temperatura de superfície para as condições testadas pela otimização e T_r os valores da temperatura de superfície do modelo gerado com um ruído branco detalhado a seguir.

A procura é feita através de volumes inteiro, como consequência a precisão da busca é limitada pelo tamanho dos volumes, o defeito tem tamanho fixo de 8 x 8 x 1 volumes. A busca é realizada através das coordenadas cartesianas, sendo variada nos eixos x, y e z. Foram realizados seis testes alterando a profundidade do defeito e a intensidade do ruído aplicado. Para os primeiros todos testes o tempo total de ensaio utilizado foi de 200 segundos.

O primeiro teste numérico a ser realizado é na profundidade de 5 mm e com ± 1 K de ruído em todos os volumes da superfície, na tabela 15 é possível verificar os melhores resultados.

Tabela 15 – Resultados da otimização para defeito com profundidade de 5 mm e com ruído de 1 K

	Valor Real	Otimização 1
X	20 mm: 31,67 mm	20 mm: 31,67 mm
Y	20 mm: 31,67 mm	20 mm: 31,67 mm
Z	5 mm: 6,67 mm	5 mm: 6,67 mm
Função Objetivo	59828.2961	59828.2961

O valor da função objetivo e o resultado da otimização assumem o mesmo valor. E que para todas as coordenadas os valores encontrados para a posição do defeito coincidem com o valor real, ficando então sem erro na localização. Através dessa análise é possível concluir que para um ruído de 1 K na temperatura de superfície o defeito consegue ser localizado sem erro.

O segundo teste foi realizada a mesma profundidade do primeiro alterando o ruído gerado na temperatura de superfície para ± 4 K em todos os volumes. Realizando o ensaio com dimensões, propriedades termofísicas e parâmetros de otimização iguais, foi obtido o seguinte resultado:

Tabela 16 – Resultados da otimização para defeito com profundidade de 5 mm e com ruído de 4 K

	Valor Real	Otimização
X	20 mm: 31,67 mm	20 mm: 31,67 mm
Y	20 mm: 31,67 mm	20 mm: 31,67 mm
Z	5 mm: 6,67 mm	5 mm: 6,67 mm
Função Objetivo	960532,6213	960532,6213

Na tabela 16, observa-se que para todas as coordenadas os valores encontrados foram idênticos ao da posição real. Dessa forma é possível afirmar que para um defeito com essas especificações e a essa profundidade o erro encontrado para realizar sua localização é nulo.

Para o terceiro e quarto teste a profundidade do defeito foi alterada para 25 mm, o ruído foi mantido de ± 1 K para o terceiro e de ± 4 K para o quarto. As dimensões, propriedades termofísicas foram mantidas iguais.

É visto na tabela 17 que para essa profundidade e nível de ruído os valores encontrados são idênticos aos valores reais, obtendo o mesmo valor da função objetivo. Na tabela 18 é possível ver os resultados para o quarto teste. O qual também obteve um resultado sem erros na localização do defeito.

Tabela 17 – Resultados da otimização para defeito com profundidade de 25 mm e com ruído de 1 K

	Valor Real	Otimização
X	20 mm: 31,67 mm	20 mm: 31,67 mm
Y	20 mm: 31,67 mm	20 mm: 31,67 mm
Z	25 mm: 26,67 mm	25 mm: 26,67 mm
Função Objetiva	60322,8517	60322,8517

Tabela 18 – Resultados da otimização para defeito com profundidade de 25 mm e com ruído de 4 K

	Valor Real	Otimização
X	20 mm: 31,67 mm	20 mm: 31,67 mm
Y	20 mm: 31,67 mm	20 mm: 31,67 mm
Z	25 mm: 26,67 mm	25 mm: 26,67 mm
Função Objetivo	961736,0264	961736,0264

Nesses testes a profundidade do defeito foi de 33,34 mm, as dimensões e propriedades termofísicas do material foram mantidas iguais aos dos testes passados.

