



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

NÚCLEO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA

**APLICAÇÃO DE FONTE TÉRMICA POR EFEITO JOULE NA TERMOGRAFIA
ATIVA PULSADA PARA IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS EM PROVAS DE
POLIPROPILENO**

MAYARA CORDEIRO FRANÇA

São Cristóvão - Sergipe, Brasil

Setembro de 2024



**APLICAÇÃO DE FONTE TÉRMICA POR EFEITO JOULE NA TERMOGRAFIA
ATIVA PULSADA PARA IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS EM PROVAS DE
POLIPROPILENO**

MAYARA CORDEIRO FRANÇA

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de
Pós-graduação em Engenharia Elétrica – PROEE, da
Universidade Federal de Sergipe, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do título de Mestre
em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof.Dr. Douglas Bressan Riffel

São Cristóvão - Sergipe, Brasil

Setembro de 2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PROEE

TERMO DE APROVAÇÃO

**“APLICAÇÃO DE FONTE TÉRMICA POR EFEITO JOULE NA TERMOGRAFIA ATIVA
PULSADA PARA IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS EM PROVAS DE POLIPROPILENO”**

Discente:

Mayara Cordeiro França

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia elétrica da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada pela banca examinadora composta por:

Documento assinado digitalmente
 **TARSO VILELA FERREIRA**
Data: 06/09/2024 14:05:23-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>
Prof. Dr. Tarso Vilela Ferreira (PROEE/UFS)
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ ANTONIO PIMENTEL CAVALCANTI**
Data: 06/09/2024 19:47:31-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>
Prof. Dr. Luiz Antônio Pimentel Cavalcanti (IFBA)
Examinador Externo

Documento assinado digitalmente
 **JOSE AGUIAR DOS SANTOS JUNIOR**
Data: 06/09/2024 15:08:34-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>
Prof. Dr. José Aguiar dos Santos Junior (DMEC/UFS)
Examinador Externo

Documento assinado digitalmente
 **MAYARA CORDEIRO FRANÇA**
Data: 14/09/2024 12:13:25-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Mayara Cordeiro França
Discente

Sala de Videoconferência do PROEE/UFS
Av. Marechal Rondon, S/N - Jardim Rosa Elze - Tel. (79)3194-6336
Cidade universitária “Profº José Aloísio de Campos”, 06 de Setembro de 2024
CEP: 49100-000 - São Cristóvão - Sergipe - Brasil - E-mail: proee@ufs.br

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

F815a França, Mayara Cordeiro
Aplicação de fonte térmica por efeito joule na termografia ativa
pulsada para identificação de defeitos em provas de polipropileno /
Mayara Cordeiro França ; orientador Douglas Bressan Riffel. - São
Cristóvão, 2024.
87 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade
Federal de Sergipe, 2024.

1. Radiação infravermelha. 2. Calor - Condução. 3. Calor –
Convecção natural. 4. Calor – Radiação e absorção. 5.
Processamento de imagens – Técnicas digitais. I. Riffel, Douglas
Bressan orient. II. Título.

CDU 621.3

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Nossa Senhora Aparecida que é minha guia nessa terra, e aos seres divinos que me concederam aqui habitar. Ao Mestre Raimundo Irineu Serra que recebeu o Santo Daime e me ensinou tanto sobre disciplina. Aos meus Pais, Elza Cordeiro Bezerra e Francisco Alves de França que me deram a luz e todo o suporte necessário para chegar até aqui.

Ao meu irmão João Paulo Cordeiro França que é o meu melhor amigo, irmão e companheiro das melhores aventuras. A minha companheira Maria Jadna Carolaine Miranda pela imensa satisfação de poder compartilhar minha vida com ela e por toda a motivação e compreensão para seguir nessa jornada. À minha tia Edna e suas filhas, Jéssica e Larissa, por todas as trocas compartilhadas.

Aos meus avôs maternos: Luiza Cordeiro Bezerra e Antônio Bezerra Filho que são como Mãe e Pai na minha vida e sempre desempenharam um alicerce incrível para mim, minha mãe e meu irmão. E aos meus avôs paternos: Maria de Jesus Lima França e Vicente José de França (*In memoriam*) que foram de certa forma também Mãe e Pai na minha vida. Em especial ao meu avô que sempre me ensinou tanto sobre engenharia de maneira empírica, ao desbravar a roça e mostrar todo o seu sistema de irrigação por gravidade.

Ao professor Douglas Bressan Riffel que é um exímio professor e me recebeu super bem no grupo de estudo do LABENGE. Aos colegas do Mestrado: Wellington, Thiago e aos Ézios (Moura e Carvalho) por todo o suporte, afinal de contas se consigo ver mais longe é porque estou apoiada no ombro de gigantes. Em especial a Leonel por todas as idas ao laboratório e o árduo trabalho experimental desenvolvido, sempre pronto para ajudar e desenvolver as melhores soluções.

Por fim, concluo meus agradecimentos, feliz por todos os saberes compartilhados, conhecimentos aplicados e ideias desenvolvidas. Reconheço a oportunidade de ter cursado esta pós-graduação *stricto sensu*, à rede Federal de ensino superior, à Universidade Federal de Sergipe (UFS), aos docentes, aos técnicos administrativos e todos os funcionários que fazem a UFS existir e resistir. O meu muito obrigada!

“O importante é não parar de questionar. A curiosidade tem sua própria razão para existir. Não se pode deixar de ficar maravilhado ao contemplar os mistérios da eternidade, da vida, da realidade. Basta que se tente meramente compreender um pouco desse mistério a cada dia e jamais perder a sagrada curiosidade”,

Albert Einstein

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	17
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	18
3.2 CORPO NEGRO	20
3.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR	22
3.3.1 CONDUÇÃO	22
3.3.2 CONVECÇÃO	25
3.3.3 RADIAÇÃO	25
3.4 EMISSIVIDADE	26
3.5 CONTRASTE TÉRMICO	27
3.6 LEI DO RESFRIAMENTO DE NEWTON	28
3.7 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	29
3.7.1 TERMOGRAFIA ATIVA PULSADA	31
3.8 POLIPROPILENO	38
3.9 PROCESSAMENTO DA IMAGEM DIGITAL	39
3.9.1 AQUISIÇÃO	40
3.9.2 ARMAZENAMENTO	41
3.9.2 PROCESSAMENTO	41
3.9.4 EXIBIÇÃO	42
3.9.5 HISTOGRAMA	44
3.9.6 SEGMENTAÇÃO E LIMIAÇÃO	45
3.9.7 DETECÇÃO DE BORDAS	45
4. ESTADO DA ARTE	46
5. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO EXPERIMENTAL	48
5.1 AMOSTRAS	48
5.2 CÂMERA TERMOGRÁFICA	51
5.3 CÂMARA ESCURA	53
5.4 FONTE TÉRMICA	54
5.5 CONTROLADOR TC4S	57
5.6 MÉTODOS	59
5.7 PROCESSAMENTO DE IMAGEM TERMOGRÁFICA	61
5.7.1 NORMALIZAÇÃO DA MATRIZ TEMPERATURA	63
6. RESULTADOS E AVALIAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO	64
6.1 PRÉ-PROCESSAMENTO	64
6.1.1 RESPOSTA BIDIMENSIONAL DOS TERMOGRAMAS	65
6.1.2 PERÍODO DO PULSO TÉRMICO	67
6.2 PÓS-PROCESSAMENTO	68

6.2.1 BORDAS.....	69
6.2.2 CONTRASTE TÉRMICO MÁXIMO.....	70
6.3 APLICAÇÃO DO CONTRASTE TÉRMICO PADRÃO	71
6.4 DETERMINANDO O TAMANHO RELATIVO DO PIXEL.....	72
6.5 COMPRESSÃO UTILIZANDO O MODELO DE RESFRIAMENTO.....	74
6.6 IMAGEM RESULTANTE.....	76
7. CONCLUSÃO.....	77
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANEXO A - DADOS DO COMPUTADORES UTILIZADOS

APÊNDICE A - FALHAS DURANTE O PROCESSO DE AQUISIÇÃO DOS DADOS

APÊNDICE B - CÁLCULO DA EFUSIVIDADE DO MATERIAL E DA FALHA

APÊNDICE C - CÁLCULO DO FATOR DE INCOMPATIBILIDADE TÉRMICA

APÊNDICE D - VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DA TÉCNICA EM DETECTAR DEFEITO SEGUNDO A RELAÇÃO ENTRE DIÂMETRO E PROFUNDIDADE

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Espectro eletromagnético (desenho sem escala).
- Figura 2: Potência da emissividade do corpo negro versus o comprimento de onda segundo a Lei de Planck.
- Figura 3: Cavidade ressonante que elucida o comportamento de um corpo negro ideal.
- Figura 4: Transferência térmica por condução.
- Figura 5: Emissividade de um corpo negro, cinza e de uma superfície real.
- Figura 6: Contraste térmico da temperatura normalizada.
- Figura 7: Uma boa escolha para testes não destrutivos depende dos seguintes parâmetros.
- Figura 8: Métodos de termografia ativa.
- Figura 9: Componentes do sistema de termografia ativa.
- Figura 10: Tipos de esquemas da termografia: modo de reflexão e transmissão.
- Figura 11: Pulso de aquecimento e produção de sinal de temperatura diferencial ΔT .
- Figura 12: Temperatura versus tempo de duração do procedimento experimental e simulação numérica. a) Reflexão; b) Transmissão.
- Figura 13: Sequência de termogramas.
- Figura 14: Forma genérica de um monômero.
- Figura 15: Monômero do polipropileno.
- Figura 16: Representação de imagem digital por matrizes no formato retangular a) 2D e b) 3D.
- Figura 17: Elementos de um sistema de processamento de imagem.
- Figura 18: Comportamento da fase de resfriamento de um pixel utilizando a função Curve Fitting.
- Figura 19: Modelo de imagem digital com paleta de cor Iron.
- Figura 20: Representação da imagem 2D como uma função em R^2 .
- Figura 21: Exemplo de histograma em imagem na escala de cinza.
- Figura 22: Geometria e falhas das configurações utilizados nos experimentos.
- Figura 23: Dimensão e profundidade das falhas nas amostras A1, A2, A3, A4, A5 e A6.
- Figura 24: Dimensões da amostra A1 e face de aquecimento.
- Figura 25: Estrutura de aquecimento.
- Figura 26: Câmera FLIR T420 utilizada no procedimento experimental.
- Figura 27: Estrutura dos dados. (a) Matriz 3D de temperatura no domínio do tempo e (b) curva de decaimento da temperatura de um pixel com/sem defeito em coordenadas (i,j)
- Figura 28: Câmara escura utilizada nos ensaios experimentais. a) Câmara escura; b) Configuração experimental
- Figura 29: Setup da fonte térmica.
- Figura 30 Diagrama de bloco da conexão.
- Figura 31: Termograma de aquecimento da fonte térmica. a) Formato da resistência do ferro; b) Curva de aquecimento com três pontos apresentados.
- Figura 32: Comportamento térmico da fonte no estágio estacionário. a) Distribuição térmica após o aquecimento; b) resposta térmica.
- Figura 33: Uniformidade térmica em 3D da fonte de calor.
- Figura 34: Fluxograma da metodologia empregada para os ensaios experimentais.
- Figura 35: Sequência padrão de processamento e análise digital de imagens.
- Figura 36: Caminho do processamento simplificado.
- Figura 37: Imagem térmica frame 1000 na paleta Rainbow do A2.
- Figura 38: Função mesh do MATLAB do frame 1000 da imagem térmica normalizada. a) Visualização em 3D do frame. b) Linhas de contorno
- Figura 39: Resposta térmica das amostras A1, A2 e A3.
- Figura 40: Resposta térmica das amostras A4, A5 e A6.
- Figura 41: Resultado do contraste entre pixel sadio e defeituoso com aquecimento de 60°C. a) 60s de aquecimento; b) 120s de aquecimento.
- Figura 42: Resultado do contraste entre pixel sadio e defeituoso com aquecimento de 60°C a 180s.
- Figura 43: Imagem da representação das bordas.

Figura 44: Curvas das temperaturas máximas (azul) e mínimas (vermelho).
Figura 45: Variação dos mínimos e máximos de temperatura e respectivos termogramas.
Figura 46: Resultados em 3D do contraste térmico. a) 4mm de profundidade; b) 6m de profundidade; c) 8mm de profundidade.
Figura 47: Modelo para cálculo do tamanho relativo do pixel da imagem.
Figura 48: Delimitação dos defeitos e cálculo da área.
Figura 49: Constante de fase de resfriamento 'd'. a) 2D; b) 3D
Figura 50: Pólo dominante aplicado aos ensaios do corpo de prova A6. a) 2D; b) 3D.
Figura 51: Fluxograma do algoritmo desenvolvido por (SILVA, 2020).
Figura 52: Resultado final atribuindo os indicadores em cada canal RGB.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Capacidade de visualização do defeito em função do diâmetro e da profundidade da falha.
Tabela 2: Especificações técnicas da câmera infravermelha (FLIR T420).
Tabela 3: Características do controlador de temperatura.
Tabela 4: Valores estabelecidos durante os ensaios.
Tabela 5: Dados dimensionais medidos.
Tabela 6: Resultados do tamanho relativo do pixel por falha.

LISTA DE SIGLAS

IEC - International Electrotechnical Commission
END - Ensaio não-destrutivo
EUA - Estados Unidos da América
3D – Tridimensional
2D – Bidimensional
TSR – Técnica de reconstrução de sinal
CVSL – Computer Vision and Systems Laboratory
CFRP – Carbon fiber-reinforced polymer
TI – Termografia infravermelha
SNR – Signal to noise ratio
IR – Infrared
BEM – Building energy model
Pixel – Picture element

LISTA DE SÍMBOLOS

E_b – intensidade monocromática da radiação do corpo negro
 h – é a constante de Planck ($6,6 \times 10^{-34}$ J.s)
 c – velocidade da luz ($\cong 3 \times 10^8$ m/s)
 λ – comprimento de onda (m)
 k_b – constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
 T – temperatura absoluta do corpo negro em Kelvin
 ε – Emissividade (W/m^2)
 σ – Constante de Stefan-Boltzmann
 k – condutividade térmica ($W/(m \cdot K)$)
 ΔQ – quantidade de calor transferido (J)
 L – espessura (m)
 Δt – tempo decorrido (s)
 A – área da superfície (m^2)
 ΔT – variação de temperatura (K)
 α – difusividade térmica (m^2/s)
 ρ – densidade (kg/m^3)
 C_p – calor específico ($J/(kg \cdot K)$)
 δ – coeficiente de transferência de calor (W/m^2)
 m – massa do material (kg)
 α' – absorção
 τ' – transmissão
 ρ' – reflexão
 E_λ – radiação emitida por um corpo real
 $E_{\lambda b}$ – radiação emitida por um corpo negro
 $Ca(t)$ – Contraste térmico absoluto
 $T_{def}(t)$ – Temperatura no ponto (área) considerado defeito
 $T_{ref}(t)$ – Temperatura no ponto (área) considerado de referência
 T_a – temperatura do ambiente
 T_0 – temperatura no instante ($t = t_0$)
 τ – constante de tempo
 T_{xy} – um pixel da imagem 2D
 $T_{xy}(t)$ – mostra o comportamento desse pixel no tempo
 b – bits por pixel
 Th – Threshold

RESUMO

O avanço das técnicas de ensaios não destrutivos está ligado à busca pela qualidade total e à melhoria dos processos produtivos. Nesse contexto, a termografia tem se mostrado uma ferramenta valiosa em diversas áreas científicas. Essa técnica permite identificar parâmetros a partir da radiação infravermelha, revelando o comportamento térmico dos materiais e fornecendo informações sobre sua estrutura interna. A análise dos termogramas possibilita a detecção de falhas internas e o cálculo da condutividade térmica de diferentes materiais. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um método alternativo de termografia ativa pulsada para a identificação de defeitos em amostras de polipropileno, utilizando uma fonte térmica resistiva para aquecimento por condução. A fonte foi construída com uma resistência elétrica, um variômetro e um controlador térmico. As amostras foram aquecidas em contato com a fonte e, em seguida, o resfriamento foi registrado por uma câmera infravermelha. Foram realizados estudos experimentais para avaliar a eficácia do método na detecção de falhas em função dos diâmetros e profundidades das falhas. Os experimentos permitiram aprofundar o conhecimento sobre a aplicação da técnica de termografia ativa, bem como sobre transferência de calor, radiação infravermelha e processamento de imagem digital. A análise dos dados coletados possibilitou a identificação das bordas das imagens e a avaliação do resfriamento térmico dos pixels ao longo do tempo. Observou-se que períodos prolongados de aquecimento podem resultar em homogeneidade térmica indesejada, comprometendo a análise dos resultados. Porque o contraste é fundamental para evidenciar informações relevantes, quanto maior a profundidade das falhas, maior o tempo necessário para a identificação nos termogramas. Foi determinada a relação entre o tamanho do pixel e a distância da câmera em relação à área registrada. Por fim, aplicou-se o modelo de decaimento térmico, desenvolvido por Silva (2020), que possibilitou a redução de dados em 98%, mantendo apenas as informações essenciais. A partir dessa abordagem, foram geradas imagens resultantes da soma de variáveis como fluxo de calor, constante de tempo, delta T máximo e contraste térmico.

Palavras-chave: Ensaios não destrutivos; Radiação infravermelha; Comportamento térmico; Termografia ativa pulsada; Processamento de imagem digital.

ABSTRACT

The advancement of non-destructive testing techniques is linked to the pursuit of total quality and the improvement of production processes. In this context, thermography has proven to be a valuable tool in various scientific fields. This technique allows for the identification of parameters based on infrared radiation, revealing the thermal behavior of materials and providing insights into their internal structure. The analysis of thermograms enables the detection of internal flaws and the calculation of thermal conductivity for different materials. This study proposes the development of an alternative method of pulsed active thermography for the identification of defects in polypropylene samples, using a resistive thermal source for conduction heating. The source was constructed with an electric resistor, a variac, and a thermal controller. The samples were heated in contact with the source, and the cooling process was subsequently recorded by an infrared camera. Experimental studies were conducted to assess the effectiveness of the method in detecting flaws based on their diameters and depths. The experiments provided a deeper understanding of the application of active thermography, as well as heat transfer, infrared radiation, and digital image processing. The analysis of the collected data enabled the identification of image edges and the evaluation of the thermal cooling of the pixels over time. It was observed that prolonged heating periods can lead to undesirable thermal homogeneity, compromising the analysis of results, as contrast is essential for highlighting relevant information. Notably, the greater the depth of the flaws, the longer the time required for their identification in the thermograms. The relationship between pixel size and the camera distance concerning the recorded area was determined. Finally, the thermal decay model developed by Silva (2020) was applied, allowing for a 98% reduction in data while retaining only essential information. From this approach, images resulting from the summation of variables such as heat flow, time constant, maximum delta T, and thermal contrast were generated.

Keywords: Non-destructive testing; Infrared radiation; Thermal behavior; Pulsed active thermography; Digital image processing.

1. INTRODUÇÃO

Os ensaios não destrutivos são relevantes em diversos processos que buscam a qualidade total. Eles representam diferentes maneiras de abordar os sistemas, de forma a aprimorar os seus procedimentos. Atrelado à produção industrial, os Ensaios-não destrutivos (END) ajudam os engenheiros responsáveis pela produção a garantir qualidade dos produtos.

Com a termografia ativa, pode-se estudar o comportamento térmico dos corpos e verificar as características dos materiais utilizados para além da capacidade da verificação a olho nu. Existem vários processos industriais que utilizam processamento de imagem digital atrelado à garantia do produto em diversas etapas produtivas, como por exemplo, verificação de placas eletrônicas ou de tampas de plásticos.

Com a expansão do mercado global o quesito qualidade tomou um assunto importante na década de 90. Neste período iniciou-se o que denominamos de qualidade total, o processo que busca mitigar falhas e maximizar a produtividade a partir do aprimoramento dos produtos e eliminação dos desperdícios. Isto se aplica em diversos ramos da indústria, como a automotiva, eletrônica, aeroespacial, nuclear, alimentícia, médica, de energia, entre outras (MALDAGUE, 1993).

Os END são diferentes em função do material sob análise, características e procedimentos experimentais aplicados, tendo uma grande variedade. Eles buscam testar materiais a fim de quantificar suas características e aprimorar a aplicação de cada material em diferentes setores. A termografia é uma dessas técnicas e tem tomado espaço mundial pela sua capacidade de registrar o comportamento térmico através da radiação infravermelho. Segundo Shepard (2007), com os dados é possível quantificar medidas como a espessura, profundidade e difusividade térmica dos materiais com deformidades internas.

A termografia mede o campo térmico da superfície do corpo estudado. O princípio da termografia é baseado na diferença de comportamento térmico entre a estrutura interna do objeto examinado e suas falhas (LU e WONG, 2017). Os avanços com os dispositivos capazes de capturar a radiação infravermelha possibilitam o aumento dos estudos das aplicações desta técnica. Os métodos de END são amplamente utilizados para a verificação da qualidade e integridade estrutural de peças, que requer uma inspeção de descontinuidades e falhas prováveis sem danificá-las. Além de utilizada como indicador de funcionamento de equipamentos elétricos energizados, devido ao efeito Joule causado pela resistência à passagem de corrente.

A termografia pode ser classificada em dois métodos: passiva ou ativa. A termografia passiva é a aplicação do método sobre condições normais de temperatura, bastante empregada em estudos térmicos de sistemas elétricos, estruturas da construção civil, entre outros, enquanto que a termografia ativa necessita de uma fonte térmica externa para aquecer o objeto em estudo. (HIASA *et al.*, 2017). Ambas utilizam a câmera infravermelha para registrar a distribuição térmica da superfície sujeita a um gradiente térmico resultante de uma mudança transitória ou alternada do calor (CARVALHO, 2019).

Os procedimentos para termografia ativa são diferentes em termos de tipo de fonte de calor e seu modo de operação, sua excitação e forma de sinais de calor, os métodos para pré/pós-processamento dos termogramas capturados, além dos parâmetros termofísicos do objeto testado (STOYNOVA, 2020). Portanto, pode-se perceber que os estudos termográficos estão sujeitos a muitas variações do processo de como os ensaios são realizados.

As fontes térmicas mais utilizadas na literatura são: fonte pulsada, sinal de frequência modulada, vibração mecânica, ultrassom e micro-ondas (RODRÍGUEZ *et al.*, 2016). A seleção da fonte de excitação depende das características do defeito que se deseja identificar. É possível determinar a dimensão de defeitos subsuperficiais, a sua profundidade e as características térmicas do defeito, se é um condutor ou um isolante, mediante a análise do fator de compatibilidade térmica apresentado por Grys (2018).

Neste estudo foi desenvolvido um estudo experimental das implicações em utilizar uma fonte térmica alternativa aplicando a termografia ativa em amostras de polipropileno. Motivada pelo estudo realizado por Silva (2020) e o desenvolvimento um algoritmo de termografia ativa capaz de detectar defeitos em materiais, baseados nas técnicas de Reconstrução de Sinal Termográfico (RST), Contraste Térmico (CT) e os princípios físicos da transferência de calor, pensou-se sobre utilizar uma fonte térmica de fácil acesso e simples desenvolvimento para produzir termogramas e realizar processamento de imagens capazes de extrair informações como o diâmetro das falhas.

Para o pré-processamento, pode-se verificar se os ensaios termográficos foram capturados corretamente através de um interface gráfica desenvolvido por Freitas (2018). Sendo possível visualizar o termograma com a aplicação de diferentes filtros. Em seguida, ao constatar êxito no ensaio desenvolvido pode-se seguir para o pós-processamento, onde identificou-se as bordas das falhas, a aplicação do contraste térmico padrão indicando quais profundidades a técnica possui sensibilidade e a dimensão utilizando a técnica do tamanho relativo do pixel.

Por fim, com os dados obtidos através do desenvolvimento experimental e da técnica proposta, pode-se aplicar o algoritmo elaborado por SILVA (2020) para detectar regiões defeituosas utilizando a técnica de reconstrução de sinais termográficos e os princípios físicos de transferência de calor. A principal vantagem de utilizar esse algoritmo é a compactação dos dados, a detecção das bordas e a consolidação de uma única imagem resultante que agrega os indicadores referente à constante de tempo do resfriamento, máxima temperatura de cada pixel e contraste máximo.

Nesta pesquisa experimentou-se desenvolver um estudo de aquecimento por contato usando uma fonte térmica de efeito Joule com o objetivo de verificar a capacidade da técnica em identificar falhas. A partir dos termogramas gerados foi possível realizar estudos sobre a distribuição térmica em amostras de polipropileno e desenvolver análises mediante conhecimentos de processamentos de imagens digitais correlacionados com as Leis de resfriamento de Newton.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um método alternativo de termografia ativa pulsada na identificação de defeitos com aplicação de uma fonte térmica resistiva que aquece as amostras de polipropileno por contato.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar o *setup* de aquecimento;
- Realizar os experimentos preliminares para aquisição dos dados;
- Processar os dados obtido por termografia ativa;
- Verificar a capacidade do método de aquecimento para identificação dos defeitos;
- Realizar análises qualitativas e quantitativas dos resultados obtidos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção apresenta-se a base teórica utilizada para o desenvolvimento deste trabalho. Abordando sobre o espectro eletromagnético e suas principais características, tratando de conceitos como o corpo negro e a radiação, características dos material, emissividade. Em seguida, considera-se as características de transferência de calor: convecção, condução e radiação. Apresenta sobre contraste térmico, a Lei do resfriamento de Newton e trata sobre os END dando enfoque a termografia ativa pulsada. Levantando os principais critérios para desenvolvimento da atividade prática e os aspectos técnicos importantes para delimitação do procedimento experimental.

3.1 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Segundo BARROS (2018) o eletromagnetismo e a óptica eram vistos como dois ramos separados na Física. Enquanto no eletromagnetismo se discutia os campos gerados por distribuições de cargas em repouso e correntes estacionárias, além do fenômeno da indução eletromagnética (Lei de Faraday), em que o fluxo de um campo magnético variável no tempo gera um campo elétrico induzido, a óptica tratava de explicar a propagação da luz sem se preocupar com sua origem.

Foi então que o inglês James Clerck Maxwell demonstrou teoricamente que cargas elétricas aceleradas emitem radiação eletromagnética e que essa energia poderia se propagar até mesmo no vácuo, além de apresentar propriedades ondulatórias como reflexão, refração, difração, interferência e transporte de energia. A essas ondas, Maxwell deu o nome de ondas eletromagnéticas.

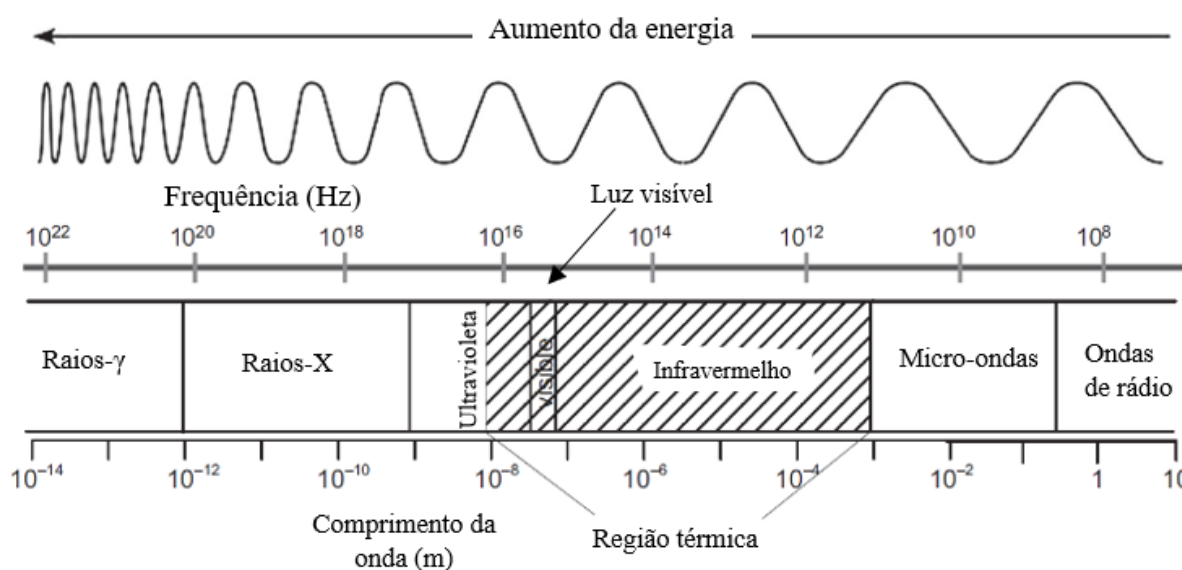
Ele também foi capaz de calcular a velocidade dessas ondas no vácuo, partindo apenas de duas constantes que representavam as propriedades elétricas e magnéticas no vácuo, a saber, a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética no vácuo. O resultado obtido foi idêntico ao valor experimental da velocidade de propagação da luz no vácuo, que é usualmente representada por 'c' (TORRES *et al.*, 2010, p. 141-143).

A comprovação experimental das ondas eletromagnéticas foi realizada pelo físico alemão Heinrich Rudolf Hertz, em 1887, que, utilizando conceitos de oscilações

eletromagnéticas e ressonância, conseguiu gerar e detectar experimentalmente ondas eletromagnéticas na faixa de frequência das ondas de rádio. Além disso, Hertz conseguiu demonstrar experimentalmente que as ondas de rádio, assim como as ondas luminosas, podem ser refletidas, refratadas e difratadas. A partir de então, abriu-se o caminho para a investigação desse campo promissor da ciência e da tecnologia (BARROS, 2018).

Com o passar do tempo foram sendo descobertos outros tipos de radiações eletromagnéticas que se classificam em faixas de diferentes frequências, ou seja: ondas de rádio, microondas, radiação infravermelha, luz visível, radiação ultravioleta, raios X e raios gama. Ao conjunto dessas radiações, de diferentes frequências, dá-se o nome de espectro eletromagnético apresentado na Figura 1. A radiação infravermelha é uma forma de radiação eletromagnética que tem comprimentos de onda maiores do que os da luz visível, mas menores do que dos micro-ondas.

Figura 1: Espectro eletromagnético (desenho sem escala).



FONTE: MEOLA, 2017.

A radiação infravermelha é emitida por objetos com temperatura, já que é uma forma de energia térmica. Quando um objeto é aquecido, suas moléculas e átomos vibram mais rapidamente e emitem radiação infravermelha. Esse tipo de radiação não é visível a olho nu, mas pode ser detectado por dispositivos específicos, como câmeras de infravermelho e sensores térmicos.

Os estudos que utilizam da radiação infravermelha são diversos, e perpassam pelas áreas da comunicação, processamento de imagem, astronomia, mediação de temperatura, estudos científicos, setores industriais de qualidade e a área da saúde para diagnósticos médicos.

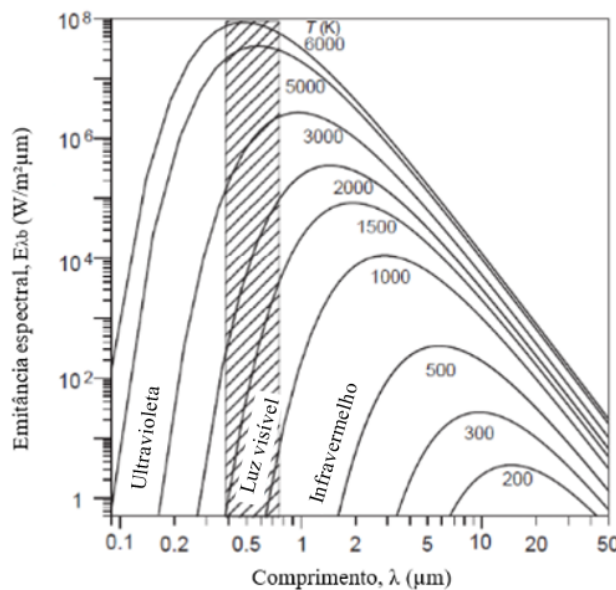
3.2 CORPO NEGRO

Segundo MEOLA (2017), a origem da tecnologia infravermelho começou com a descoberta do Sir William Herschel sobre a radiação térmica, posteriormente denominado de radiação infravermelha que se apresenta abaixo da faixa da luz visível. Essas ideias foram proliferadas em debates com grandes cientistas como: Macedonio Melloni, Gustav Kirchhoff, Clark Maxwell, Joseph Stefan, Ludwig Boltzmann. O Max Planck determinou a lei básica da radiação que descreve precisamente a distribuição espectral da radiação de um corpo negro, equação 1.

$$E_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda k_b T}} - 1)} \quad (1)$$

Onde, $E_{\lambda b}$ é a intensidade monocromática da radiação do corpo negro; h é a constante de Planck ($h=6,6 \times 10^{-34}$ J.s); c é a velocidade da luz ($c \cong 3 \times 10^8$ m/s); λ é o comprimento de onda (m); k_b é a constante de Boltzmann ($k_b=1,38 \times 10^{-23}$ J/K) e T é a temperatura absoluta do corpo negro em Kelvin.

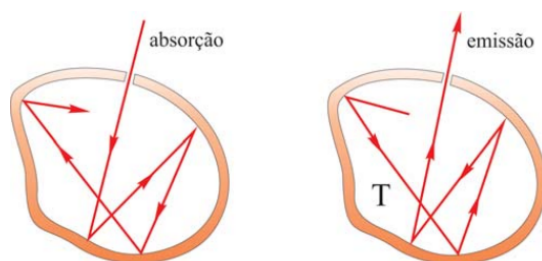
Figura 2: Potência da emissividade do corpo negro versus o comprimento de onda segunda a Lei de Planck.



Na Figura 2, pode-se verificar a família das curvas plotadas segundo a Lei de Planck para uma escala de (200 - 6000) K. Nota-se que todas as curvas iniciam em zero, tendem ao máximo e depois diminuem para o zero novamente para comprimentos de ondas muito grande. E quanto maior a temperatura menor é o comprimento de onda onde o máximo ocorre.

O corpo negro é uma idealização teórica que absorve totalmente a radiação incidente, e pelo princípio de Gustav Kirchhoff, o poder de absorção é diretamente proporcional ao poder de emissão, e, neste caso, emite 100% da radiação. Na Figura 3, pode-se observar a idealização dos corpos negros, numa temperatura T, emitem radiação térmica de mesmo espectro, podendo ser análogo a uma cavidade ressonante dotada de um pequeno orifício.

Figura 3: Cavidade ressonante que elucida o comportamento de um corpo negro ideal.



FONTE: LIMA, 2013.

Em 1879, Josef Stefan, usando argumentos empíricos, demonstrados teoricamente por Ludwig Edward Boltzmann, propôs que a radiância total de um corpo negro fosse proporcional a quarta potência da temperatura T, equação 2:

$$\varepsilon = \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

Onde: ε - é a taxa de energia total radiante emitida por unidade de área de um corpo negro (também chamada de emissividade), medida em watts por metro quadrado (W/m^2); σ é a constante de Stefan-Boltzmann, que tem o valor aproximado de $5,67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T é a temperatura absoluta do corpo negro, medida em Kelvin (K).

Essa lei é fundamental para entender como os corpos aquecidos emitem radiação térmica. Ela nos diz que a quantidade de energia radiante emitida por um corpo negro aumenta rapidamente com o aumento da temperatura absoluta. Em outras palavras, quanto mais quente um corpo negro está, mais energia ele emite na forma de radiação eletromagnética.

3.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Diante do foco principal da técnica que consiste na análise da distribuição de temperaturas na superfície do material é importante ressaltar o conceito de temperatura. A temperatura pode ser definida como uma medida da intensidade de movimentação atômica, molecular ou iônica de uma substância, ou seja, é uma medida da energia cinética média dos seus constituintes. Ela é expressa em graus Centígrados, Kelvin ou Fahrenheit (MALDAGUE *et al.*, 2001).

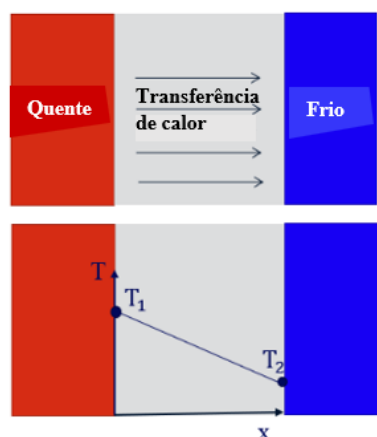
Em contrapartida, o calor pode ser definido como uma energia em trânsito da temperatura mais alta para temperatura mais baixa dentro de um sistema, sendo necessário um gradiente de temperatura em seu interior. Usualmente, a medida de calor mais utilizada é o Joule, que equivale 0,24 calorias (MALDAGUE *et al.*, 2001). Existem três formas pelas quais o calor pode ser transferido, sendo elas: convecção, condução e radiação. Dentre estas três formas, a condução e a radiação são consideradas mais relevantes para a análise do ensaio termográfico (MALDAGUE *et al.*, 2001).

3.3.1 CONDUÇÃO

Nesta forma de transferência de calor, a energia térmica se propaga entre dois corpos sólidos em contato quando há uma diferença de temperatura entre eles ou quando essa diferença ocorre entre as partes do próprio sólido (MALDAGUE *et al.*, 2001). Segundo LACERDA (2022) a condução ocorre internamente dentro de um material ou entre dois materiais que estão em contato direto. Para uma transferência em um plano, a taxa de transferência é proporcional ao gradiente de temperatura e a área da seção.

Essa taxa de transferência de calor significa uma quantidade de energia térmica que flui através de uma área definida em função do tempo. Esta quantidade de energia é denominada 'q' e sua unidade é o W. A lei de Fourier representa a transferência de calor por condução de dois corpos, um quente e um frio, pode-se observar na figura 4.

Figura 4: Transferência térmica por condução.



$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

$$q = -kA \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (4)$$

Onde: q – taxa de calor transferido (W); k – condutividade térmica (W/m·K);
 A – área da superfície (m²); T_2 - Temperatura do ponto 2 (K), T_1 - temperatura do ponto 1 (K), L - espessura do material (m).

Essa transferência de calor se dá entre camadas sucessivas de um material através da difusão de energia cinética entre os átomos, sendo essa energia maior nas regiões com maiores temperaturas e menor nas mais frias, sendo então o fluxo na condução direcionado da região de mais alta temperatura para a mais baixa temperatura, a fim de igualar a temperatura nestas duas regiões. Duas propriedades do material que são importantes para este tipo de transferência de calor são a condutividade térmica (k) e a difusividade térmica (α) (MALDAGUE et al., 2001).

A condutividade térmica é uma propriedade física que quantifica a capacidade do material em conduzir calor. Materiais com alta condutividade térmica conduzem calor com uma taxa elevada, sendo assim aplicados como dissipadores de calor ao passo que materiais de baixa condutividade térmica, são utilizados como isolantes térmicos. Essa propriedade pode ser calculada através da seguinte expressão matemática, equação 5 (MALDAGUE et al., 2001):

$$k = \frac{\Delta Q L}{A \Delta t \Delta T} \quad (5)$$

Onde: k – condutividade térmica (W/(m·K)); ΔQ – quantidade de calor transferido (J); L – espessura (m); Δt – tempo decorrido (s); A – área da superfície (m²); ΔT – variação de temperatura (K).

A taxa de transferência de calor, equação 6, pode ser classificada em função do tempo como estacionária, não variando neste caso a taxa com o tempo; e não estacionária, quando a taxa varia de acordo com o tempo até que o equilíbrio térmico do material seja atingido, sendo a partir disto a taxa constante (MALDAGUE *et al.*, 2001). Segundo LACERDA (2022), um exemplo real, na condução em três dimensões, a taxa de transferência de calor é também proporcional ao gradiente de temperatura e é dada pela equação:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

Onde: α – difusividade térmica (m^2/s); $\frac{\partial T}{\partial t}$ – taxa de transferência;
 $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ – segunda derivada da Temperatura na direção de x, y e z;

Como apresentado acima, é possível observar que a difusividade térmica é uma propriedade do material muito importante, principalmente quando o fluxo de calor ocorre no estado não estacionário, uma vez que ela expressa a velocidade com que o calor atravessa a espessura do material. Esta propriedade pode ser determinada através da equação 7 (MALDAGUE *et al.*, 2001).

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (7)$$

Onde: k – condutividade térmica ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$); ρ – densidade (kg/m^3); C_p – calor específico ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$).

Vale ressaltar que a maioria dos materiais compósitos e poliméricos apresentam baixa difusividade, fato este que impõe a necessidade de uma maior quantidade de energia absorvida para que estes materiais apresentem altas taxas de difusividade. A constante k também é associada ao material e a geometria da superfície exposta, a constante depende do coeficiente de transferência de calor, da superfície exposta, da massa do material, do coeficiente de transferência de calor e do calor específico, apresentada na equação 8. Sendo assim, a taxa de resfriamento dependerá, entre outros parâmetros, do material da superfície exposta ao meio de resfriamento (neste caso, ar) e da temperatura do meio imediatamente adjacente ao material.

$$k = - \frac{\delta A}{m C_p} \quad (8)$$

Onde: δ – coeficiente de transferência de calor (W/m^2); A – área exposta (m^2);
 m – massa do material (kg); C_p – calor específico (J/kgK);

3.3.2 CONVECÇÃO

Este tipo de transferência de calor envolve a movimentação de massa de um gás ou de moléculas de um líquido ao longo de longas distâncias. Esse fenômeno só ocorrerá entre dois sólidos caso haja a presença de um fluido ou gás entre eles (MALDAGUE et al., 2001).

Considera-se que este tipo de transferência é complexa, os quais depende das características do fluido, como: a viscosidade, condutividade, densidade e calor específico. Além das características do sólido, como: a geometria, a rugosidade da superfície e a forma de contato.