Tabela 19 – Resultados da otimização para defeito com profundidade de 33,34 mm e com ruído de 1 K

	Valor Real	Otimização
X	20 mm: 31,67 mm	20 mm: 31,67 mm
Y	20 mm: 31,67 mm	20 mm: 31,67 mm
Z	33,34 mm: 35 mm	33,34 mm: 35 mm
Função Objetivo	419655,3163	419655,3163

Na tabela 19, é possível ver o resultado do teste cinco o qual foi aplicado um ruído de ± 1 K na temperatura de superfície. É possível verificar que o programa conseguiu localizar o defeito sem erros nas coordenadas igualmente os outros quatro testes. Para o teste 6 o ruído aplicado foi de ± 4 K para toda a temperatura de superfície. A tabela 20 apresenta o resultado obtido pelo teste 6, mostrando que igualmente aos outros testes, a localização do defeito ocorreu sem erros nas coordenadas.

Tabela 20 – Resultados da otimização para defeito com profundidade de 33,34 mm e com ruído de 4 K

	Valor Real	Otimização
X	20 mm: 31,67 mm	20 mm: 31,67 mm
Y	20 mm: 31,67 mm	20 mm: 31,67 mm
Z	33,34 mm: 35 mm	33,34 mm: 35 mm
Função Objetivo	7681072,1442	7681072,1442

5.1.2.7 Influência do Tempo na Localização do Defeito

Para verificar a influência do tempo na detecção e localização do defeito foram realizados alguns testes alterando seu valor, para podermos verificar importância. Para todos os testes as propriedades térmicas foram mantidas as mesmas da tabela 14, o tamanho do bloco e do defeito foram mantidos iguais aos outros testes com valores respectivos de 50 mm x 50 mm x 50 mm e de 13,34 mm x 13,34 mm x 1,67 mm.

Para a profundidade de 5 mm foram realizados quatro ensaios, alterando o valor do tempo para 200 segundos, 400 segundos, 544 segundos e 600 segundos. Esses valores foram escolhido através da tabela 10, a qual diz que para esta profundidade o tempo ideal para detecção do defeito seria de 544 segundos, por isso os testes foram realizados com valores próximos a este. Na tabela 21, observa-se que para todos os testes realizados o valor encontrado foi o mesmo, mostrando que para esta profundidade os testes podem ser realizados com 200 segundos, diminuindo o tempo computacional para esta busca.

Tabela 21 – Resultados para 5 mm variando o tempo.

	Tempo = 200 s	Tempo = 400 s	Tempo = 544 s	Tempo = 600 s
X	20 mm: 31,67 mm			
Y	20 mm: 31,67 mm			
Z	5 mm: 6,67 mm			
S	59984,2907	120047,8369	166184,9646	180141,9778

Para a profundidade de 33,34 mm foram realizados também quatro ensaios, com os tempos de 200 segundos, 600 segundos, 800 segundos e 1600 segundos. Na tabela 22, é visto que para os tempos de 200, 600, 800 e 1600 segundos os valores foram encontrados sem nenhum erro, por isso é possível afirmar que para essa profundidade o algoritmo consegue localizar o defeito.

Tabela 22 – Resultados para 33,34 mm variando o tempo.

	Tempo = 200 s	Tempo = 600 s	Tempo = 800 s	Tempo = 1600 s
X	20 mm: 31,67 mm			
Y	20 mm: 31,67 mm			
Z	33,34 mm: 35 mm			
S	60067,9431	180318,2499	240171,7297	19655,3163

5.2 Resultados Experimentais

Para o ensaio experimental, a amostra utilizada é um bloco de alumínio com dimensões 50 mm x 50 mm x 50 mm. Como visto na seção 5.1.2.1, a temperatura inicial em que o bloco se encontra afeta a detectabilidade do defeito. Levando em consideração,

todos os ensaios realizados nesta secção utilizam a temperatura inicial de aproximadamente 500 K.