A equação que representa a taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença térmica e é expressa pela lei de Newton do resfriamento, apresentada abaixo:

$$q = -h.A(T_s - T_a) \quad (9)$$

Onde: q – taxa de calor transferido (J); h – coeficiente de convecção ($W/m^2.K$); A – área da superfície (m^2); T_s - Temperatura do sistema (K) e T_a - temperatura ambiente (K);

3.3.3 RADIAÇÃO

Basicamente, todo objeto, que a temperatura seja acima do zero absoluto, irradia uma quantidade de energia devido ao movimento dos elétrons da substância de que é feita. A energia não é emitida como um fluxo contínuo, mas sim na forma discreta de quanta ou fótons. A magnitude da radiação emitida depende da temperatura e das características de emissão do objeto (MEOLA *et al.* 2016).

Um objeto real depende do material que é feito e das características da sua superfície que apresentam diferentes capacidades de absorver, refletir e transmitir energia. Segundo LACERDA (2022) a radiação é a única forma de transferência pelo vácuo, e é a energia transportada pelas ondas eletromagnéticas. Essa energia, ao encontrar com a superfície de um material pode ser refletida, absorvida e transmitida, resultando na relação entre absorção (α'), transmissão (τ') e reflexão (ρ'), esta capacidade é descrita como conservação de energia apresentada pela equação 10:

$$\alpha' + \tau' + \rho' = 1 \quad (10)$$

O corpo negro é caracterizado pela parcela total da absorção, tendo a transmissão e a reflexão nulas. Lembrando que este comportamento não pode ser encontrado na natureza, apenas teoricamente. Mas existem corpos reais que absorvem 95% sendo um valor expressivo.

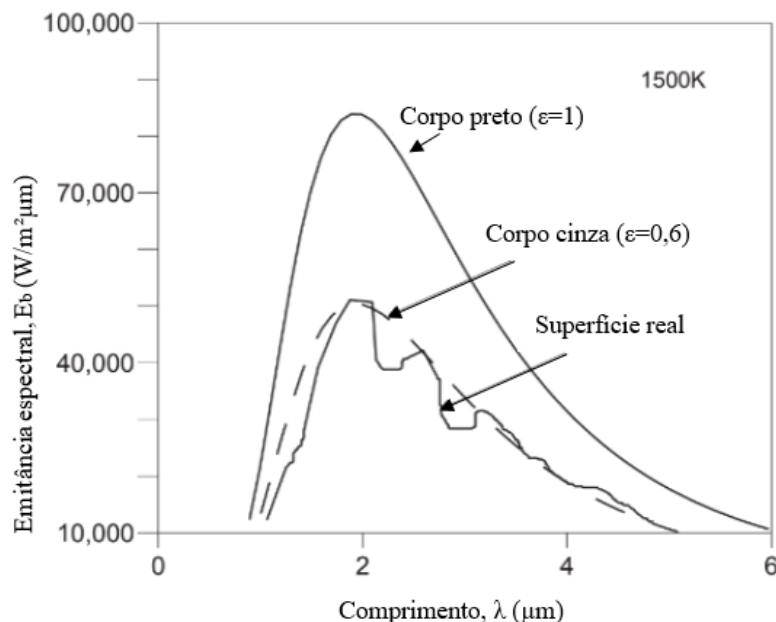
3.4 EMISSIVIDADE

O símbolo ϵ indica a emissividade, que é a fração da energia emitido pelo corpo negro expressa por (11). Na realidade, a emissividade dos objetos reais são geralmente dependente do comprimento de onda. De fato, um objeto real emite apenas uma parte da radiação emitida por um corpo negro na mesma temperatura e no mesmo comprimento de onda, como pode ser observado na Figura 5.

$$E_{\lambda} = \epsilon \cdot E_{\lambda b} \quad (11)$$

Onde: E_{λ} – é a radiação emitida por um corpo real; $E_{\lambda b}$ – é a radiação emitida por um corpo negro.

Figura 5: Emissividade de um corpo negro, cinza e de uma superfície real.



FONTE: MEOLA *et al.* 2016.

Para alguns objetos não negros, a emissividade não varia com o comprimento de onda; esses objetos são chamados de corpos cinza. Uma comparação entre a emissância radiante espectral de um corpo negro, um corpo cinza e um corpo real, todos em a mesma temperatura

são apresentados na Figura 5. A curva de radiação de um corpo cinza é idêntica à de um corpo negro, exceto que é reduzido para a potência irradiada pelo fator da emissividade (MEOLA *et al.*, 2016).

Ao observar a curva da superfície real podemos identificar que a emissividade emitida não é linear e pode apresentar diferentes intensidades em relação ao comprimento de onda. Se considerarmos a superfície terrestre como objeto de estudo a intensidade da radiação eletromagnética que atinge a superfície terrestre, nota-se que a incidência diminui até ficar nula quando se afasta da região do visível.

Na termografia, a temperatura é interpretada a partir da radiação emitida pela superfície sob investigação. Se a emissividade da superfície é muito baixa, então a radiação emitida desta superfície é muito fraca. Tem sido relatado que a medição termográfica não é possível para superfícies com valor de emissividade inferior a 20% de emissividade de corpo negro (LAHIRI, 2012). Superfícies de baixa emissividade também sofrem do problema da reflexão secundária, devido à presença de corpos circundantes.

A metodologia mais comum para superar os problemas de emissividade mencionados acima é através da aplicação de um uniforme tinta preta de alto valor de emissividade, que não só aumenta o valor de emissividade da superfície, mas também reduz as reflexões secundárias, além de proporcionar uma superfície emissiva uniforme (LAHIRI, 2012). Assim, a superfície dos espécimes voltados para a câmera são pintadas de preto usando uma tinta preta de alta emissividade ($\epsilon > 0,9$).

3.5 CONTRASTE TÉRMICO

O contraste térmico é uma técnica para achar a máxima variação da temperatura entre regiões com defeito e sem defeitos (LAU *et al.*, 1990), definida na equação 12.

$$C_a(t) = T_{def}(t) - T_{ref}(t) \quad (12)$$

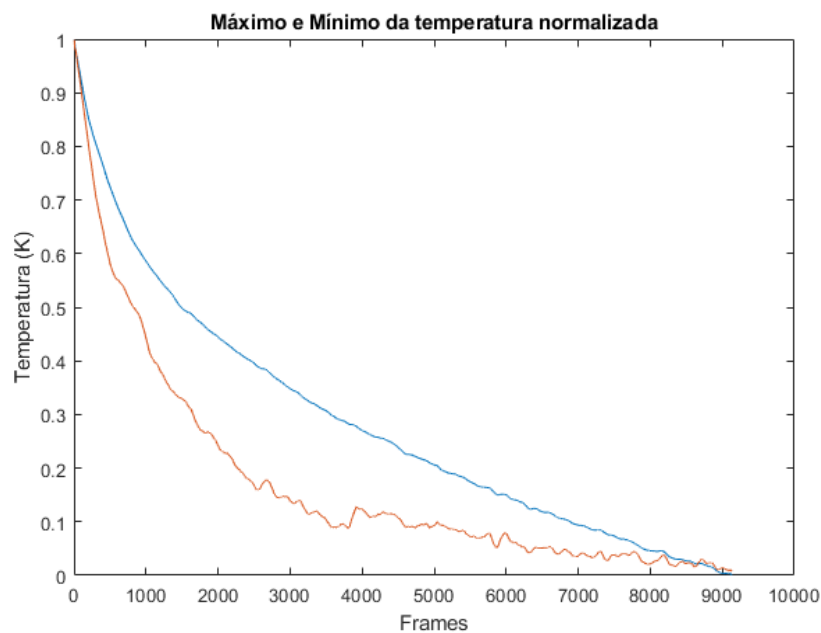
Onde: $C_a(t)$ – Contraste térmico absoluto; $T_{def}(t)$ – Temperatura no ponto (área) considerado defeito; $T_{ref}(t)$ – Temperatura no ponto (área) considerado de referência.

A análise das curvas de contraste térmico de um material é uma importante ferramenta para estimar a influência da profundidade do defeito sobre o nível de contraste térmico obtido, Na figura 6, pode-se ver o contraste térmico dos máximos e mínimos de cada frame.

Descontinuidades de pequena espessura ou que se encontram próximas da superfície observada respondem com um contraste térmico maior e são detectadas para picos de máximo contraste térmico em menor tempo se comparadas com as descontinuidades mais profundas ou de espessura maiores (VILARDO, 2018).

O contraste térmico fornece valiosa informação qualitativa (visualização do defeito) e quantitativa (caracterização e localização do defeito). Após estímulo térmico com a propagação de calor pelo material por condução, na ocorrência de descontinuidades haverá a alteração da taxa de difusão de calor apresentando diferentes taxas de temperatura. Observa-se que defeito com maiores profundidades levam mais tempo para serem observados e possuem contraste térmico reduzido.

Figura 6: Contraste térmico da temperatura normalizada.



3.6 LEI DO RESFRIAMENTO DE NEWTON

Segundo RODRÍGUEZ-MARTÍN *et al.* (2014), a Lei do resfriamento de Newton defende que a intensidade de calor transferido depende da diferença de temperatura entre a interação de diferentes sistemas físicos. A lei de resfriamento de Newton estabelece a taxa de variação do calor (Q , em Joule) no tempo, proporcional a uma constante do material, a área de contato e a diferença de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) entre o material (T) e o ambiente (T_a). Verifica-se esta relação na equação 12, RODRÍGUEZ-MARTÍN *et al.* (2014).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\alpha A(T - T_a) \quad (12)$$

A solução da variação do resfriamento para condições iniciais padrões é uma função exponencial com o tempo como variável independente, equação 13, onde T_0 é a temperatura inicial do material no instante inicial (t_0).

$$T = T_a + (T_0 - T_a) \cdot e^{\frac{(t-t_0)}{\tau}} \quad (13)$$

Onde: T é a temperatura do sistema, T_a é a temperatura do ambiente, T_0 é a temperatura no instante ($t = t_0$) e τ é a constante de tempo.

3.7 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os ensaios não-destrutivos envolvem um conjunto de atividades dentre as quais estão a inspeção, o teste e a avaliação com o objetivo de caracterizar o material ou identificar irregularidades, descontinuidades ou defeitos, bem como dimensioná-los. A partir de medições, é possível avaliar a qualidade de componentes fabricados, estimar a vida útil de equipamentos e determinar se descontinuidades podem ou não ser toleradas (SILVA, 2014).

Figura 7: Uma boa escolha para testes não destrutivos depende dos seguintes parâmetros.



FONTE: Modificado de MEOLA, 2017.

MEOLA *et al.* (2017) apresentam que todas as técnicas disponíveis podem ser classificadas dependendo da forma como um teste é realizado, ou melhor, na posição relativa

do atuador de entrada de energia e/ou o sensor em relação à superfície do componente sob teste. Pode-se classificar os testes em dois grupos:

1. **Contato:** todas as técnicas que envolvem contato direto com a superfície do componente inspecionado ou um contato indireto quando um acoplamento médio é necessário.
2. **Sem contato:** não é necessário contato direto, nem meio de acoplamento, o teste é realizado estimulando o objeto a partir de uma posição remota.

Outra classificação pode ser baseada no tipo de sinal de saída envolvido onde o calor é entregue à superfície do componente sob ensaio. Em seguida, a análise é realizada como resultado de propagação de calor e/ou variações locais de temperatura. Na Figura 7, observa-se o que determina para que um END seja caracterizado como um bom teste, segundo MEOLA et al. (2017).

Há diferentes técnicas de termografia que dependem do método de aquecimento. A termografia passiva é baseada na aquisição das imagens termográficas do objeto em estudo sem uma fonte de aquecimento externa. Por outro lado, a termografia ativa é baseada no uso de uma fonte energética para excitar os átomos do material. A fonte térmica varia a depender da técnica empregada (RODRÍGUEZ-MARTIN *et al*, 2014).

A modalidade de termografia ativa encontra numerosas aplicações dentro do campo de END e nos últimos anos, se tornou uma importante ferramenta para detecção de defeitos superficiais e subsuperficiais em diferentes tipos de materiais: metálicos, poliméricos e compósitos (MONTANINI, 2010).

O olho humano possui a capacidade de identificar o que chamamos de luz visível na faixa de $(0,39 \text{ a } 0,75)\mu\text{m}$ do espectro eletromagnético. Conseguir identificar diferentes faixas do espectro é uma vantagem que alguns ensaios buscam para analisar a qualidade de produtos produzidos na manufatura.

A aplicação da termografia ativa pode-se identificar a quantidade de material que um certo objetivo possui para controle de produção, bem como analisar se existem algum tipo de falha não visível ao olho nu. MEOLA et al. (2017) afirma que em geral, quando um dado sinal toca a superfície de um material, pode ser absorvido, refletido ou transmitido de acordo com a refletividade do material, absorvidade e transmissividade para tal sinal.

A propagação do sinal dentro do material depende de suas inerentes propriedades mecânica, térmica, química, acústica, elétrica e óptica. Claro que tais propriedades se modificam na presença de heterogeneidades e materiais em geral alterados. Como

consequência importante, é possível avaliar a variação de uma propriedade do material através da variação de outra propriedade. Basta escolher a técnica mais adequada, levando em conta que a sua eficácia depende de dois fatores principais:

1. As propriedades térmica, óptica e elétrica do material hospedeiro e o sinal que deixam passar.
2. A perturbação que uma descontinuidade oculta causa à propagação do sinal de energia de teste específico.

Em outras palavras, a quantidade legível, relacionada à quantidade induzida de perturbação, deve ser grande o suficiente para não ser confundida com o ruído de fundo. Devido às suas características inerentes, um material pode ser avaliado usando a técnica baseada em sinal mais eficaz ou uma combinação de técnicas.

Em geral, uma inspeção envolve dois aspectos: a degradação do material em termos de perda das características originais (variação de densidade, dureza, elasticidade, condutividade térmica ou elétrica etc.) e a presença de defeitos tanto superficiais (arranhões, perda de propriedades ópticas etc.) e internas (vazios, delaminações, trincas etc.). Basicamente, nenhuma técnica é capaz de detectar todo tipo de defeito em todo tipo de material e, portanto, a técnica mais eficaz deve ser selecionada cautelosamente, levando em consideração quais tipos de falhas busca-se verificar e em qual material e a relação entre eles.

3.7.1 TERMOGRAFIA ATIVA PULSADA

A termografia é uma técnica utilizada para se obter a distribuição térmica de um objeto ou para detecção de defeitos na superfície ou abaixo dele. Na detecção de defeitos, seu princípio de funcionamento reside no fato dos materiais serem capazes de emitir radiação na frequência da faixa médio infravermelho quando aquecidos. Ao existir descontinuidades, o fluxo de calor é alterado localmente, causando regiões de diferentes temperaturas na superfície do material. A superfície, por sua vez, terá um padrão de emissão infravermelha distinto entre locais sadios e defeituosos levando a regiões de diferentes temperaturas nas imagens termográficas (MALDAGUE, 2001).

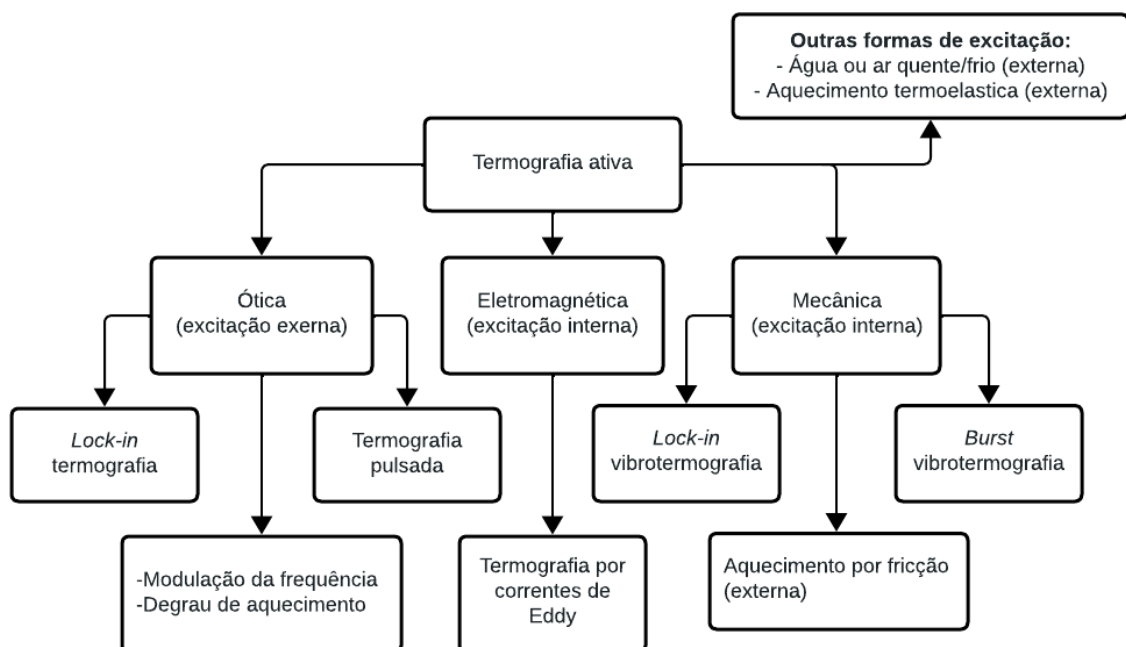
Baseado no modo de excitação térmica, a termografia pode ser dividida em duas modalidades: a termografia passiva e a ativa. Na termografia passiva, o material possui

diferenças de temperaturas suficientes para que sejam reconhecidas pela câmera, não sendo necessário o aquecimento ou resfriamento dele.

Ela é normalmente utilizada em casos de manutenção preditiva de equipamentos elétrico/eletrônicos, desde motores, disjuntores, linhas de transmissão e isolantes elétricos até *hardwares* de computadores. É muito comum nestes casos ocorrer superaquecimento localizado de algumas partes, de modo que nas imagens aparecem pontos quentes (MALDAGUE, 2001).

A técnica da Termografia Ativa difere em termos do tipo de fonte de calor e seu modo de operação, a forma dos sinais de calor de excitação, os métodos de pré e pós processamento dos termogramas capturados e, claro, os parâmetros termofísicos e materiais dos objetos testados. Nesse sentido, para o sucesso da técnica de termografia ativa é de extrema importância a realização de modelagem térmica do procedimento termográfico não destrutivo. Isso reduz significativamente o tempo para projetar um sistema de teste eficaz com termografia ativa (STOYNOVA, 2020).

Figura 8: Métodos de termografia ativa.



FONTE: Modificado de IBARRA-CASTANEDO (2009).

Conforme ilustrado na Figura 8, uma ampla variedade de fontes de energia estão disponíveis e podem ser divididas em óptica, formas de excitação mecânicas, eletromagnéticas

e outras (IBARRA-CASTANEDO, 2009). Nesta dissertação, interessa analisar e experimentar um modo de excitação pouco difundida pela literatura, aquecimento por contato (condução) por fonte térmica resistiva.

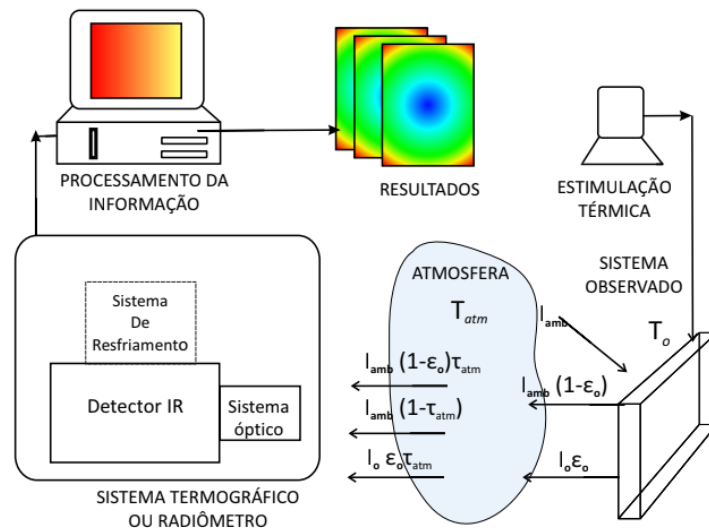
Pode-se ver os métodos de excitação por ótica com a utilização de refletores ou lâmpadas halógenas e podem ser analisadas a partir da excitação pulsada ou termografia *lock-in*. Facilmente pode-se entender como a termografia pulsada funciona ao aplicar um pulso de temperatura sobre a superfície em análise. A *Lock-in* apresenta-se por ter as análises dos dados em relação à forma da excitação, realizando análise de amplitude e de defasagem do resultado térmico em função da excitação.

Ainda é possível ver outras técnicas como modulação da frequência, rampa de aquecimento, entre outras. A excitação por efeito eletromagnético dar-se-á pela utilização do efeito do campo magnético sobre um material metálico, causando as correntes de Foucault. Verifica-se a possibilidade de aquecer o corpo de prova por excitação mecânica proveniente, por exemplo, da vibrotermografia por excitação ultrassônica utilizando-se de transdutores com frequência de 15-40 kHz, por exemplo.

A finalidade de todas as técnicas é a necessidade de aquecer ou resfriar o corpo de prova a fim de que se obtenha significativas diferenças de temperatura e as descontinuidades possam ser reveladas (MALDAGUE, 2001). Dentro da termografia ativa, existem algumas modalidades sendo as de maior relevância para o trabalho a termografia ativa pulsada.

Neste sentido será explorado uma forma não convencional de aquecimento para aplicação do método de termografia ativa pulsada utilizando uma fonte térmica por contato. Os componentes presentes na aplicação do método estão expostas na Figura 9, onde pode-se verificar cada etapa do sistema de termografia ativa que consiste no primeiro estágio a estimulação térmica, a amostra sob teste, aspectos do ambiente, o sistema termográfico ou radiômetro, a unidade de processamento e/ou armazenamento da informação e os termogramas como os resultados.

Figura 9: Componentes do sistema de termografia ativa.



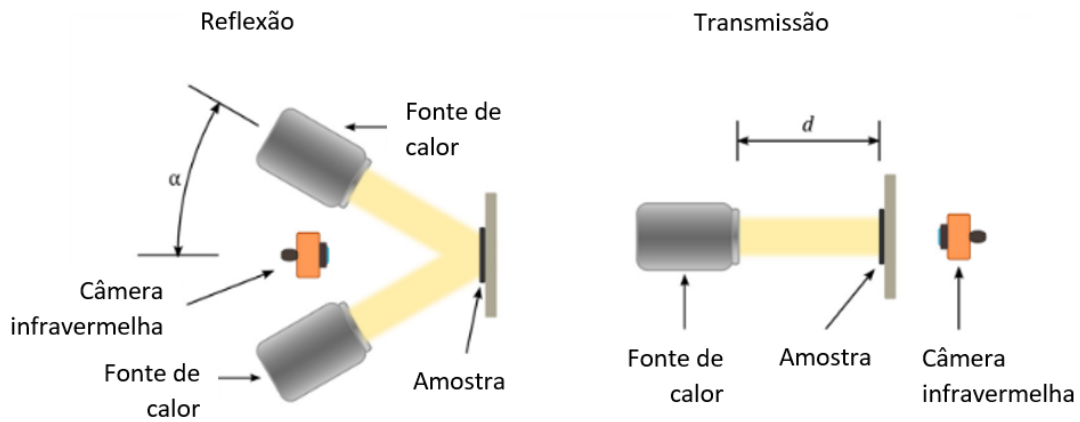
FONTE: RODRÍGUEZ, 2010.

A aquisição dos dados é realizada por um computador utilizando o Matlab®, software de computação numérica que permite a análise e visualização dos dados e que armazena os termogramas no formato (.seq), utilizado para gerar as matrizes tridimensionais que apresentam a mudança temporal da intensidade luminosa em cada pixel correlacionando com uma temperatura relativa da peça em análise, que denominamos de matriz temperatura. Esse valor de temperatura é relativa a emissividade do material, que quanto mais próximo da unidade, maior a relação correta com a temperatura absoluta da amostra.

VAVILOV (2020) afirma que muitos procedimentos de teste podem ser considerados como variantes de um END termográfico pulsado genérico, no qual uma amostra é aquecida com um pulso de calor enquanto registra a superfície padrão de temperatura durante o período de aquecimento ou depois dele, ou seja, dentro de um período de resfriamento.

A temperatura pode ser monitorada na superfície frontal (aquecida) ou traseira da amostra, bem como ao longo das bordas da amostra. Segundo Carvalho (2019) os ensaios podem ser do modo reflexão ou transmissão, que depende da relação entre a fonte calor e a superfície analisada. Ou seja, se o aquecimento foi realizado no mesmo lado da aquisição dos termogramas (reflexão) ou se do lado oposto (transmissão).

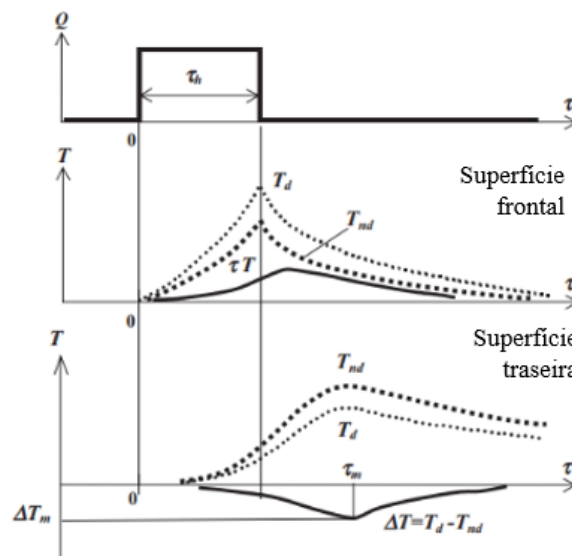
Figura 10: Tipos de esquemas da termografia: modo de reflexão e transmissão.



FONTE: CARVALHO, 2019.

Na Figura 11, verifica-se um pulso térmico aplicado em um tempo (t_h) aplicado à amostra e os dois resultados utilizando a aquisição por reflexão ou transmissão. Pode-se observar o comportamento da resposta térmica durante o aquecimento, isso só é possível quando é aplicada técnica sem contato. A intenção da aplicação de um pulso térmico é submeter a amostra a um fluxo de aquecimento ou resfriamento que seja capaz de induzir uma diferença de temperatura entre a região defeituosa e a região livre de defeito da amostra, ao longo do tempo de observação (VILARDO, 2018).

Figura 11: Pulso de aquecimento e produção de sinal de temperatura diferencial ΔT .

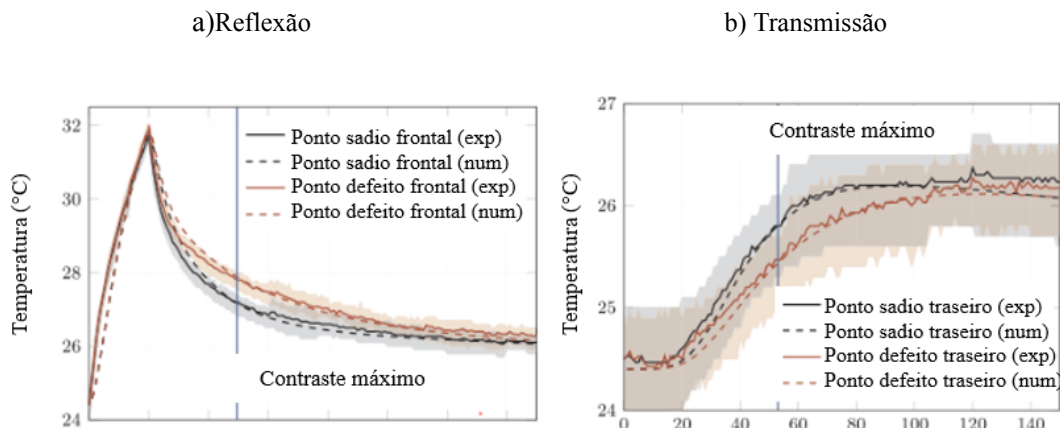


FONTE: VAVILOV, 2020.

De acordo com a teoria END termografia, a maior probabilidade de detecção de defeitos de subsuperfície é fornecida por aquecimento curto e poderoso. No entanto, algumas técnicas produzem ruído térmico suficiente para que algumas técnicas de aquecimento de baixa potência ou mais lentas sejam preferíveis. E, em alguns casos, a magnitude do pulso de aquecimento necessária para alcançar o melhor resultado teórico, pode realmente danificar o material que está sendo testado.

Na superfície frontal da amostra, o excesso de temperatura T aumenta de um nível zero até o máximo que ocorre no final de um pulso de duração τ_h . Na Figura 12, observa-se a resposta térmica por reflexão (a) e transmissão (b). Na superfície traseira, o máximo do excesso de temperatura é ‘deslocado’ no tempo em relação à cessação do aquecimento por uma quantidade que depende da espessura do material e da difusividade térmica..

Figura 12: Temperatura versus tempo de duração do procedimento experimental e simulação numérica.



FONTE: CARVALHO, 2019.

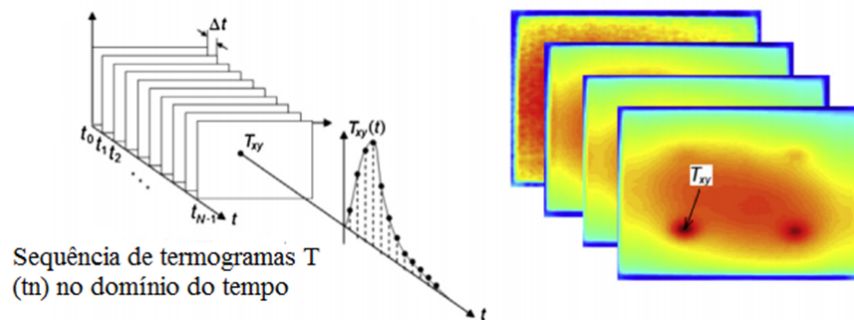
O processo termina quando o excesso de temperatura cai para o valor inicial, por ex. à temperatura ambiente (VAVILOV, 2020). Os defeitos que são mais condutores do que um material hospedeiro produzem $\Delta T < 0$ na face frontal e $\Delta T > 0$ na face posterior. Defeitos típicos em compósitos incluem delaminações, vazios e porosidade, todos os quais têm menor condutividade térmica do que o próprio compósito (VAVILOV, 2020).

A análise dos dados é feita através da diferença de contraste térmico, observados numa sequência de termogramas, onde é possível analisar a evolução da temperatura para cada ponto da imagem (*pixel*) ao longo do tempo (VILARDO, 2018). Observa-se na Figura 13 o ponto T_{xy} que representa um pixel da imagem e o gráfico $T_{xy}(t)$ mostra o comportamento térmico do

ponto durante o tempo. Sendo possível observar o estágio de aquecimento, o crescimento da curva T_{xy} e resfriamento, o decaimento da curva após o ponto máximo.

A tecnologia de imagem de ondas térmicas infravermelha pulsada usa sinal de pulso para excitar a superfície da prova, e a onda térmica se propaga para o interior da prova. Os defeitos da prova afetam a propagação da onda térmica e causam a mudança do campo de temperatura na superfície da prova. A sequência de imagem térmica infravermelha é coletada e gravada pela câmera térmica infravermelha. Finalmente a sequência de imagem térmica infravermelha é analisada e processada para realizar a detecção e avaliação dos defeitos (BU CHI-WU *et al.*, 2020).

Figura 13: Sequência de termogramas.



FONTE: GRYS *et al.* 2015.

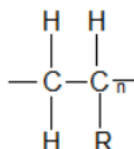
A visualização do defeito depende de uma série de parâmetros, dentre eles a temperatura alcançada pela fonte térmica durante a excitação e a faixa espectral da câmera. Sendo assim, o modo de transmissão apresenta pelo menos uma limitação em relação ao de reflexão, pois a superfície oposta à câmera nem sempre é acessível (MALDAGUE; MOORE, 2001).

Após processamento dos dados, são obtidas informações a respeito da dimensão e profundidade do defeito. Os principais excitadores térmicos utilizados nesta técnica são: lâmpadas de alta potência, sopradores de ar, *flashes* fotográficos, feixes ultrassônicos e correntes parasitas.

3.8 POLIPROPILENO

Conforme apresenta Araújo (2010), as cadeias poliméricas são formadas pela repetição de unidades menores denominadas de ‘meros’, de baixo peso molecular. Uma representação genérica comumente atribuída aos polímeros segue a forma da Figura 14, em que R pode representar tanto um átomo quanto um grupo orgânico.

Figura 14: Forma genérica de um monômero.

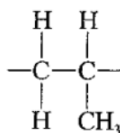


FONTE: CALLISTER *et al.* (2013).

O Polipropileno (PP) é um polímero versátil que possui diversas aplicações de produtos moldados, principalmente empregado em embalagens plásticas até acessórios de automóveis, incluindo fibras e tecelagem. É um polímero resistente e flexível características que o tornam um material multifuncional, sendo um termoplástico semicristalino rígido usado em uma ampla variedade de aplicações domésticas e industriais, possui resistência química, elástica, tenacidade, altamente resistente a fadiga, isolante térmico e elétrico.

Suas características químicas, como mostra Callister *et al.* (2013), representa um grupo CH₃, conforme ilustrado na Figura 15. Harper (2000) apresenta que esse monômero é derivado de produtos petrolíferos e que o PP, produto de sua polimerização, é versátil e apresenta baixo custo. Estas características favorecem o emprego deste polímero em múltiplas aplicações e o consequente interesse por desenvolvimento de pesquisas como esta. Sua temperatura de fusão é de 175 °C (CALLISTER *et al.*, 2013).

Figura 15: Monômero do polipropileno.



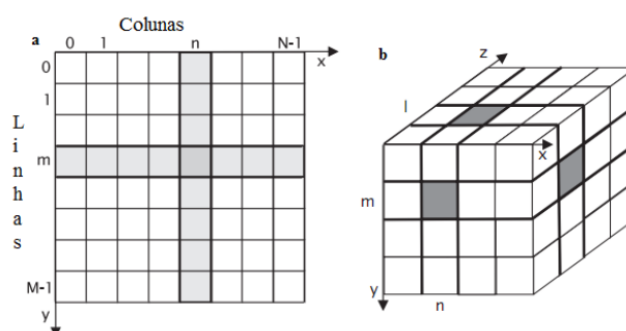
FONTE: CALLISTER *et al.* (2013).

3.9 PROCESSAMENTO DE IMAGEM DIGITAL

Em Jahne (2005) apresenta o processamento de imagem como uma ferramenta que pode ser aplicado em diversas áreas da ciência, sendo evidenciada as aplicações já proeminentes na literatura a análise para astronomia, fotogrametria e partículas físicas. Astrônomos são capazes de medir posição e magnitude das estrelas e a fotogrametria produz mapa topográfico espacial das imagens. Em resumo as imagens podem ser utilizadas para documentação, descrição qualitativa e ilustração do fenômeno observado.

Segundo Ogê (1999) o processamento de imagem se destina a aprimorar as informações pictóricas para a interpretação humana. Diferenciando da visão computacional por ser a análise da imagem de forma automatizada por um computador. Uma imagem digital é uma função discreta, $f(x, y)$, tanto em coordenadas espaciais quanto em brilho (intensidade de cinza). Os pares (x, y) identificam a posição espacial enquanto o valor da função refere-se ao brilho naquele ponto. Cada ponto representa um elemento da imagem e é chamado de pixel, como abreviação de *picture element* (GONZALEZ, 2000). Na Figura 16, verifica-se a representação matricial da imagem em 2D (a) e da representação do termograma tridimensional (b).

Figura 16: Representação de imagem digital por matrizes no formato retangular a) 2D e b) 3D.

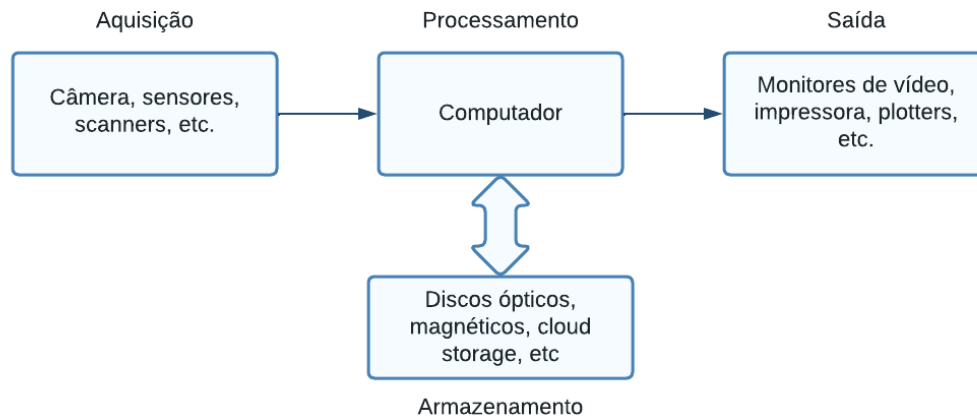


FONTE: JAHNE (2005).

Segundo Jahne (2005) uma tarefa clássica do processamento de imagem digital é contar partículas e medir seu diâmetro em função da distribuição bidimensional. Dentre as aplicações do processamento de imagem está o controle de qualidade de produtos produzidos pela indústria, onde se objetiva a garantia da precisão da produção. Onde a aplicação dessa técnica é vastamente difundida em diversas atividades humanas. Na Figura 17, pode-se

verificar os elementos de um sistema de processamento de imagens com os blocos de aquisição, processamento, armazenamento e saída (OGÊ, 1999).

Figura 17: Elementos de um sistema de processamento de imagem.



FONTE: Modificado de OGÊ, 1999.

3.9.1 AQUISIÇÃO

Segundo Ogê (1999), a etapa de aquisição tem como função converter uma imagem em uma representação numérica adequada para o processamento digital subsequente. Possuindo dois blocos importantes, o primeiro é o dispositivo físico sensível a uma faixa de energia no espectro eletromagnético, como por exemplo a câmera térmica infravermelha, que produz na saída um sinal elétrico proporcional ao nível de radiação infravermelho detectado. O segundo é o digitalizador que converte o sinal elétrico analógico em informação digital.

Para que uma imagem digital seja adquirida são necessários: um instrumento formador de imagem, neste caso, o próprio microscópio óptico; um dispositivo físico sensível a uma faixa do espectro eletromagnético, capaz de produzir um sinal elétrico proporcional ao nível de energia percebida; e um digitalizador, que converterá a saída elétrica do dispositivo de sensoramento físico para a forma digital (Gonzalez & Woods, 2002).

3.9.2 ARMAZENAMENTO

Segundo Ogê (1999), o armazenamento de imagens digitais é um dos maiores desafios no projeto de sistemas de processamento de imagens, em razão da grande quantidade de bytes. Uma imagem digital do tamanho de 1024x1024 *pixels* em que a intensidade de cada pixel é uma quantidade de 8 bits, requer um Megabyte de espaço para armazenamento, caso a imagem não seja compactada.

Portanto, técnicas de processamento de sinais, como a TSR (*Thermographic Signal Reconstruction*), aumenta a faixa de profundidade que a Termografia Pulsada pode ser aplicada e também reduz a perda de nitidez das imagens com a aplicação das derivadas, ora ocasionada pela difusividade térmica lateral que é típica de imagens termográficas. No processo de redução das imagens, o ajuste polinomial através do TSR resulta no armazenamento apenas dos fatores polinomiais que, mediante uma equação polinomial reduzida, pode-se ser utilizados para reconstruir a imagem digital, implicando em redução da quantidade de espaço necessário para o seu armazenamento.

Este armazenamento pode ser dividido em três categorias: (1) armazenamento de curta duração de uma imagem, enquanto ela é utilizada nas várias etapas do processamento, (2) armazenamento de massa para operações de recuperação de imagens relativamente rápidas, e (3) arquivamento de imagens, para recuperação futura quando isto se fizer necessário (OGÊ, 1999).

Consequentemente, durante o processamento a compressão possui grande relevância, principalmente focado na seleção dos dados que são importantes para uma determinada análise ou aplicação. Neste sentido, o processamento da imagem digital e o seu armazenamento dependerá da finalidade que este processo solicita, sendo possível identificar diversos parâmetros e extrair informações relevantes para análises.

3.9.3 PROCESSAMENTO

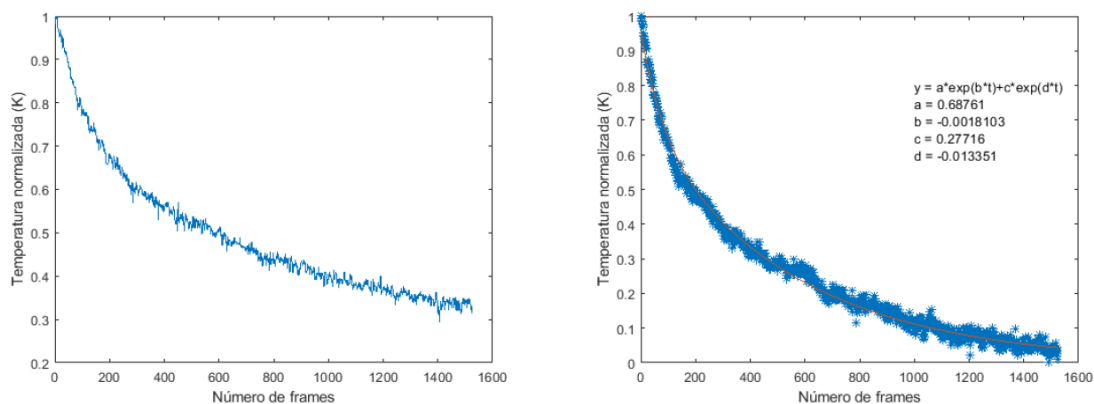
O processamento de imagens digitais envolve procedimentos normalmente expressos sob forma algorítmica (OGÊ, 1999). Portanto, a maioria das funções matemáticas aplicadas em

imagens digitais são empregadas via *software*. O modelo desenvolvido por SILVA (2020) para reduzir o sinal termográfico em quatro parâmetros (a , b , c e d) foi a equação exponencial (14).

$$y = a \cdot e^{-bt} + c \cdot e^{-dt} \quad (14)$$

Pode-se notar que os parâmetros b e d estão acompanhados do sinal negativo, isto sugere que a temperatura do corpo está diminuindo com o passar do tempo, referindo-se ao resfriamento. Após validar o método para um pixel temporal, aplicou-se em toda a matriz temperatura utilizando recursos do Matlab®, sendo utilizada as seguintes funções: Flir Atlas SDK for Matlab® - para extrair do vídeo a matriz temperatura; *Curve Fitting* - para modelar as ideias iniciais e modelar os demais pixels, na Figura 18, verifica-se a função *Toolbox for Matlab®* e a função *polyfit*, respectivamente; para tratamento das imagens foram usadas as funções da *Image Processing Toolbox for Matlab®*.