5.2.1 Identificação de Parâmetros

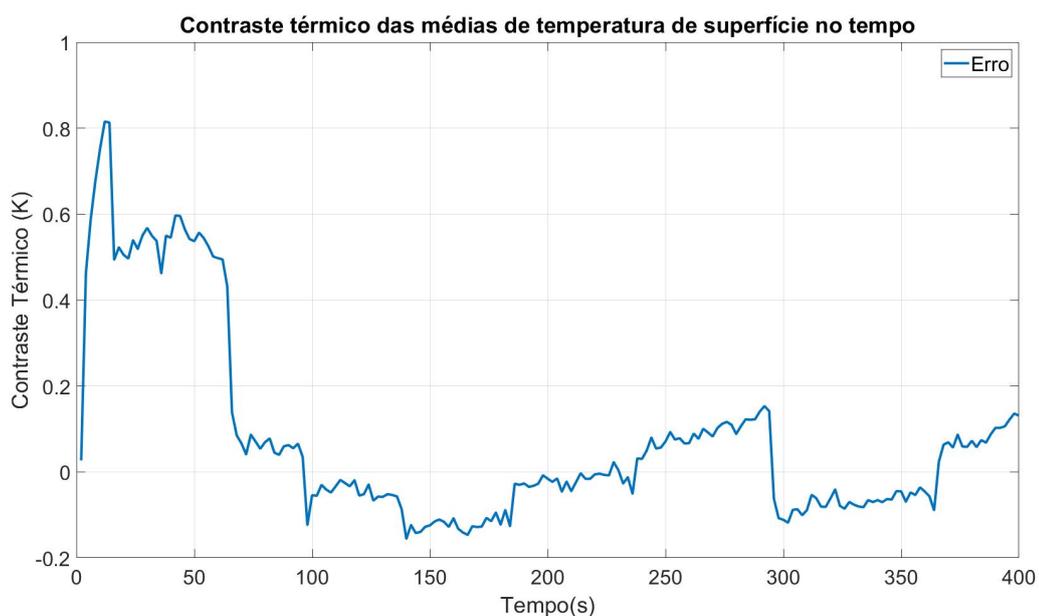
O primeiro passo a ser realizado para a detecção do defeito na amostra, é a identificação dos valores das propriedades termofísicas do material escolhido. Para isso é utilizado o mesmo método mostrado na secção 5.1.1.

Os parâmetros de entrada no código de otimização são a condutividade térmica, o calor específico, a massa específica, o coeficiente de transferência térmica e a emissividade. A otimização ocorre através da minimização da equação 5.3, e os parâmetros da otimização são cinquenta indivíduos com sessenta gerações. A precisão do modelo numérico adotado é de 10^{-4} e o ensaio prático tem a duração de 400 segundos. Os resultados da otimização estão apresentados na tabela 23:

Tabela 23 – Resultados das propriedades obtidas

Propriedade	Valor
Condutividade térmica(k)	157,1541 W/mK
Calor específico(C_p)	705,6145 J/kgK
Massa específica(ρ)	2300,1257 kg/m^3
Coeficiente de transferência térmica(h)	13,4840 $W/(m^2K)$
Emissividade(ϵ)	0,9348

Figura 47 – Contraste térmico entre as médias das temperaturas de superfície.

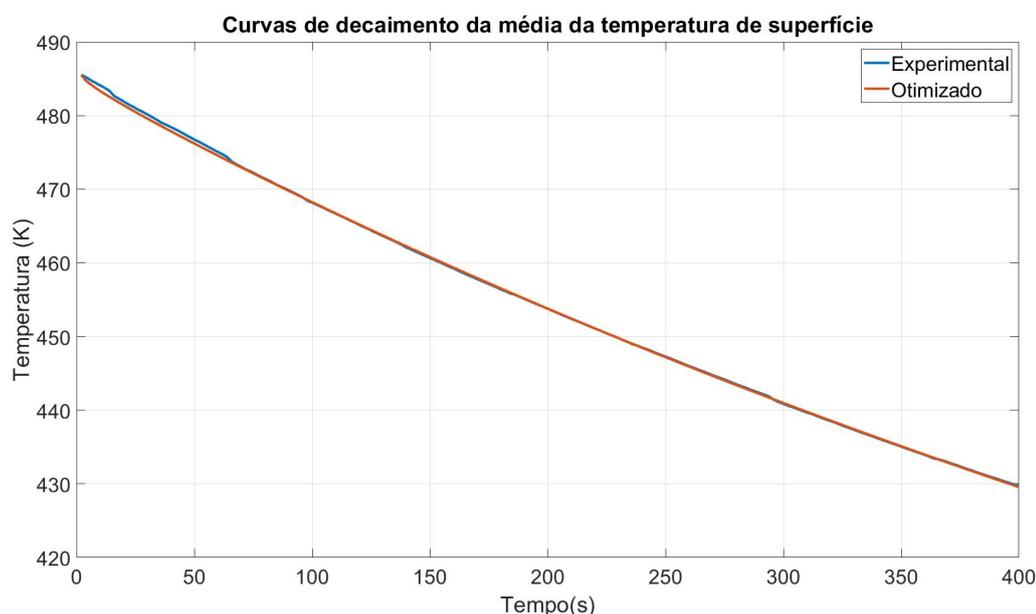


O valor da função objetiva minimizada foi de $1.3134 * 10^5$, o qual possui um valor menor se comparado com o obtido na secção 5.1.1 para uma temperatura de superfície com ruído de 4K , pode-se então concluir que o ensaio prático teve um ruído inferior a 4K.

Fazendo então o contraste térmico entre as médias das temperaturas de superfície no tempo do modelo matemático, com os valores das propriedades encontradas, e do ensaio prático obtido através da câmara infravermelha, obtemos a figura 47.

Na figura 47 vemos que o maior valor que o contraste térmico atingiu foi de aproximadamente 0,8 K, no tempo de 10 segundos.

Figura 48 – Curvas de decaimento da média da temperatura de superfície.



A identificação das propriedades térmicas foram realizadas em um bloco sem defeito. Após o valor encontrado ter sido validado, é realizado agora outro ensaio mas em um material com o defeito interno já produzido, para que possa ser feita a identificação da existência do mesmo e sua localidade, essa busca é melhor explicada na secção 5.2.2.

O coeficiente de transferência térmica encontrado foi constante para todo o domínio no tempo, para uma melhor abordagem seria necessário que o valor encontrado fosse em função do tempo. Mas para identificar o valor o código de otimização deve ser executado uma vez para cada instante de tempo, levando em consideração que o código numérico leva em torno de dois dias para encerrar o processamento, o tempo computacional exigido tornaria impraticável esta busca.

Na figura 48, podemos ver a comparação das curvas de decaimento da média das temperaturas de superfície do ensaio experimental e do modelo proposto com as propriedades otimizadas. O modelo proposto consegue se aproxima da curva experimental

pois considera as trocas por radiação. Tendo em vista que o modelo utiliza um coeficiente de transferência por convecção fixo e uma emissividade fixa na superfície, durante a identificação das propriedades o modelo acaba fazendo uma compensação no coeficiente de transferência por convecção e na emissividade para melhor se adequar a curva do ensaio experimental.

5.2.2 Detecção de Defeitos

Nesta secção é realizado o mesmo procedimento realizado para a detecção de defeitos numérico mostrada na secção 5.1.2.7. Após ter sido obtido os valores das propriedades térmicas no bloco sem defeito, pode-se utilizar estes valores para identificar se o bloco em estudo irá conter algum tipo de defeito interno e localizar a posição em que o mesmo se encontra.

As propriedades térmicas utilizadas para este teste estão apresentadas na tabela 24. A temperatura ambiente foi de 290,5 K e a temperatura inicial da peça foi de 453,45 K.