Figura 18: Comportamento da fase de resfriamento de um pixel utilizando a função *Curve Fitting*.

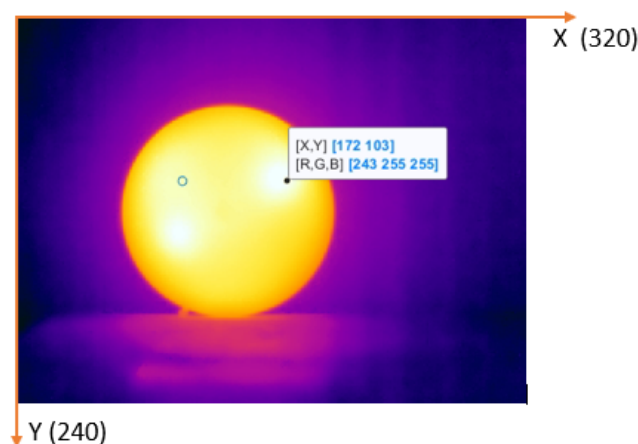


FONTE: SILVA, 2020.

3.9.4 EXIBIÇÃO

O *hardware* responsável por apresentar as imagens digitais são os monitores ou telas, eles são essenciais para um sistema de processamento de imagens. Possuem normalmente capacidade de reprodução de 256 cores distintas. Na Figura 19, pode-se observar o ponto [172, 103] e as informações dos canais R, G e B.

Figura 19: Modelo de imagem digital com paleta de cor *Iron*.



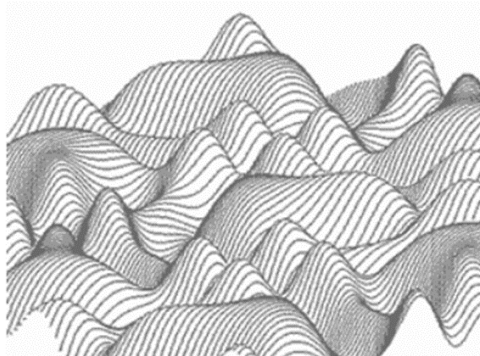
A câmara infravermelho captura em 4 canais referente ao RGB (vermelho, verde e azul) e por pixel apresenta a intensidade térmica referente a temperatura naquele ponto da imagem, representando a intensidade luminosa ou brilho.

Matematicamente a imagem digital é construída matricialmente considerando o eixo x e y da forma apresentada na Figura 19. Este é um exemplo da imagem termográfica com paleta de cor Iron, onde para cada localização dos pixels (x,y) temos uma intensidade luminosa.

$$F(x,y) = I(x,y) \quad (15)$$

O brilho $I(x, y)$, quantização, está normalmente no intervalo $[0, 2b - 1]$, onde b é o número de bits por pixel necessário para seu armazenamento (profundidade da imagem). Exemplo, para $b = 8$, temos 256 níveis de cinza $\rightarrow [0, 255]$. Seja $F(x, y)$ uma função contínua da reflexão de luz no espaço R^2 , temos que uma imagem no espaço contínuo, nada mais é do que essa função, na qual seu gráfico é uma superfície, nas quais o eixo de Z mostra a intensidade de brilho da coordenada (x, y) da imagem como é possível verificar na Figura 20.

Figura 20: Representação da imagem 2D como uma função em R^2 .



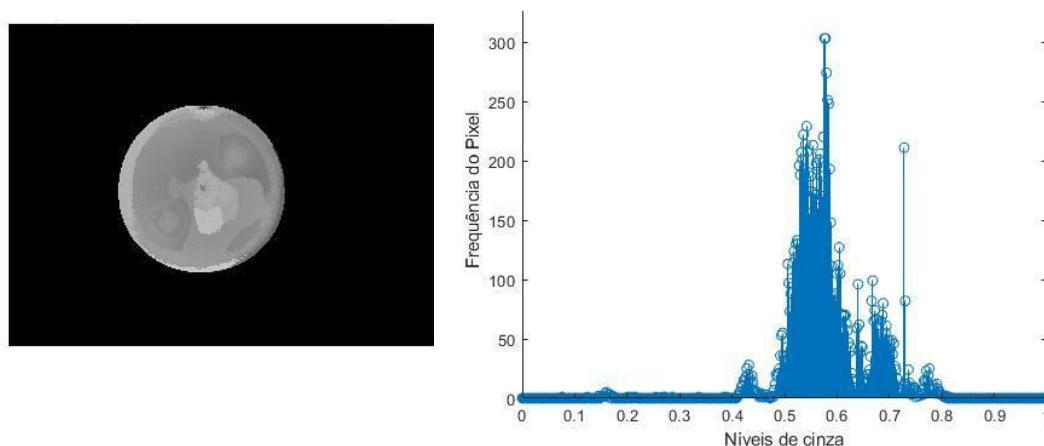
FONTE: MARTINS, sem data.

Porém, como uma imagem contínua não existe na “vida real”, pois primeiro que o computador no caso não consegue mapear infinitos valores. Segundo porque, no contínuo, podemos pegar qualquer valor para as coordenadas, o que seria inviável. Terceiro porque a capacidade humana de processar as imagens é limitada, portanto, não haveria necessidade de um mapeamento completo se sequer é possível verificar as diferenças visuais pelo humano, considerando que a aplicação da tecnologia possui o foco de gerar imagem para humanos processarem.

3.9.5 HISTOGRAMA

O histograma mostra a frequência dos valores de brilho da imagem, ou seja, a quantidade de luz presente na imagem. O histograma é uma representação de quantos pixels contém determinado nível de cinza, podendo também ser estendido para imagens RGB.

Figura 21: Exemplo de histograma em imagem na escala de cinza.



Através do histograma é possível tirar conclusões sobre as imagens. Na Figura 21, pode-se visualizar a distribuição dos níveis de cinza, se a maioria dos pixels estiver nos níveis mais altos de cinza, a imagem é predominante clara. Analogamente, se muitos pixels estão em níveis baixos de cinza a imagem é mais escura, portanto os dois casos são imagens de baixo contraste. A imagem com bom contraste é aquela com pixels distribuídos por todos os níveis de cinza (OGÊ, 1999).

3.9.6 SEGMENTAÇÃO E LIMIAÇÃO

A segmentação transforma uma imagem com diferentes níveis de cinza em uma imagem binária, onde o objeto de interesse fica destacado em relação ao restante da imagem (SILVA, 2014). Porém, antes é necessária a etapa de limiarização. A limiarização envolve um processo que resulta em separar a imagem em duas classes: o fundo (*background*) e o objeto de interesse.

O processo consiste em, a partir da análise do histograma, estabelecer um nível de cinza chamado (Th), proveniente do inglês “*threshold*” que é o limiar. Pixels com valores de cinza maiores ou iguais ao valor de (Th) serão convertidos em branco, ou seja 1, e o restante deles em preto, logo em 0. Ao final, haverá uma imagem binária de fundo preto com objetos de interesse brancos. Com esta imagem binária é possível realizar uma multiplicação pela matriz temperatura e zerar ou remover todos os dados presentes no fundo de cada frame, ou seja, fora da região de interesse.

3.9.7 DETECÇÃO DE BORDAS

O processo de detecção de bordas permite a análise de descontinuidades nos níveis de cinza de uma imagem. As mudanças bruscas de intensidade de uma imagem são as bordas. Essas mudanças geralmente correspondem a mudanças físicas em alguma propriedade da superfície dos objetos (Bovik, 2009).

Um algoritmo de detecção de bordas deve mostrar as localizações das bordas principais da imagem, ignorando as bordas falsas causadas pelo ruído (ALAN *et al.*, 2000). As bordas na imagem de interesse caracterizam os contornos dos objetos nele presentes, sendo úteis para a segmentação e identificação de objetos na imagem. As bordas podem ser entendidas como as posições dos pixels vizinhos com mudanças bruscas de níveis de cinza.

Há diversos métodos de detecção de borda por filtros espaciais, baseado no conceito de gradiente de funções bidimensionais, tais como os gradientes de Roberts, Prewitt e Sobel (BATISTA, 2005), além da possibilidade do uso da Transformada Wavelet para detecção de bordas (WALKER, 1999). Alguns pesquisadores como o Grys *et al.* (2014) utilizaram o detector de bordas com alguns operadores para identificação de falhas.

4. ESTADO DA ARTE

A termografia ativa se tornou amplamente aceita como técnica de inspeção tanto para produção quanto para manutenção de materiais poliméricos e cerâmicos aplicados em diversas áreas da indústria, segundo Shepard (2007). Este método se baseia em aplicar um pulso térmico para aquecer superficialmente amostras e verificar a resposta térmica através do uso de uma câmera termográfica que captura a radiação infravermelha. Na literatura, diversos autores utilizam um pulso curto de luz como forma de aquecimento das amostras, são eles: Balageas *et al.* (1987); Ibarra-Castanedo *et al.* (2009); Lahiri *et al.* (2012); Rodríguez-Martín *et al.* (2014) e Fernandes *et al.* (2016). Este método fica caracterizado como termografia ativa pulsada, denominação proveniente da forma de excitação térmica.

Szymanik *et al.* (2019) indica que uma das vantagens básicas da termografia ativa é a sua versatilidade, pode ser usado para a maioria dos materiais. Dentre os materiais utilizados para ensaio, pode-se citar a poliamida (Carvalho, 2019), o CFRP (*carbon fiber-reinforced polymer*) estudado pelos autores: Madruga *et al.* (2010); Peeters *et al.* (2017); Silva (2020); e Wang *et al.* (2022), favos de mel (Ibarra-Castanedo *et al.*, 2009) e até artefatos arqueológicos estudados por Mercuri *et al.* (2011).

Existem outras formas de excitação, como a termografia *lock-in* que depende da frequência da fonte de excitação e as análises apresentam informações sobre a amplitude e defasagem angular, sendo importante conhecer as características técnicas do sinal e excitação térmico ou elétrico para comparar com a resposta térmica obtida. Lahiri *et al.* (2012) realiza também o estudo para a abordagem *lock-in*, onde apresenta as frequências ideais para diferentes espécimes determinadas experimentalmente. Fernandes *et al.* (2016) realiza teste para termografia ativa pulsada, vibrotermografia e termografia de varredura de linha (*thermography scan line*). Esta última apresentada apenas por este autor.

Variantes da termografia ativa pode ser verificada em Machado (2022) que traz um novo método denominado termografia ativa dupla, buscando como objetivo aumentar o contraste térmico dos corpos de provas através da aceleração do resfriamento. Utilizou-se um fluido na parte posterior da peça sob ensaio para agilizar o processo de troca térmica. O objetivo do autor consiste em aumentar o contraste de temperatura dos defeitos e antecipar o momento de máximo contraste, além de possibilitar a identificação de defeitos intermediários, fracamente visíveis pelo procedimento convencional de resfriamento.

Para desenvolvimento dos estudos térmicos é possível utilizar modelos numéricos através de softwares como o COMSOL *Multiphysics* e o ANSYS, apresentados pelos autores: Peeters *et al.* (2017); Vilaro (2018); Carvalho (2019); Stoynova (2020) e Gomboc *et al.* (2021). Os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa subsidiaram as simulações numéricas desenvolvidas por Henriques (2023).

Rodríguez-Martín *et al.* (2014) analisam o resfriamento térmico para detecção de rachaduras em soldas utilizando termografia ativa pulsada. O método desenvolvido realiza o aquecimento utilizando uma fonte térmica por efeito Joule, inspirando os experimentos realizados neste trabalho. Através do processamento de linhas de contorno aplicadas no Matlab os pesquisadores conseguem caracterizar e identificar os defeitos nas soldas.

Klein *et al.* (2008) apresentam as funções e técnicas de processamento integradas ao IR-View que é um *software* desenvolvido no Matlab gratuito e de código aberto que foi lançado em 1998 na *Computer Vision and Systems Laboratory* (CVSL) na Université Laval, Canadá. Este *software* possui uma interface gráfica que facilita as necessidades comuns e recorrentes para análise dos dados em ensaios de termografia pulsada.

Esta interface gráfica assemelha-se com a desenvolvida por Freitas (2018) que é utilizada neste trabalho para realizar as análises de pré-processamento através da visualização dos frames, ajuste da paleta de cor, ajuste do valor da emissividade, verificação da resposta térmica de um pixel no tempo, entre outras funções. O *software* ainda possibilita a realização da reconstrução do sinal termográfico, detecção de bordas, correção e aplicação de filtros.

Silva (2019) desenvolveu um algoritmo de processamento de dados radiométricos obtido por termografia ativa pulsada. O objetivo do algoritmo é detectar regiões defeituosas em materiais utilizando como base a técnica de reconstrução de sinais termográficos e os princípios físicos de transferência de calor. Devido ao volume de dados, a primeira etapa do algoritmo é a compactação.

As principais contribuições do algoritmo desenvolvido são: compactação, utilização do conceito de mudança no sentido do fluxo de calor para delimitar as bordas das regiões de interesse, detecção das bordas/interface entre o objeto e o fundo da imagem, consolidação em uma única imagem, agregando os indicadores referentes ao conceito de constante de tempo de resfriamento/aquecimento, de máxima temperatura de cada pixel e do contraste máximo.

5. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO EXPERIMENTAL

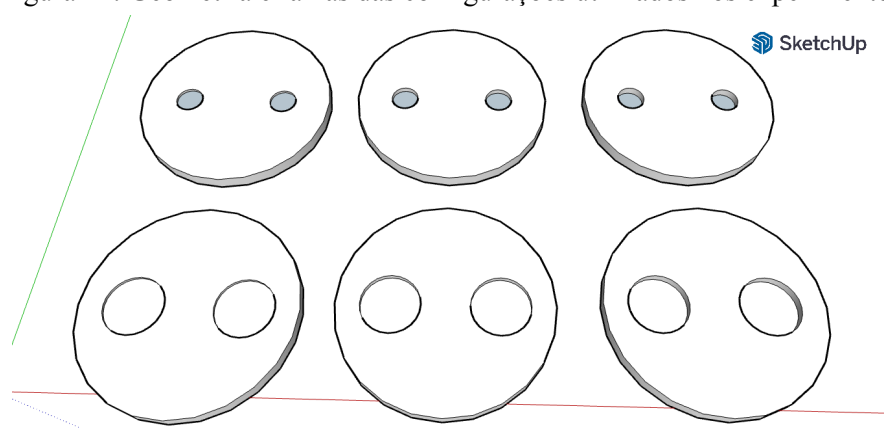
Nesta seção apresentam-se os materiais e os métodos utilizados na realização do procedimento experimental desenvolvido durante os experimentos. Durante o procedimento experimental foi utilizado a câmera FLIR T420 para aquisição dos termogramas. Os ensaios foram realizados dentro de uma câmara escura e as amostras utilizadas são de polipropileno. Foi aplicado o modo reflexão para realizar a captura dos termogramas, onde registrou-se o resfriamento da face que entrou em contato com a fonte térmica.

Ainda nesta seção há detalhes sobre a fonte térmica proposta, suas características elétricas e térmicas, a curva de aquecimento e a distribuição superficial. Apresenta-se as características técnicas do controlador de temperatura usado para controle da fonte térmica e ajustes dos parâmetros.

5.1 AMOSTRAS

As amostras são constituídas do polímero denominado polipropileno ou polipropeno. É um material que pode ser reciclado e que possui uma vasta aplicação na indústria.

Figura 22: Geometria e falhas das configurações utilizados nos experimentos.

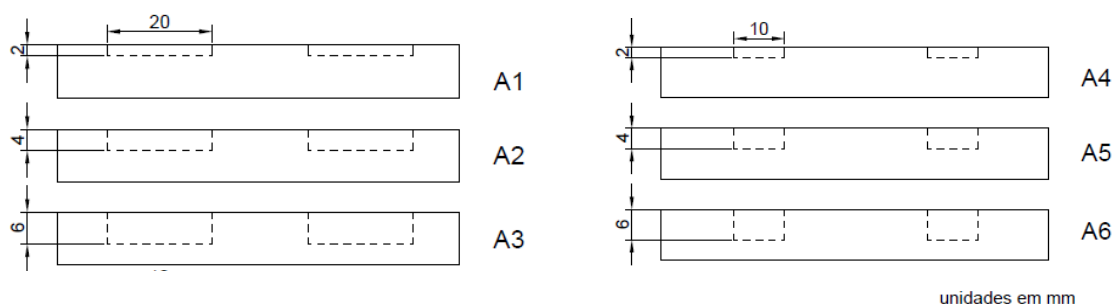


Na figura 22, mostra-se o desenho dos corpos de prova cilíndricos com defeitos de geometria circular neles fabricados, notadamente a configuração mais elementar possível, sob o ponto de vista de modelagem.

Na Figura 23, observa-se as dimensões das amostras, profundidade e diâmetro das falhas, bem como a nomenclatura utilizada para a identificação de cada amostra. A face sem

defeito da superfície é constituída por completo do material. E a superfície com defeito é o lado que existem as falhas ou buracos.

Figura 23: Dimensão e profundidade das falhas nas amostras A1, A2, A3, A4, A5 e A6.



As amostras A1, A2 e A3 possuem falhas com diâmetro de 20 mm e as amostras A4, A5 e A6 possuem falhas com diâmetro de 10 mm. As espessura das falhas são de 2, 4 e 6 milímetros, que resulta em profundidade em relação a superfície de análise de 8, 6 e 4 milímetros. As diferentes profundidades dos defeitos apresentam respostas térmicas diferentes, e serão analisadas a seguir.

O polipropileno possui um fator de incompatibilidade térmica interessante em relação ao material da falha que é o ar. Segundo Grys (2012) este fator é um indicador adimensional limitado pelo intervalo de $(-1, 1)$ e seu valor absoluto e sinal caracterizam o grau e a característica da diferença da propagação térmica entre dois materiais. O polímero selecionado possui um fator de incompatibilidade térmica próximo a -1 quando comparado ao material da falha, o ar. A descrição dos cálculos realizados para definição do fator de incompatibilidade térmica estão presentes no apêndice B e C. A superfície sadia é a área que entra em contato com a superfície da fonte térmica proposta. A capacidade da termografia ativa identificar uma falha depende da razão entre o diâmetro e a profundidade, que deve ser maior que 2 segundo Grys (2012). Outros autores consideram esse valor de 1,5, na tabela 2, verifica-se esta relação.

É possível notar que os corpos de provas A4 e A5 apresentam valores menores que 2, sendo um indicativo que a capacidade de identificação das falhas estará comprometida na análise dessas amostras. E isso pode ser verificado no apêndice D com a apresentação dos resultados experimentais. Inclusive, como a amostra A5 possui valor abaixo de 2, mas não muito, este ainda é fracamente detectável. Já a amostra A4 a capacidade da técnica de detectar fica realmente comprometida.

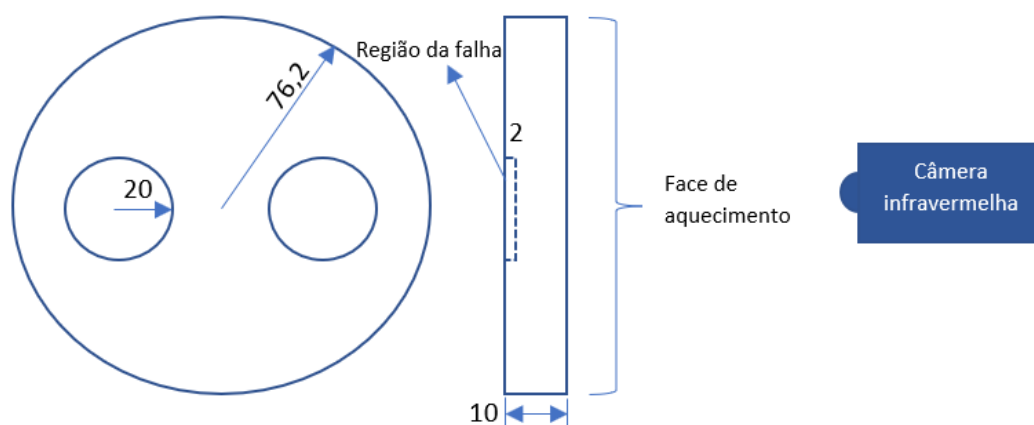
Tabela 1: Capacidade de visualização do defeito em função do diâmetro e da profundidade da falha.