Tabela 24 – Propriedades térmicas utilizadas para o ensaio da detecção do defeito

Propriedade	Valor
Condutividade térmica(k)	157,1541 W/mK
Calor específico(C_p)	705,6145 J/kgK
Massa específica(ρ)	2300,1257 kg/m^3
Coefficiente de transferência térmica(h)	13,4840 $W/(m^2K)$
Emissividade(ϵ)	0,9348

As dimensões do bloco de alumínio e do defeito, são as mesmas apresentadas nas amostras de alumínio. Para identificar a existência do defeito foi desenvolvido o seguinte método, primeiramente é realizado um modelo sem defeito. Ao utilizar a equação 5.3 para comparar com o resultado do código de otimização, e obtendo um melhor resultado sabemos que o bloco em estudo não tem defeito. Mas se o valor minimizado da otimização for melhor, significa que o bloco apresenta defeito e que é possível descobrir sua localização. Através do código de otimização foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 25 – Resultados da localização do defeito

	Valor Real	Otimização
X	20 mm : 31,67 mm	20 mm : 31,67 mm
Y	20 mm : 31,67 mm	20 mm : 31,67 mm
Z	5 mm : 6,67 mm	5 mm : 6,67 mm
Função Objetiva	–	1014062.6528

É visto que este resultado se assemelha com o resultado numérico para esta localização com ruído de $\pm 4K$, sem erro em nenhuma das coordenadas. Podemos afirmar que este para este ensaio o ruído foi de $\pm 4K$, pois o valor da função objetiva se aproxima

da numérica. Os resultados do ensaio prático foram iguais aos apresentados no modelo numérico. Visto que para o defeito confeccionado no material de alumínio, o modelo conseguiu localizar a sua posição sem erro em nenhuma das coordenadas.

6 Conclusões

Através dos resultados obtidos neste trabalho, é possível validar o modelo proposto para a identificação de propriedades termofísicas dos materiais metálicos e também para a identificação e localização de um defeito interno.

Primeiramente foram discutidos os fundamentos essenciais para o entendimento da termografia infravermelha. Também foram apresentados os conceitos básicos para um ensaio não-destrutivo. Com esses conhecimentos foi desenvolvido um código numérico para simular o resfriamento da temperatura em um bloco de alumínio.

Após ser feita a validação do modelo apresentado através das comparações com os resultados experimentais e com a solução analítica. É possível afirmar que este modelo representa adequadamente o modelo físico ocorridos durante um ensaio por TIR.

Vendo que o modelo proposto foi validado, é possível reduzir custos de implementações e tempo em próximas pesquisas com o uso da ferramenta desenvolvida.

A formulação proposta neste trabalho se encontra flexível a qualquer tipo de material, qualquer dimensões para o bloco e para o volume elementar. Também fica aberto ao usuário as configurações para a otimização da função objetiva, podendo alterar o número de indivíduos, gerações e a repetibilidade do experimento.

De acordo com a análise da detectabilidade do defeito de acordo com sua profundidade, é possível concluir que sua sensibilidade na temperatura de superfície aumenta quanto mais próximo da superfície o mesmo se encontra. Um artigo detalhando mais essa análise foi submetido ao congresso ENCIT 2018, artigo de código ENCIT2018-0095.

Foi visto que a temperatura inicial do bloco estudado, tem impacto sobre a detectabilidade do defeito. Visto que níveis mais altos de temperatura inicial, facilitam a detecção do defeito.

Entre as propriedades termofísicas do defeito, foi visto que a condutividade térmica (k) apresenta maior sensibilidade à temperatura de superfície e que o calor específico (c_p) e a massa específica (ρ) apresentaram valores praticamente desprezáveis. Com isso é possível se afirmar que a condutividade térmica é a propriedade do defeito que mais deve ser levada em consideração em um ensaio por TIR.

Nos resultados numéricos foi visto que a identificação de propriedades obteve ótimos resultados com ruídos de 1 K e 4 K, podendo afirmar que as propriedades termofísicas do material são identificadas com precisão com este nível de ruído.

A identificação das propriedades no ensaio prático também obtiveram excelentes

resultados, identificando as melhores propriedades que se adequavam aquele ensaio. E obtendo um valor de função objetivo de $1.3134 * 10^5$, foi visto que este valor se enquadra em um nível de ruído menor que 4 K. Podendo então afirmar que as propriedades encontradas estão de acordo com as reais.

A busca de defeitos nos ensaios numéricos obtiveram resultados excelentes, mostrando que os mesmos podem ser identificados com até 4 K de ruído sobre a temperatura de superfície na imagem térmica.

A identificação dos defeitos no ensaio experimental também obteve resultados ótimos, conseguindo realizar a localização do defeito sem erro nas coordenadas cartesianas.

Durante a identificação dos defeitos, era necessário ter suas dimensões para poder identificar sua posição. Isto é devido ao tempo computacional que o código de otimização precisa para identificar junto com sua posição a suas dimensões.

Durante a realização dos ensaios foi visto que a não uniformidade de aquecimento do material estudado gerava imagens térmicas não confiáveis. Para resolver este problema foi aumentado o tempo em que a peça ficava em aquecimento. Garantindo que a peça por completa atingisse a mesma temperatura.

Um dos grandes problemas encontrados na realização deste trabalho foi o tempo computacional na geração dos resultados obtidos. Em primeira instância o modelo matemático foi desenvolvido em MATLAB, com um custo de cinco horas para realização de um ensaio. Visto que o mesmo deveria ser executado diversas vezes durante a otimização o que resultaria em um tempo inviável de execução. Foi então feito uma substituição da linguagem utilizada, passando a usar o Fortran 90. Com isso esse custo passou a ser de trinta minutos. Mas mesmo com essa redução o tempo computacional que o código de otimização precisava para executar um experimento de identificação de propriedades com trinta gerações era de aproximadamente 72 horas.

Neste trabalho analisou-se somente a localização e identificação de um defeito interno (não há presença de vários defeitos). É possível identificar números maiores de defeitos internos com o modelo proposto, mas para cada defeito adicionado o número de parâmetros de entrada no código de otimização aumenta, acarretando no aumento significativo no tempo computacional.

O tamanho do defeito interno também é uma questão a ser abordada, neste trabalho o tamanho do defeito foi mantido constante. O modelo também consegue realizar a identificação do tamanho do defeito, mas também acarretara no aumento do tempo computacional. Com o aumento do tamanho do defeito interno, é necessário fazer modificações no código apresentado para levar em consideração as trocas de calor por convecção natural na parte interna do defeito.

Um problema encontrado para a localização do defeito, é que o modelo proposto

não consegue detectar defeitos próximos a superfície oposta da qual está sendo analisada. O bloco de alumínio possui 50 mm de profundidade, a busca por defeitos somente conseguiu identificar os defeitos a uma profundidade de 33,34 mm, com um tempo computacional viável. Para resolver este problema, pode ser utilizada uma segunda câmera térmica na superfície oposta, ou realizando dois ensaios com somente uma câmera, medindo a cada ensaio uma superfície.

6.1 Sugestões para Pesquisas Futuras

- Para um futuro trabalho proponho de realizar novamente a identificação da localização do defeito, mas desta vez identificando também suas dimensões. Para isso deverá ser realizada uma pesquisa variando os parâmetros da otimização, aumentando o número de indivíduos e as gerações, para ver se é viável essa identificação de acordo com o tempo computacional.
- Durante este trabalho o coeficiente de convecção foi considerado constante durante todo o ensaio. Proponho o desenvolvimento de um método de identificação que consiga obter uma função deste coeficiente ao longo do tempo.
- Realizar uma identificação da emissividade da superfície para cada volume elementar, considerando que a mesma não seja constante em toda face.
- Estudar alternativas para reduzir o tempo computacional do modelo matemático proposto.