Corpo de prova	Diâmetro	Profundidade	$\frac{\text{Diâmetro}}{\text{Profundidade}} > 2$
A1	20	8	2,5
A2	20	6	3,3
A3	20	4	5
A4	10	8	1,25
A5	10	6	1,67
A6	10	4	2,5

Na Figura 24, observa-se detalhes da amostra A1. Todas as amostras possuem duas falhas no formato circular. É possível observar a face de aquecimento e o posicionamento da câmera infravermelha. Aplicou-se o método de reflexão, onde registou o resfriamento térmico superficial da face aquecida, em todos os procedimentos realizados. O método de transmissão não foi utilizado por causa da característica da fonte térmica proposta de requerer o contato superficial.

Existiam duas condições para aplicar a transmissão: a) aquecer o lado sadio e gravar a face com os defeitos, neste caso foi desconsiderado porque os defeitos estariam expostos; e b) aquecer o lado com as falhas e registrar o resfriamento na face lisa, como a fonte é por contato apenas parte da superfície entraria em contato com a fonte e este método não foi aplicado.

Figura 24: Dimensões da amostra A1 e face de aquecimento.



Um sistema termográfico foi usado para observar a superfície frontal sendo excitado com fonte térmica externa, apresentado na figura 25. O polipropileno é um material translúcido e para garantir condições satisfatórias da inspeção infravermelha, a superfície testada foi coberta com tinta preta fosca de alta emissividade ($\epsilon > 0.9$). O aquecimento foi

realizado com uma superfície aquecida por resistência elétrica com a utilização do controlador de temperatura para manter a temperatura constante.

Figura 25: Estrutura de aquecimento.



A superfície da fonte térmica foi montada sobre um suporte de madeira nivelado simetricamente em ambos os lados, resultando em um nível adequado para que a amostra seja colocada sobre a superfície e obtenha uma condução térmica o mais homogênea possível entre as superfícies, fonte térmica e a amostra sob análise.

Observou-se nos experimentos que a utilização de uma fina película de água ajuda na melhor distribuição térmica entre as superfícies. Entretanto, como o objeto deste estudo é verificar o resfriamento nos primeiros instantes, o procedimento de retirada dessa película de água após o aquecimento inserida ao método causou muitos distúrbios os quais impossibilitaram a verificação da curva de resfriamento. E portanto, este método não foi utilizado, apesar de ter sido testado.

5.2 CÂMERA TERMOGRÁFICA

A câmera utilizada foi a FLIR T420 do laboratório de engenharia e energia (LABENGE) do departamento de Engenharia Mecânica da UFS, apresentada na Figura 26. A tabela 3 apresenta as suas especificações técnicas. O sistema de termovisão consiste de uma

câmera térmica conectada à interface GUI Flir Atlas SDK *for* MATLAB para interligar a câmera ao computador e registrar o comportamento térmico no tempo.

Figura 26: Câmera FLIR T420 utilizada no procedimento experimental.

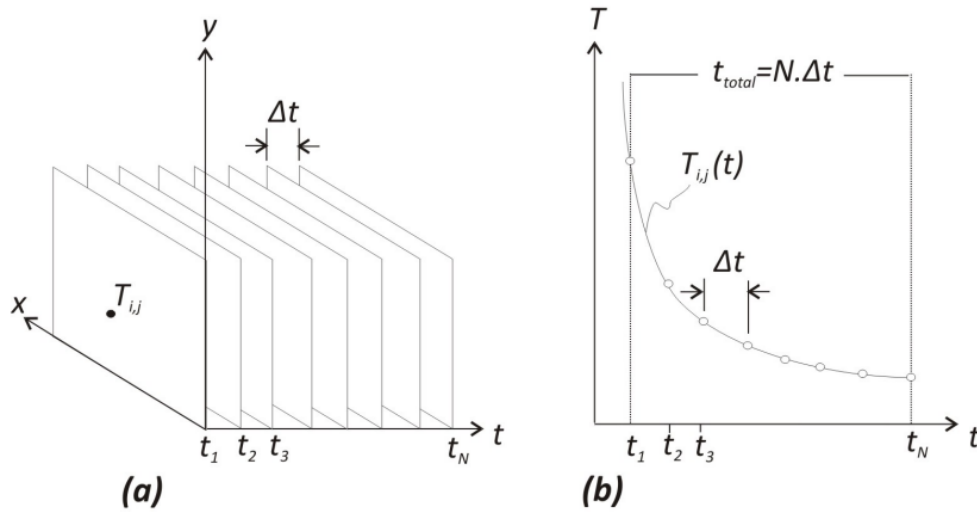


Tabela 2: Especificações técnicas da câmera infravermelha (FLIR T420).

Especificações técnicas	Descrição
Fabricante	Teledyne FLIR
Modelo	FLIR T420
Faixa de temperatura	-20°C a 1200°C
Distância Mínima do Foco	0,4m
Foco	Manual/automático
Sensibilidade Térmica (N.E.T.D)	<0,045°C a 30°C
Tipo do Detector	Matriz plano focal (FPA) microbolômetro não refrigerado 320 x 240 pixels
Faixa Espectral	7,5 a 13µm
Tela Tela sensível ao toque	3,5", LCD, colorida
Classificação do Laser / Tipo	Classe 2 / Laser Semicondutor de AlGaInP Diodo: 1mW/635nm (na cor vermelha)
Dimensões / Peso	106x201x125mm /880g, com bateria inclusa
Taxa de aquisição	30Hz

As sequências de termogramas registram o processo de resfriamento de cada experimento. Posteriormente o vídeo é convertido em uma matriz térmica usando o MATLAB resultando em uma dimensão de 320x240x9000 no formato *double*. Pode-se observar na Figura 27 a estrutura dos dados em 3D (a) e a curva de resfriamento da temperatura por pixel no tempo (b).

Figura 27: Estrutura dos dados. (a) Matriz 3D de temperatura no domínio do tempo e (b) curva de decaimento da temperatura de um pixel com/sem defeito em coordenadas (i,j)



Fonte: RODRIGUES, 2010.

5.3 CÂMARA ESCURA

A câmara escura, apresentada na figura 28 (a), é um aparato experimental importante para aquisição dos sinais infravermelhos porque minimiza interferências de fontes externas. O ambiente de realização dos ensaios possui controle térmico através de um ar-condicionado que fica sempre ligado, mantendo a sala em 23°C. Também é uma estrutura importante para garantir a repetibilidade dos experimentos realizados em diferentes momentos.

A configuração experimental é apresentada na figura 28 (b), onde pode-se verificar a posição da câmera termográfica, a superfície da fonte térmica juntamente com o varivolt e controlador de temperatura, e posição da amostra sobre a superfície de aquecimento. Pode-se constatar o suporte para a amostra, posicionada verticalmente alinhada com o foco da câmera, ajustada à distância focal da câmera.

A configuração experimental foi montada dentro da câmara escura de forma a possibilitar agilidade no manuseio da amostra durante os experimentos e diminuir os ruídos provenientes do ambiente, mitigando o máximo possível a interferência de outras fontes como luz artificial e natural.

Figura 28: Câmara escura utilizada nos ensaios experimentais.

a) Câmara escura;

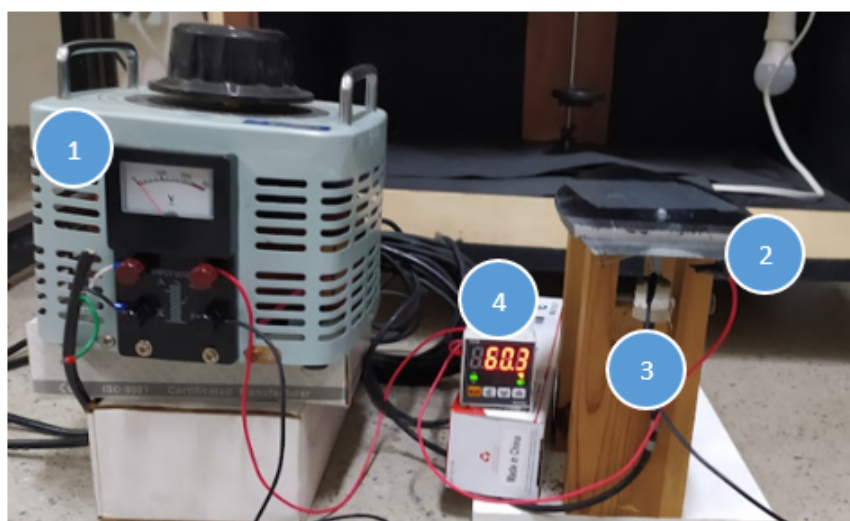
b) Configuração experimental.



5.4 FONTE TÉRMICA

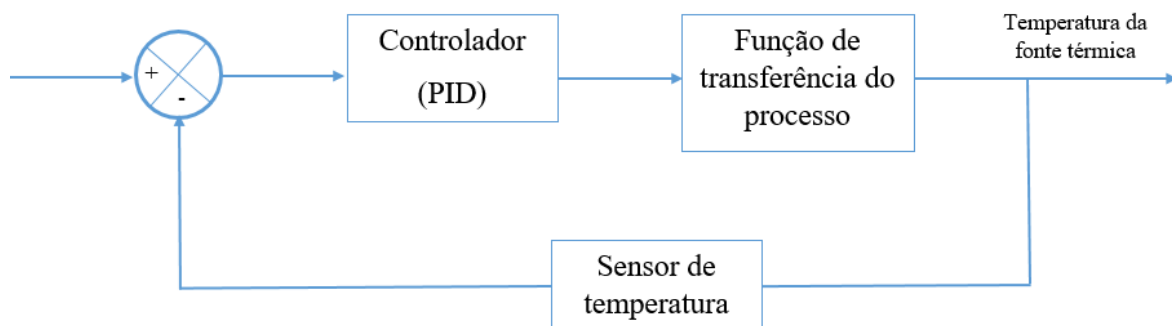
Dentre as características que distinguem o método de termografia ativa, a forma de aquecimento do corpo de prova é um dos fatores importantes, por isso neste trabalho buscou-se elaborar um sistema de aquecimento alternativo para aplicação do pulso térmico.

Figura 29: *Setup* da fonte térmica.



Esse sistema de aquecimento tem como principal atribuição aquecer a amostra por contato, sendo uma abordagem não comum na literatura. A fonte térmica é formada por um varivolt (1), uma resistência elétrica (2), um sensor de temperatura PT-100 (3) e um controlador de temperatura (4). Na Figura 29, observa-se o sistema da fonte térmica utilizado. O diagrama de bloco que representa o controle da temperatura de saída da fonte térmica está apresentado na figura 30. Pode-se observar que apesar de considerarmos o controlador PID, é importante salientar que o controlador de fato utiliza bandas de controle que simulam os parâmetros proporcional, integral e derivativo que são detalhados na seção a seguir.

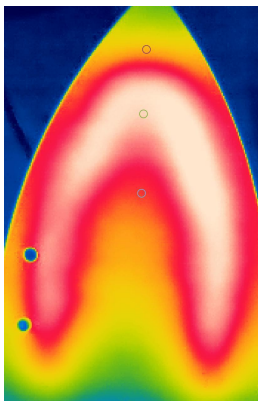
Figura 30 Diagrama de bloco da conexão.



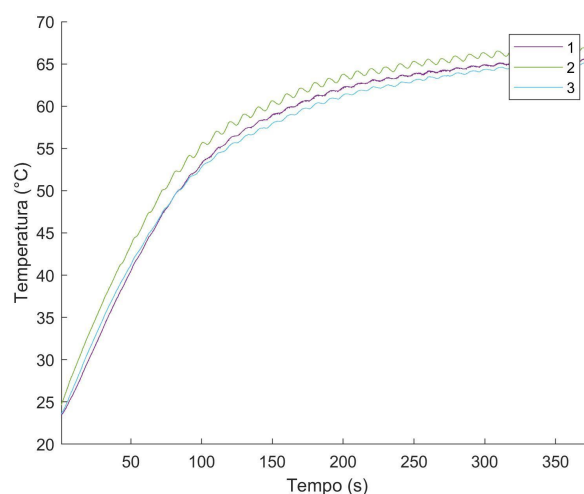
A amostra mantém contato com a chapa metálica com uma temperatura ajustada no controlador durante um período determinado, o que é caracterizado como um pulso longo. Foram registrados termogramas durante o estágio estacionário e o período de aquecimento da fonte térmica, os quais pode-se verificar na figura 31.

Figura 31: Termograma de aquecimento da fonte térmica.

a) Formato da resistência do ferro;



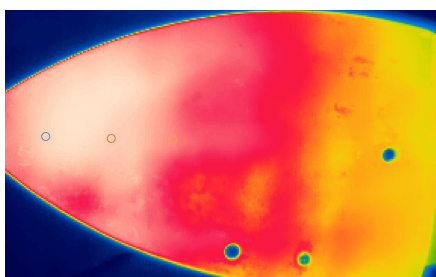
b) Curva de aquecimento com três pontos apresentados.



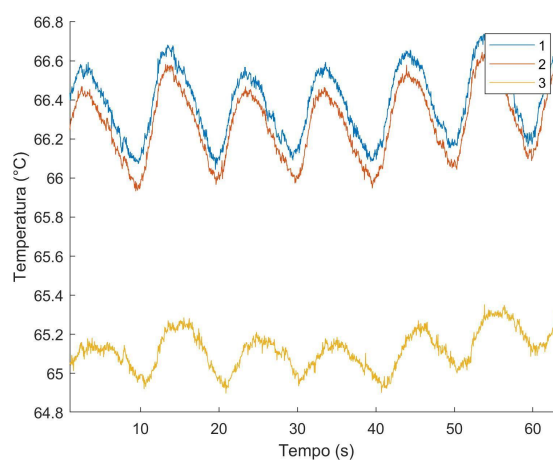
Pode-se constatar com as condições de funcionamento que a fonte precisa de aproximadamente 300 s para entrar no período estacionário, onde o controlador consegue manter o nível ajustado de temperatura. Na Figura 32 a) verifica-se a distribuição térmica da resistência na chapa metálica, sendo resultado dos aspectos construtivos dessa resistência, a figura 32 b) apresenta-se a resposta térmica de três pixels em diferentes posições. Pode-se notar a variação da temperatura em função da atividade do controlador utilizado. Existem uma faixa de máximo e mínimo no tempo.

Figura 32: Comportamento térmico da fonte no estágio estacionário.

a) Distribuição térmica após o aquecimento;

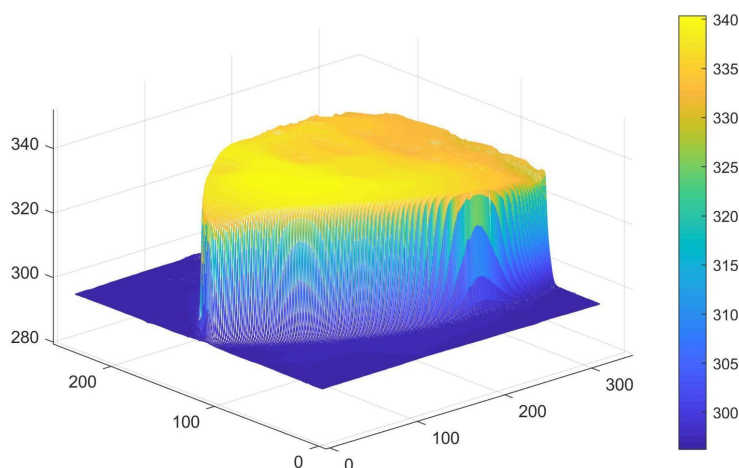


b) resposta térmica.



Os valores de temperatura estão ajustados para uma emissividade apresentada na tabela 1. Para realização da aquisição do termograma a chapa metálica de contato foi pintada com cor preta fosca. Característica do comportamento térmico da fonte com o aquecimento durante 300 segundos, apresentando o período estacionário. Verifica-se que o sinal térmico apresenta a variação do controlador térmico, desligando e ligando a resistência.

Figura 33: Uniformidade térmica em 3D da fonte de calor.

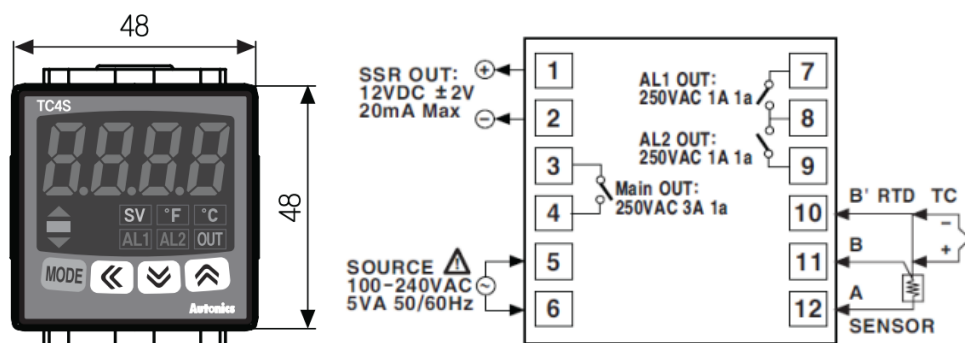


Na Figura 33, observa-se a distribuição térmica da fonte de aquecimento após o período de aquecimento. Verifica-se a distribuição térmica da fonte utilizada para aquecer as amostras. Importante salientar a uniformidade térmica apresentada pela fonte após o período de aquecimento.

5.5 CONTROLADOR TC4S-14R

Utilizou-se o controlador térmico TC4S-14R da Autonics para controlar a temperatura superficial da placa de metal do ferro. Na parte frontal do controlador, observado na Figura 34, temos os itens de ajuste com os botões: MODE, move para o lado esquerdo, baixo e cima.

Figura 34: Visão frontal do controlador (TC4S-14R) com medidas e configuração Elétrica



FONTE: MANUAL DO FABRICANTE.

O esquemático elétrico apresenta uma saída de um relé de estado sólido (SSR - *state solid relay*), sendo o sinal de comando desse relé constituído por semicondutores (terminais 1 e 2). E temos em seguida a principal saída com limite máximo de tensão 250V em corrente alternada e 3A de corrente máxima (terminais 3 e 4). No final da primeira coluna temos a entrada da fonte de energia com limite de 100-240V em corrente alternada 50/60Hz (terminais 5 e 6) do lado esquerdo.

Tabela 3: Características do controlador de temperatura.

Sensores de Temperatura		Display	Faixa de Trabalho
Termopar	K (CA)	℄CA	(-50 ~ 1200°C)
	J (IC)	JIC	(-30 ~ 500°C)
RTD (PT100)	DIN	Pt 1	(-100 ~ 400°C)
		Pt 2	(-100.0 ~ 400.0°C)

A segunda coluna contém três terminais (7, 8 e 9) dedicados à conexão de sinais de alerta podendo ser sonoro ou luminoso. E por fim os terminais (10, 11 e 12) dedicados a conexão do sensor. Selecionamos o tipo do sensor utilizado, neste caso o pt2 para considerar a faixa de ajuste com uma casa decimal.

O controlador possui a possibilidade de ajuste de controle: On-Off, P, PI, PD ou PID (proporcional, integrativo e derivativo), com ajustes disponíveis da banda proporcional de 0.1 a 999.9°C, tempo integral e derivativo de 9999s. E ajuste do tempo do controle periódico de 0.5 a 120s. O controle de temperatura é realizado através de um sensoramento da temperatura real e do ajuste (*setpoint*) de um valor desejado. O controlador irá fechar e abrir o contato de saída que alimenta a resistência da fonte térmica, buscando manter o mais estável.

A parcela proporcional controla a aproximação do valor medido pelo sensor em função do setpoint, o tempo integrativo suaviza no momento de energização e desenergização, como se atuasse como uma rampa de tensão e por fim o tempo derivativo busca atenuar o erro acumulados na parcela integrativa, suavizando ainda mais o ajuste.

O valor ajustado da banda proporcional foi de 14,3, o tempo integral com o valor de 219s e o derivativo com 45s. Além de ajustado o tempo do controle periódico de 20s. Estes valores proporcionaram à fonte térmica uma variação de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ do valor de *setpoint*.

Temos que levar em consideração também a relação de transferência de calor entre a fonte térmica e as amostras. Durante o procedimento experimental era passível a observação da diminuição da temperatura no instante inicial do contato. Mas logo em seguida, o controlador sensibilizado pelo sensor identifica alterações e libera mais energia elétrica para manter a fonte térmica no valor configurado. Os ensaios foram desenvolvidos no LABENGE - Laboratório de Engenharia e Energia do Departamento de Engenharia Mecânica da UFS. Os valores utilizados durante todos os ensaios estão resumidos na Tabela 4.

Tabela 4: Valores estabelecidos durante os ensaios.