Referências

- ALEXEY, Izmailov; MIKHAIL, Solodov. *Newton-type methods for optimization and variational problems*. Springer s. New York: [s.n.], 2014. Citado na página 40.
- ALLPORT, J J; MCHUGH, S L. *Quantitative evaluation of transient video thermography*. [S.l.: s.n.], 1988. v. 7. 253–262 p. Citado na página 26.
- ARAUJO, Rodrigo L. *Evolução Diferencial para Problemas de Otimização com Restrições Lineares*. 82 p. Tese (Doutorado), 2016. Citado na página 41.
- ÁVILA, Sérgio Luciano. *Otimização multiobjetivo e análise de sensibilidade para concepção de dispositivos*. Tese (Doutorado), 2006. Citado na página 40.
- BALAGEAS, Daniel. *Termografía Infrarroja : una técnica multifacética para la Evaluación No Destructiva (END)*. [S.l.: s.n.], 2007. Citado na página 25.
- ÇENGEL, Yunus. *Heat Transfer: A Practical Approach*. 2nd. ed. [S.l.]: Mcgraw-Hill (Tx); 2nd edition (November 1, 2002), 2002. 896 p. ISBN 9780072458930. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9 e 10.
- Eberhart, Russell, James Kennedy. A new optimizer using particle swarm theory. 1995. Citado na página 41.
- HOLLAND, J. H. Genetic algorithms and the optimal allocation of trials. 1973. Citado na página 41.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems*. [S.l.: s.n.], 1975. Citado na página 41.
- HOLST, Gerald C. *Common Sense Approach to Thermal Imaging*. [S.l.]: SPIE Publications; 1 edition (September 30, 2000), 2000. 370 p. ISBN 978-0819437228. Citado na página 4.
- HUNG, Y. Y.; CHEN, Y. S.; NG, S. P.; LIU, L.; HUANG, Y. H.; LUK, B. L.; IP, R. W.L.; WU, C. M.L.; CHUNG, P. S. Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation. *Materials Science and Engineering R: Reports*, v. 64, n. 5-6, p. 73–112, 2009. ISSN 0927796X. Citado na página 1.
- IBARRA-CASTANEDO, C. Quantative subsurface defect evaluation by Pulsed Phase Thermography. p. 188, 2005. Citado 7 vezes nas páginas 7, 16, 20, 21, 22, 23 e 27.
- IBARRA-CASTANEDO, Clemente; PIAU, Jean Marc; GUILBERT, Stephane; AVDELIDIS, Nicolas; GENEST, Marc; BENDADA, Abdelhakim; MALDAGUE, Xavier P.V. Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures. *Research in Nondestructive Evaluation*, v. 20, n. 1, p. 1–31, 2009. ISSN 09349847. Citado na página 19.
- IBARRA-CASTANEDO, Clemente; TARPANI, José Ricardo; MALDAGUE, Xavier P.V. Nondestructive testing with thermography. *European Journal of Physics*, v. 34, n. 6, 2013. ISSN 01430807. Citado 6 vezes nas páginas 14, 16, 17, 18, 19 e 20.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 4th. ed. [S.l.]: Wiley; 4th edition (January 15, 1996), 1996. 886 p. ISBN 978-0471304609. Citado 6 vezes nas páginas 5, 6, 7, 8, 9 e 37.

Kafi Mallak, Shadi; ELFGHI, Fawzi; RAJAGOPAL, Premkumar; VAEZZADEH, Vahab; FALLAH, Marziye. *Overview of Waste Management Performance of Industrial Sectors by Selected Asian Countries: Current Practices and Issues*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 28.

KALDIRIM, Elif. Application Of A Multi-Objective Genetic Algorithm To The Modified Diet Problem. p. 10–13, 2006. Citado na página 28.

KALTMANN, Deena. Quantitative Line-Scan Thermographic Evaluation of Composite Structures. 2008. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

KIRALY, Annamaria; PAHOR, Bojan; ČUČEK, Lidija; KRAVANJA, Zdravko. *Dynamic Multi-Objective Synthesis of Companies' Renewable Biomass and Energy Supply-Networks*. [S.l.: s.n.], 2013. v. 35. 73–78 p. Citado na página 28.

KIRGAT, GS; SURDE, AN. Review of Hooke and Jeeves Direct Search Solution Method Analysis Applicable To Mechanical Design Engineering Introduction :. v. 1, n. 2, p. 1–14, 2014. Citado na página 46.

MALDAGUE, Xavier. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc., United States, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 15.

MALISKA, Clovis R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. [S.l.: s.n.], 1995. 483 p. Citado 4 vezes nas páginas 7, 29, 30 e 34.

NOCEDAL, Jorge; WRIGHT, Stephen J; ROBINSON, Stephen M. *Numerical Optimization*. [S.l.: s.n.]. ISBN 0387987932. Citado na página 46.

OCH, Stephan H. Otimização do processo de admissão em motores de combustão interna monocilíndricos. 2014. Citado 6 vezes nas páginas 7, 40, 41, 43, 44 e 45.

OLIVEIRA, Rilavia Almeida; SILVA, Ana Paula Bispo. William Herschel, os raios invisíveis e as primeiras ideias sobre radiação infravermelha. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 4, p. 01–11, 2014. ISSN 1806-1117. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172014000400022&lng=pt&nrm>. Citado na página 4.

PIRSIG, Robert M. *Zen and the Art of Motorcycle Maintenance: An Inquiry Into Values*. [S.l.: s.n.], 1974. ISBN 978-0060589462. Citado na página 28.

PRICE, K. V. An introduction to differential evolution. *New Ideas in Optimization*. 1999. Citado na página 43.

RODRÍGUEZ, Fernando de Jesús López. *Detecção De Defeitos Em Materiais Cerâmicos Usando Termografia*. 122 p. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2010. Citado 9 vezes nas páginas 7, 4, 6, 14, 21, 23, 24, 25 e 26.

RODRÍGUEZ, Fernando de Jesús López. Detecção e Caracterização de Defeitos Internos por Termografia Infravermelha Pulsada. p. 206, 2014. Citado na página 1.

- S. Bazaraa, Mokhtar; SHERALI, Hanif; M. Shetty, C. *Nonlinear programming. Theory and algorithms. 2. ed.* [S.l.: s.n.], 1979. ISBN 978-0-471-55793-7. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 47.
- SIEGEL, Robert; HOWELL, John. *Thermal Radiation Heat Transfer*. 4th. ed. New York: [s.n.], 2016. Citado 7 vezes nas páginas 10, 6, 7, 8, 11, 12 e 13.
- SOUZA, Gustavo Rodrigues de. *ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DO SISTEMA DE ADMISSÃO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA*. Tese (Doutorado), 2010. Citado na página 28.
- SUBRAMANIAN, Kannan; SUBRAMANIAN, Baskar; MCCALLEY, James; MURUGAN, P. *Application of NSGA-II Algorithm to Generation Expansion Planning*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 24. 454–461 p. Citado na página 28.
- VERRATTI, Attílio Bruno. *ermografia Princípios e Aplicações*. In: . [S.l.: s.n.], 1992. Citado na página 4.
- YAGOUBI, Mouadh. *Optimisation évolutionnaire multi-objectif parallèle : application à la combustion Diesel*. 2012. Citado na página 44.
- YANG, I-Tung; CHOU, Jui-Sheng. *Multiobjective optimization for manpower assignment in consulting engineering firms*. [S.l.: s.n.], 2011. 1183–1190 p. Citado na página 28.
- ZENZINGER, G.; BAMBERG, J.; SATZGER, W.; CARL, V. Thermographic crack detection by eddy current excitation. *Nondestructive Testing and Evaluation*, v. 22, n. 2-3, p. 101–111, 2007. ISSN 10589759. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 21.