<i>Descrição</i>	<i>Valores utilizados</i>
<i>Distância câmera-amostra</i>	0,4m
<i>Tempo de aquecimento</i>	60, 120 ou 180s
<i>Tempo de captura dos termogramas</i>	300s
<i>Profundidade das falhas</i>	8, 6 e 4mm
<i>Sensor de temperatura</i>	PT-100
<i>Varivolt</i>	50V
<i>Resistor</i>	13,5 Ohms
<i>Emissividade</i>	0,95
<i>Temperaturas da fonte térmica</i>	60, 70 e 80 °C

5.6 MÉTODOS

Na tabela 4, verifica-se os dados considerados seguindo as orientações encontradas na literatura e pelo fabricante da câmera. Primeiramente, estabeleceu-se a distância focal da câmera. Foram considerados o tempo de aquecimento inicial de 60s, considerando que o aquecimento por contato é mais demorado e porque o material possui uma difusividade térmica baixa, portanto sendo necessários um maior tempo para que a amostra receba um gradiente expressivo de temperatura.

Pôde-se notar que períodos muito prolongados resultam em uma estabilidade térmica não desejada para aplicação da técnica, onde o contraste térmico é necessário para constatação dos defeitos. Este aspecto é bem diferente quando se trata de uma fonte luminosa que o tempo de aquecimento é bem rápido. O tempo de captura dos termogramas foi considerado baseado em RODRÍGUEZ-MARTÍN *et al.* (2014), e durante os experimentos pode-se constatar que era suficiente para identificação da curva de resfriamento.

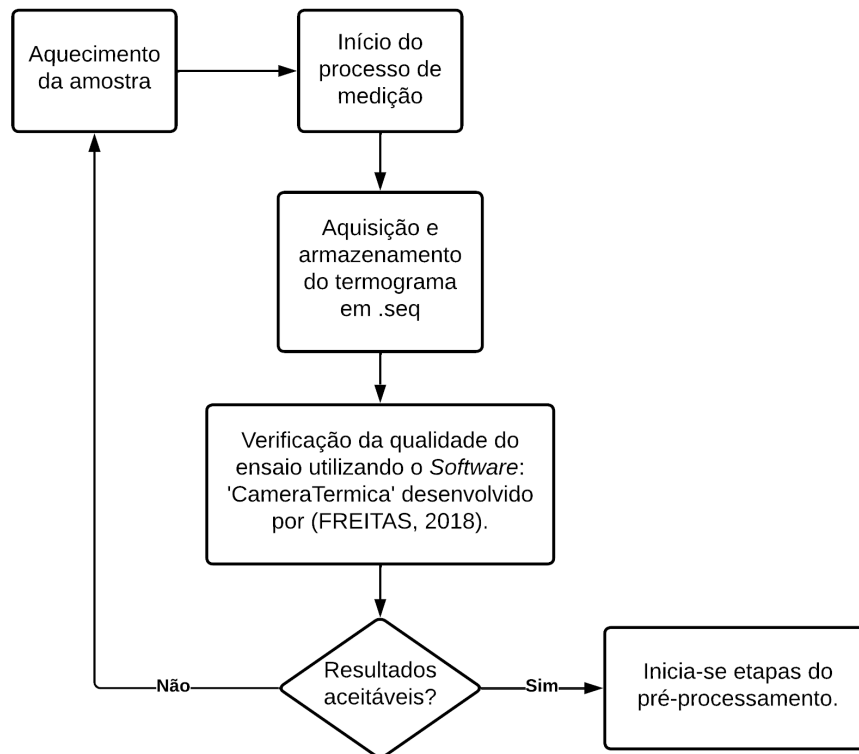
Para realização dos ensaios térmicos e com o intuito de simular falhas com profundidades e diâmetros diferentes foram utilizadas amostras desenvolvidas por MELO (2019), devido à disponibilidade dos exemplares no laboratório, bem como por conter defeitos controlados, com dimensão e localização conhecidas. O procedimento experimental foi realizado seguindo os passos descritos a seguir:

1. Energização da fonte térmica;
2. Temporiza 5 minutos para atingir o equilíbrio térmico da fonte;
3. Montagem da configuração de aquisição dos termogramas e interface com o computador;
4. Inserção da amostra sobre a superfície de aquecimento;
5. Cronometrar o tempo de aquecimento;
6. Após a finalização do tempo de aquecimento, que é controlado, retira-se a amostra do contato com a fonte térmica, prendendo-a pelas bordas e o mais rápido possível, coloca-a sobre um suporte dentro da câmara escura;
7. Iniciar a gravação do termograma.

O método desenvolvido consiste no passo-a-passo do procedimento experimental desenvolvido, sendo o objetivo controlar o tempo e a temperatura de aquecimento das amostras através do contato com a superfície da fonte térmica aquecida por efeito Joule. Após iniciar a aquisição dos dados, o termograma de resfriamento é registrado durante o tempo

apresentado na Tabela 4. Após este período, a metodologia apresentada no fluxograma da Figura 34, observa-se o procedimento para decidir a qualidade do ensaio realizado, onde é verificado a aquisição das informações.

Figura 34: Fluxograma da metodologia empregada para os ensaios experimentais.



Às vezes ocorre mal contato na conexão entre a câmera infravermelho e o computador e algumas informações são perdidas, ou até mesmo no processo de foco da câmera existe também uma falha nos dados. No apêndice A são apresentadas algumas dessas falhas. Ao identificar as falhas nos resultados experimentais, o ensaio era realizado novamente. Caso contrário, iniciava-se com as atividades de pré-processamento, considerando que essa análise preliminar se considera como uma análise de pré-processamento.

Ao iniciar os experimentos, pode-se perceber que este tempo era suficiente para constatar a curva de resfriamento e verificar a semelhança com a Lei de Resfriamento de Newton. As amostras possuem falhas com mesmo formato, mas com diferentes profundidades e diâmetros. Este também é um ponto que se diferencia da literatura, tendo em vista que normalmente se produz uma única amostra com muitas condições de falhas. No caso desta pesquisa, por limitação, não foi possível construir uma amostra com as falhas intencionadas, portanto, utilizou as amostras já disponíveis no laboratório.

A fonte térmica final foi utilizando o varivolt com ajuste apresentado na tabela 1 e conectado à uma resistência de um ferro elétrico. Anteriormente foram desenvolvidos testes com duas placas Peltier e uma fonte de corrente contínua, mas o controle térmico era ineficaz e, portanto, buscou-se uma configuração mais consistente.

A emissividade apresentada na Tabela 1 só foi alcançada porque as amostras foram pintadas com tinta preta fosca, em razão do polipropileno ser translúcido no seu estado natural e a emissividade seria muito menor. Como o laboratório mantém uma temperatura 23°C, foi pensado em um degrau térmico suficiente para apresentar diferença de temperatura e considerando que o polipropileno possui uma baixa difusividade térmica, optou-se por considerar a temperatura de 60°C atingindo um valor de aprox. +37°C acima da temperatura ambiente.

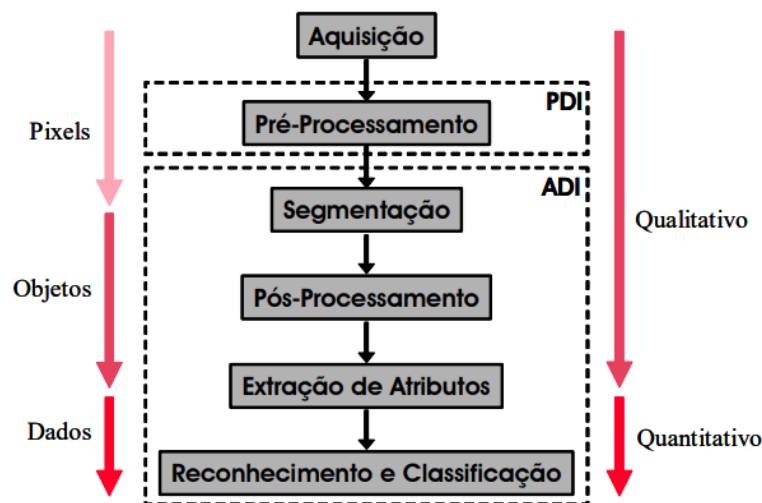
Com essa diferença de temperatura, foi possível observar o resfriamento unitário de um pixel no tempo. Também é possível verificar a trajetória de diferentes pontos da imagem termográfica gerada a fim de analisar as suas características. Ao utilizar um modelo, SILVA (2020) reduz o comportamento térmico do pixel no tempo, sendo a soma de duas exponenciais. As minúcias deste modelo são detalhados na próxima seção. Em seguida apresentam-se os resultados obtidos com os ensaios realizados.

5.7 PROCESSAMENTO DA IMAGEM TERMOGRÁFICA

O processamento de imagens tem como função facilitar a visualização da imagem ou adequá-la para análises quantitativas através de correções de defeitos ou realces das regiões de interesse, extração e tratamento de dados quantitativos, desenvolvidos através de um algoritmo (GOMES, 2001).

Consiste em um conjunto de etapas capazes de produzir informações qualitativas e quantitativas a partir de uma necessidade. As condições de aquisição, bem como do dispositivo sensível utilizado implicam na qualidade da imagem sob análise. A primeira etapa é a aquisição da imagem, como pode ser observado na sequência padrão de processamento (figura 35). A etapa seguinte é definida como pré-processamento que visa melhorar a imagem por meio de aplicação de técnicas, como a mediana para minimizar o ruído dos dados. Uma técnica comum para análise de imagens digitais é a segmentação da imagem buscando delimitar as regiões de interesse.

Figura 35: Sequência padrão de processamento e análise digital de imagens.



FONTE: PUC-Rio - Certificação digital Nº 1021510/CA.

O bloco do Processamento Digital da Imagem (PDI) é responsável pelo pré-processamento, o qual recebe a imagem original, saída do bloco Aquisição, e fornece uma imagem pré-processada. O bloco da Análise Digital de Imagem (ADI) realiza a extração de atributos e reconhecimento de padrões e classificação, recebe a imagem processada e fornece dados numéricos, constituindo-se na fase quantitativa do processo (GOMES, 2001).

As etapas de processamento utilizadas nesta pesquisa seguiram o diagrama apresentado na figura 36. Após a aquisição do termograma, o primeiro passo para desenvolvimento do processamento é a geração da matriz temperatura. A partir do vídeo termográfico os dados são transformados em uma matriz vetorial que contém as temperaturas para cada pixel distribuídos no espaço (x,y) em intervalos de 1/30 que é a frequência de amostra da câmera térmica.

Figura 36: Caminho do processamento simplificado.



Para detectar as falhas e quantificar a dimensão, aplicou-se algumas técnicas do campo de processamento de sinais. Como a normalização da matriz temperatura que será apresentada na seção a seguir. Utilizou-se também o filtro mediana para minimizar os ruídos comuns neste tipo de sinal. A delimitação da região de interesse foi aplicado o método Canny. Dividiu-se

esse processo em duas etapas, a primeira buscou-se encontrar a borda da área de interesse com o fundo da imagem, sendo utilizado para gerar uma imagem binária e excluir os dados do fundo da imagem. A segunda segmentação foi aplicada para identificar a região das falhas.

5.7.1 NORMALIZAÇÃO DA MATRIZ TEMPERATURA

A normalização da matriz temperatura faz uso dos mínimos e máximos globais para gerar uma matriz normalizada denominada $nTEMP$, que permanece entre 0 e 1, segundo a equação (15):

$$nTEMP = \frac{(TEMP - mn)}{(mx - mn)} \quad (15)$$

Sendo $TEMP$ a matriz temperatura, mn é o valor mínimo global de toda a matriz e mx o máximo global de toda matriz. Esta normalização é denominada ordinária. Utilizou-se também do artifício da normalização *pixel a pixel*, onde utilizou-se um mapa de máximo e mínimo para realizar a normalização de 0 a 1.

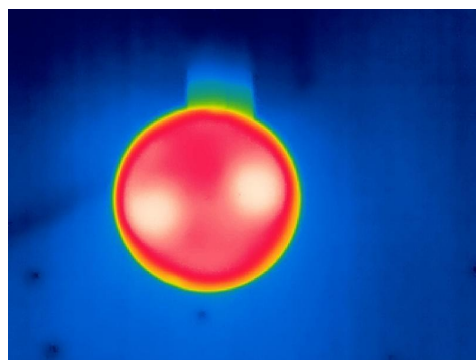
6. RESULTADOS E AVALIAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Nesta seção, é apresentada uma visão geral dos resultados alcançados. Primeiramente, apresenta-se a imagem em 2D, 3D e as linhas de contorno. Em seguida, verifica-se as respostas no tempo de uma região com falha e uma região sadia e as suas diferenças, em condições térmicas distintas (60, 70 e 80°C). Segue-se para o pós-processamento, onde se pode extrair e gerar informações a partir dos dados coletados. Calcula-se as bordas utilizando o método de *Canny*. Estratificando a região de interesse e da região da falha. O contraste térmico máximo é apresentado a seguir. Com os dados experimentais determina-se o tamanho relativo do pixel. Enfim, comprimiu-se os dados utilizando o modelo de resfriamento e a geração de uma imagem resultante, de forma a condensar todas as informações relevantes extraídas em uma única imagem.

6.1 PRÉ-PROCESSAMENTO

Durante o processamento do sinal foram utilizados a interface gráfica desenvolvida por Freitas (2018) detalhada no Anexo B. E as funções do MATLAB GUI (*graphic user interfaces*) para realizar as atividades de pré-processamento. Estas ferramentas possibilitam, durante as análises, visualizar os termogramas com a paleta de cor *Rainbow* apresentada na Figura 37, e localizar as áreas defeituosas visualmente.

Figura 37: Imagem térmica frame 1000 na paleta *Rainbow* do A2.

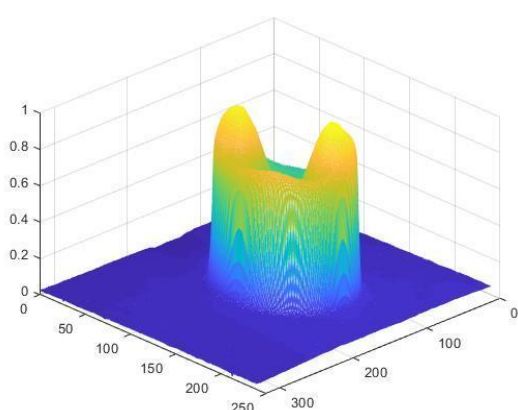


Pode-se observar a coloração em azul sendo o fundo da imagem e possuir menor temperatura. As bordas da amostra em tom amarelo-esverdeado demonstrando uma mudança abrupta de temperatura, e a região em vermelho que constitui a região de interesse. Sendo possível verificar na cor branca os dois furos da amostra A2 no frame 1000.

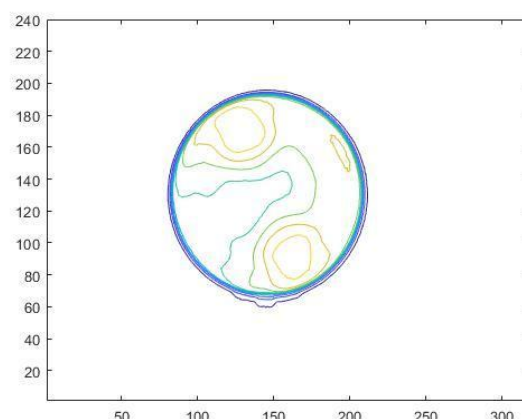
Ainda é possível plotar as imagens em 3D (Figura 38, a), identificar as linhas de contorno da área de interesse e das falhas (Figura 38, b), entre outras funções. Estas informações são úteis durante o processo experimental, pois apresenta o comportamento térmico do experimento realizado. Onde é possível identificar características como a homogeneidade da distribuição térmica, identificação de falhas, taxa de resfriamento e a característica tridimensional do comportamento térmico da amostra.

Figura 38: Função *mesh* do MATLAB do frame 1000 da imagem térmica normalizada.

a) Visualização em 3D do frame;



b) Linhas de contorno.



6.1.1 RESPOSTA BIDIMENSIONAL DOS TERMOGRAMAS

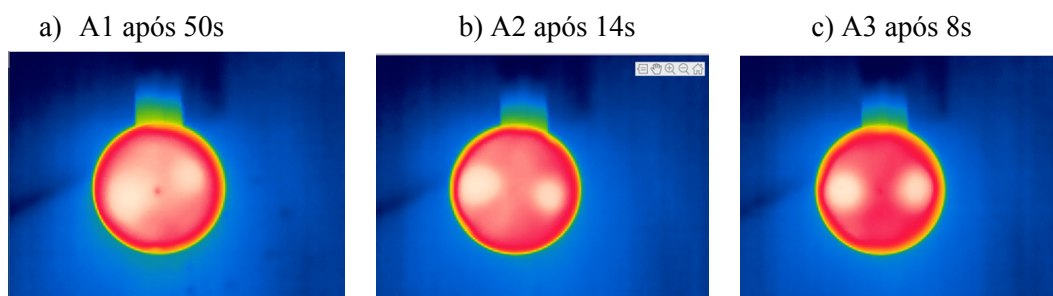
Os resultados desta seção consideram a temperatura de 60°C durante 60 segundos. É possível constatar a diferença do tempo de resposta da capacidade de identificação das falhas em função da profundidade do corpo em análise, bem como relação com a capacidade de identificação das falhas segundo a razão diâmetro/profundidade apresentado na tabela 2, apresentada anteriormente na seção 6.3.

A maior temperatura de aquecimento não garante o maior contraste térmico como indevidamente podemos presumir. Ao aquecer demais, o corpo de prova atinge uma temperatura homogênea em toda a peça e o contraste térmico de resfriamento demora a ser visualizado nos termogramas. Os melhores resultados dos experimentos foram com a menor temperatura devido às características de condutividade térmica do polipropileno.

O tempo de resposta do contraste térmico é diretamente proporcional à distância da falha em relação à superfície de análise. Na figura 39 podemos observar a resposta

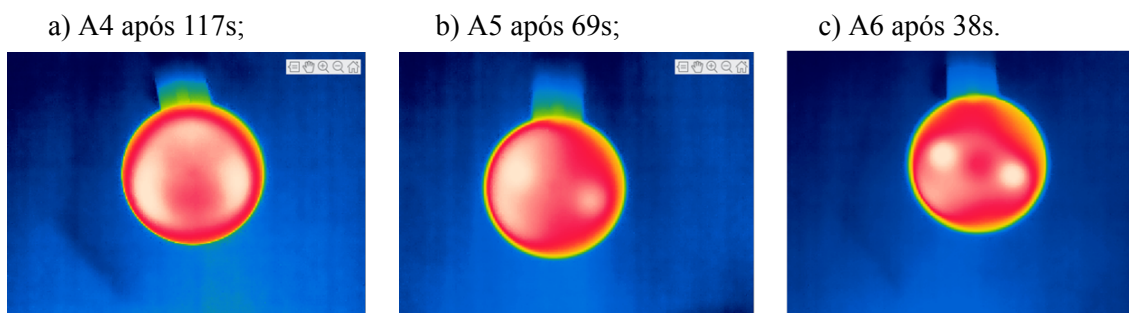
bidimensional da amostra A1 o formato da falha começa a ser percebido com 50 segundos de resfriamento, o A2 leva aproximadamente 14 segundos e por fim o corpo de prova A3 apresenta a diferença entre as áreas com falha e sem.

Figura 39: Resposta térmica das amostras A1, A2 e A3.



Estes resultados apresentam o tempo de resfriamento necessário para que os defeitos sejam evidentes em função da sua profundidade. É possível constatar que a amostra A1 é a que mais demora para delimitar suas falhas, e mesmo assim, existe uma difusão e um embasamento. Enquanto que as amostras A2 e A3 apresentam resultados claros nos primeiros segundos do registro.

Figura 40: Resposta térmica das amostras A4, A5 e A6.



Na Figura 40, observa-se que é possível ter uma indicação da provável região da falha, mas não é possível identificar o formato durante o resfriamento da amostra A4. O caso da amostra A5 também é semelhante, entretanto, ainda é possível identificar a localização com melhor precisão, já que o formato não está totalmente definido. Isto foi previsto mediante os resultados apresentados na tabela 2.

Já o resultado da amostra A6 pode-se constatar com facilidade a localização e o formato da falha. Na seção para definir a profundidade das falhas e o diâmetro, serão utilizadas

as amostras A3 e A6 devido aos melhores resultados alcançados. Outra questão é que a má distribuição térmica se dá devido à superfície da fonte térmica e do corpo de prova.

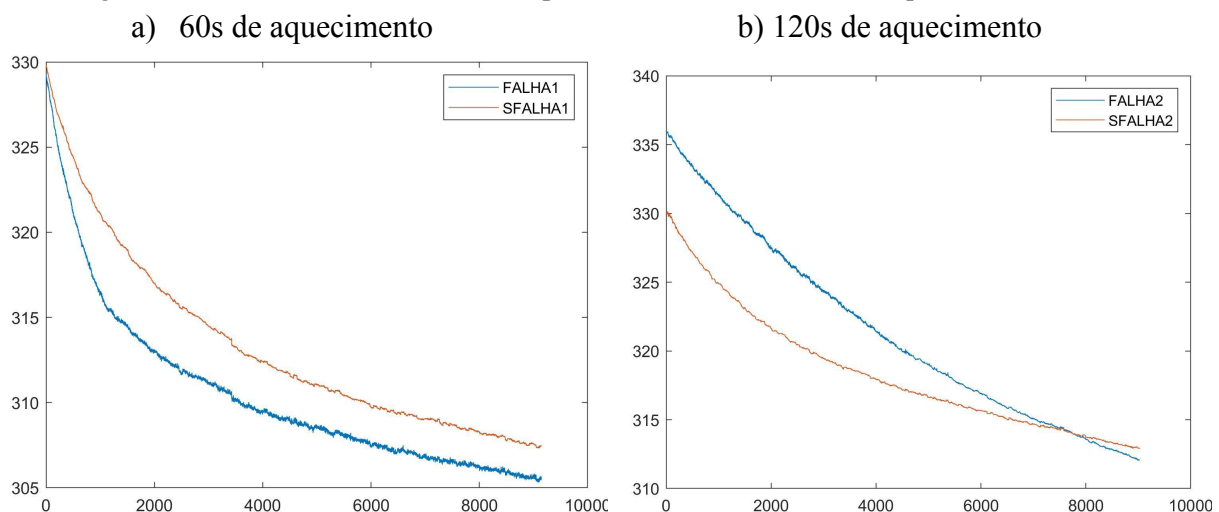
O contato não é perfeito, e por isso a distribuição térmica altera, como pode ser notado em A2 e A3, que algumas falhas possuem um formato ligeiramente diferente uma da outra. Para homogeneizar essa distribuição realizou-se alguns testes utilizando água como superfície de contato e de distribuição regular da temperatura.

Essa tentativa melhorou os resultados no que tange à melhor distribuição térmica, mas o procedimento experimental ficou mais invasivo, ao notar que era necessário retirar a água do corpo de prova para o momento de aquisição dos termogramas. Com isso se introduziu erros ao método, bem como era perdido os primeiros instantes do processo de resfriamento, os quais são interessantes por se alinhar com o modelo das somas das duas exponenciais apresentadas no método baseado na Lei de Resfriamento Térmico de Newton.

6.1.2 PERÍODO DO PULSO TÉRMICO

Durante a etapa do planejamento experimental foi considerado alterar em três valores o tempo de aquecimento da amostra em: 60, 120 e 180 segundos. Ao analisar um experimento para a temperatura de 60°C com os diferentes tempos de aquecimento e considerando dois pontos em cada ensaio, o da falha e o sem falha, encontrou-se três resultados interessantes.

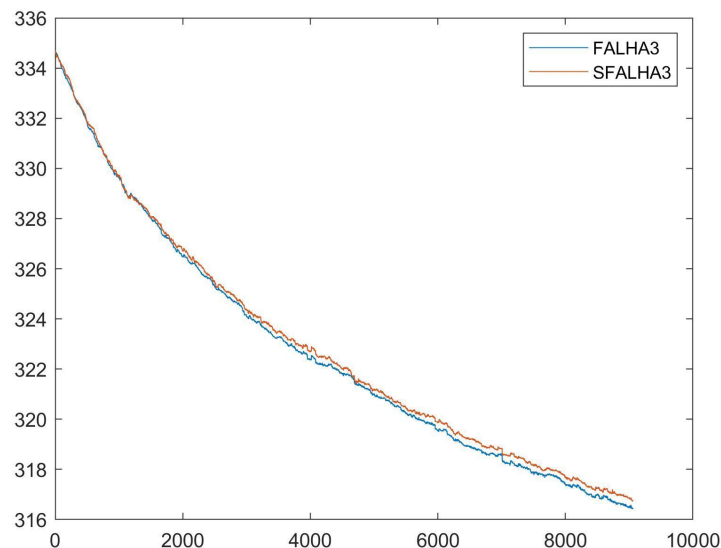
Figura 41: Resultado do contraste entre pixel sadio e defeituoso com aquecimento de 60°C.



Podemos perceber que o ponto com falha resfria mais rapidamente devido a menor resistência térmica assumida pela espessura mais fina do material imposta pela profundidade da falha, enquanto o ponto sem falha resfria mais lentamente devido a maior quantidade de material que resiste à passagem do fluxo térmico. No segundo experimento dobra-se o tempo de aquecimento, resultando em um maior aquecimento da área com falha. Apresentado no gráfico da Figura 41.

O primeiro refere-se ao experimento que aquece o corpo de prova por 60 segundos. Para as condições térmicas do material testado, esse tempo é suficiente para identificar um contraste térmico evidente entre o ponto sem falha em relação ao ponto com falha. Na Figura 42, observa-se o resultado do aquecimento durante 180s. Esse tempo prolongado torna a distribuição térmica extremamente homogênea, sendo o tempo de 300 segundos insuficiente para apresentar contraste térmico evidente entre os pontos.

Figura 42: Resultado do contraste entre pixel sadio e defeituoso com aquecimento de 60°C a 180s.



6.2 PÓS-PROCESSAMENTO

O MATLAB foi utilizado para realização de cálculos utilizando os termogramas gerados com o método proposto. Pode-se utilizar a matriz temperatura para realizar a identificação das bordas, normalização dos dados, aplicação do contraste térmico e identificação dos máximos e mínimos, ou seja, a variação máxima do termograma.

Durante a etapa de pós-processamento que reduziu o tamanho dos dados em 98% utilizando o modelo desenvolvido por Silva *et al.* (2020) para comprimir os dados. Ao utilizar

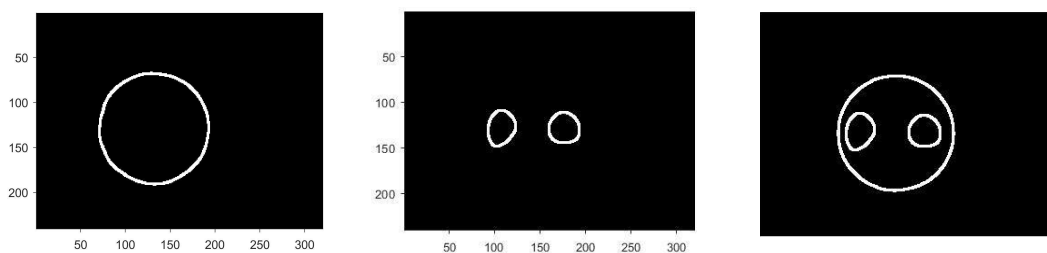
a equação de resfriamento de Newton, foi possível reconstruir a imagem guardando apenas quatro parâmetros e aplicando-os na equação com duas exponenciais. Por fim, todos os resultados foram somados e gerou uma única imagem resultante para

6.2.1 BORDAS

As mudanças abruptas de temperatura apresentam diferentes níveis de uma determinada imagem e são denominadas bordas ou linhas de contorno. Através das derivadas parciais, pode-se definir as bordas, pois as imagens dependem de duas coordenadas espaciais. Ao observar a Figura 38 (b), pode-se verificar que existem várias linhas de contorno que apresenta o comportamento da distribuição térmica de um frame do termograma. Estes *frames* apresentam variações durante o tempo, e um pixel representa a curva de alteração térmica, neste caso se trata do resfriamento da superfície que foi aquecida.

Existem duas regiões que são interessantes para o processamento dos dados, que é a borda externa: que delimita a amostra e o fundo da imagem e a borda das falhas. O operador matemático utilizado para diferenciação de imagens é o gradiente. Pode-se observar que na Figura 43, foi utilizado o detector *Canny* para identificar as bordas das regiões de interesse e as bordas da falhas seguindo o método aplicado no trabalho (WANG *et al.*, 2018). Em seguida foram somados os dois resultados.

Figura 43: Imagem da representação das bordas.

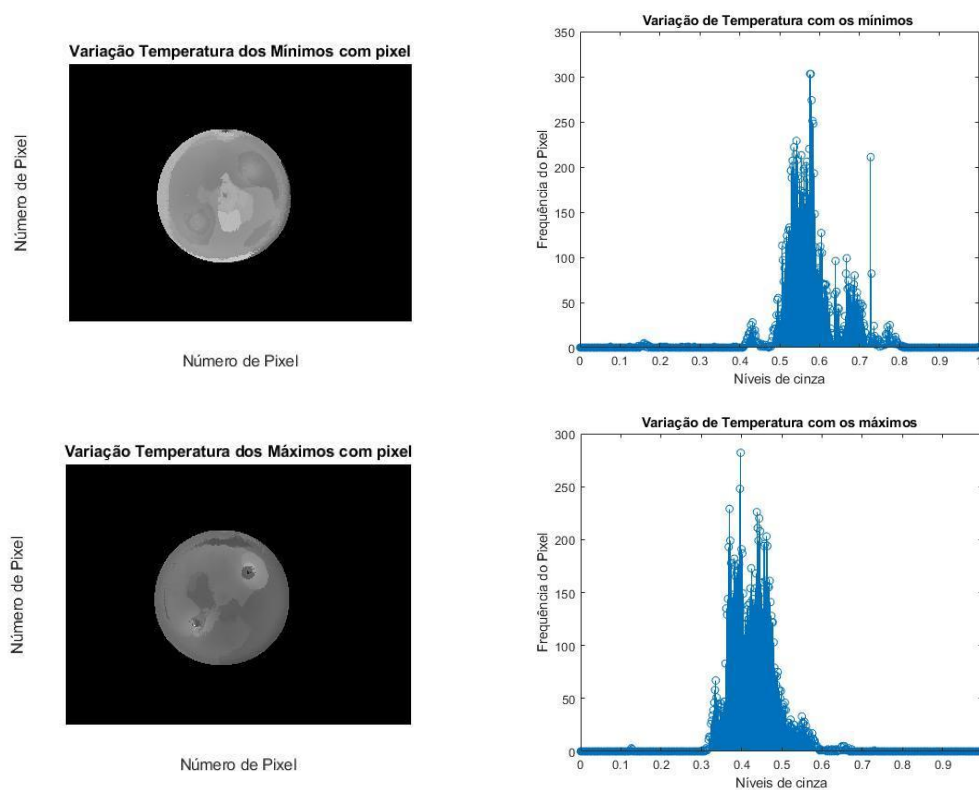


A borda externa representa a diferença térmica entre a borda da amostra e o fundo da imagem. Esta delimitação é importante para realizarmos a primeira redução nos dados, que é a separação do fundo da imagem. A região interna da linha delimitada pela borda será considerada 1, e toda a região externa 0, multiplicando a imagem binária pela matriz com os frames do termograma teremos apenas a região a distribuição térmica da amostra.

6.2.2 CONTRASTE TÉRMICO MÁXIMO

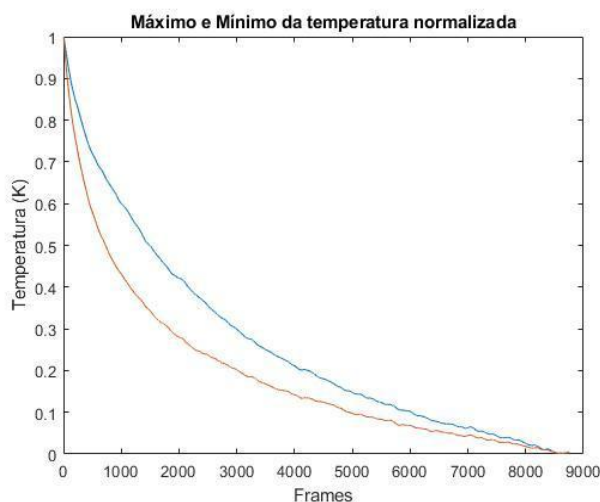
Na figura 44 podemos observar esse valores em 2D e o seu respectivo histograma. Neste caso, dentro da região de interesse o algoritmo realiza a identificação dos valores máximo e é possível plotar em 2D.

Figura 44: Variação dos mínimos e máximos de temperatura e respectivos termogramas.



Um ponto bem interessante de observar é o diâmetro da falha que muda de dimensão, relativo ao formato côncavo que o gradiente da temperatura se apresenta por ter maior temperatura na falha. Os máximos apresentam a ponta da identificação da falha, pode-se verificar na figura 44 a seguir.

Figura 45: Curvas das temperaturas máximas (azul) e mínimas (vermelho).



6.3 APLICAÇÃO DO CONTRASTE TÉRMICO PADRÃO

O método de impulso longo tem muitas aplicações, como determinação de espessura de revestimentos, inspeção das ligações revestimento-substrato, avaliação de estruturas compostas, medições de condutividade térmica dos materiais. No experimento foram analisados apenas os termogramas da fase de resfriamento capturadas após a excitação térmica por fonte externa por contato. A detecção de defeitos é um processamento básico aplicando o contraste térmico padrão (CTP) utilizando a equação abaixo (GRYS, 2012).

$$CTP_{x,y}(t) = \frac{T_{x,y}(t) - T_{x,y}(t_0)}{T_{semfalha}(t) - T_{semfalha}(t_0)} \quad (16)$$

Onde: $T_{x,y}(t)$ - Imagem no tempo t ; $T_{x,y}(t_0)$ - Imagem de referência no t_0 ; $T_{semfalha}(t)$ - Pixel sem falha no tempo t ; $T_{semfalha}(t_0)$ - Pixel sem falha de referência em t_0 ;

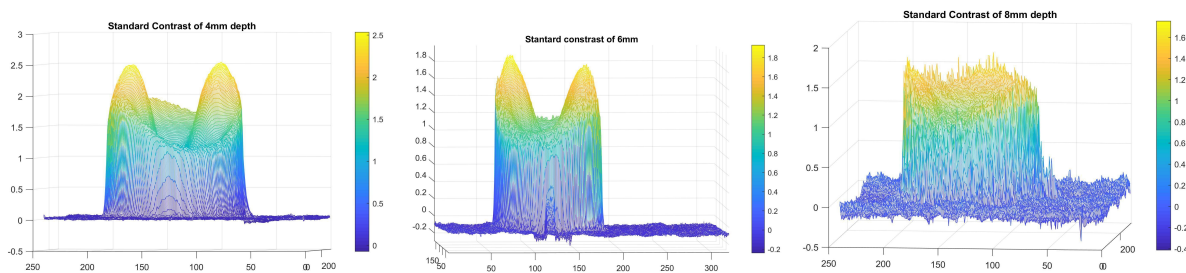
A equação (16) apresentada que calcula o CTP representado pela razão entre a diferença de um frame em análise com relação a um frame de referência e a diferença entre pixels ao longo do tempo sem falha. Encontramos os resultados a seguir para as três profundidades e observando os resultados apresentados na Figura 46, observa-se que o CTP para a profundidade de 8mm da falha em relação a superfície foi a que mais apresentou ruído, devido a difusividade térmica lateral e pelo fato da falha possuir apenas 2mm de profundidade como esperado devido ao fator da Tabela 1 ser próximo de 2.

Figura 46: Resultados em 3D do contraste térmico.

a) 4mm de profundidade;

b) 6m de profundidade;

c) 8mm de profundidade.



6.4 DETERMINANDO O TAMANHO RELATIVO DO PIXEL

Para determinar o tamanho relativo do pixel da imagem infravermelho capturada, foi utilizado o procedimento determinado seguindo-se recomendações da especificação técnica IEC 62446-3:2017. Esta norma define as condições para realizar inspeção termográfica externa em painéis solares e plantas em operação.

Na Figura 45, observa-se o campo de visão na diagonal representada pelo DFOV (do inglês *Diagonal Field of View*) da combinação da lente da câmera e a superfície de análise formado pelo AFC, sendo o vértice em F. A distância da lente ao corpo de prova (d_{FE}) é do ponto F ao E. E o número de colunas pelo número de linhas representa a resolução da câmera ($n \times m$).

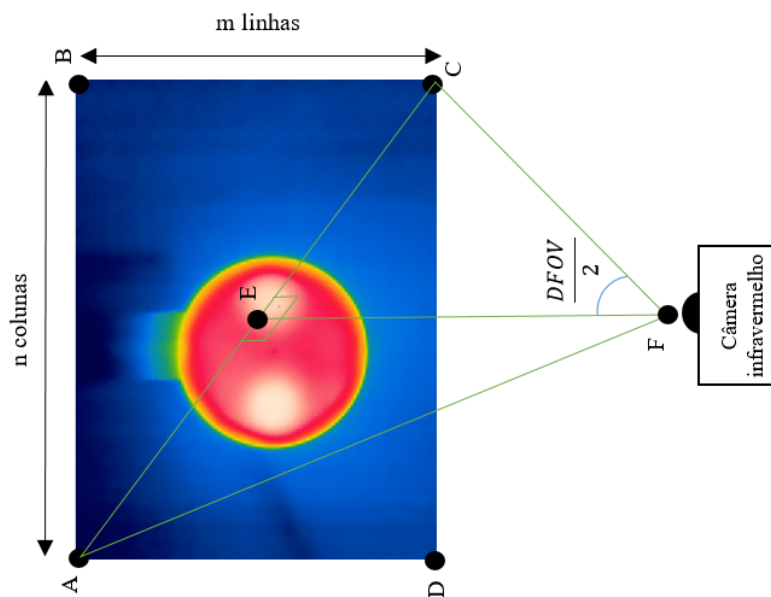
Observando as relações trigonométricas, (17) e (18), temos como resultado (19).

$$\frac{d_{EC}}{d_{FC}} = \sin\left(\frac{DFOV}{2}\right) \quad (17)$$

$$\frac{d_{FE}}{d_{FC}} = \cos\left(\frac{DFOV}{2}\right) \quad (18)$$

$$d_{FC} = \frac{d_{EC}}{\sin\left(\frac{DFOV}{2}\right)} = \frac{d_{FE}}{\cos\left(\frac{DFOV}{2}\right)} \quad (19)$$

Figura 47: Modelo para cálculo do tamanho relativo do pixel da imagem.



Portanto, sendo o tamanho da diagonal do campo de visão a distância do ponto **A** ao **C** (d_{AC}), pode-se calcular como:

$$d_{AC} = 2 \times d_{FE} \times \tan\left(\frac{DFOV}{2}\right) \quad (20)$$

Sabendo que a distância entre a câmera e a superfície de análise foi de 40 cm, pode-se verificar as dimensões em ($n \times m$) a área medida pela câmera:

Tabela 5: Dados dimensionais medidos.

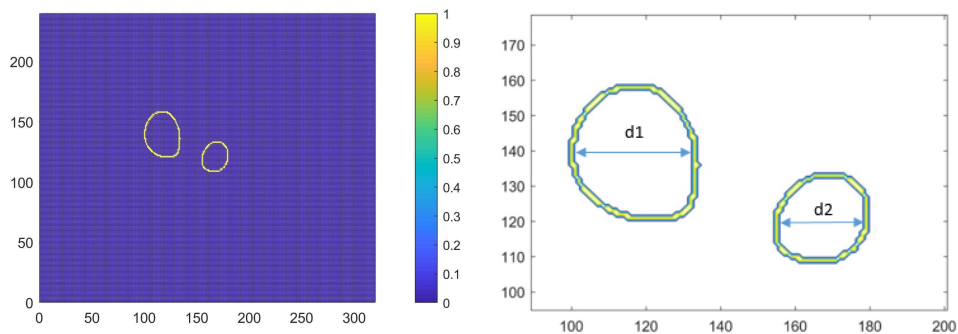
Item	Valor medido (cm)	Pixel (qt)	Relação (pixel/cm)
n	18,5	320	17,3
m	13,5	240	17,8

Aplicando a média entre os valores e levando em consideração a precisão da medição, o valor final é de 17,5 pixels/cm. Ou seja, 17,5 pixels equivale a 1 cm. Com esta informação buscamos determinar as dimensões das falhas medidas e correlacionar com os valores reais. É possível encontrar o ângulo $DFOV/2$, já que conhecemos os valores reais de d_{AB} e d_{BC} . Portanto, calculamos primeiramente d_{AC} .

$$d_{AC} = \sqrt{d_{AB}^2 + d_{BC}^2} \quad (21)$$

O valor de d_{AC} encontrado foi de 0,229m então temo o valor de d_{EC} que é a metade. Com estes dados podemos aplicar na equação (21) e encontrar o valor de $DFOV/2$ igual a $15,98^\circ$.

Figura 48: Delimitação dos defeitos e cálculo da área.



Conhecendo a relação média entre a quantidade de pixels e comprimento, podemos calcular a quantidade de pixels e fazer uma relação da dimensão do diâmetro das falhas. Considerando as falhas do corpo de prova A1, temos, A falha 1 tem o quantitativo de 29 pixels, que nos fornece um d1 de 1,65cm. Enquanto que para o d2 temos o valor de 0,97 cm.

Tabela 6: Resultados do tamanho relativo do pixel por falha.

Amostra	Diâmetro (mm)	Falha 1 (mm)	Falha 2 (mm)	Erro 1	Erro 2
A1	20	13,7	9,1	-6,3	-10,9
A2	20	19,4	20,6	-0,6	+0,6
A3	20	22,3	20,0	+0,3	0,0
A4	10	9,1	9,5	-0,9	-0,5
A5	10	9,7	9,3	-0,3	-0,7
A6	10	10	10	0,0	0,0

6.5 COMPRESSÃO UTILIZANDO O MODELO DE RESFRIAMENTO

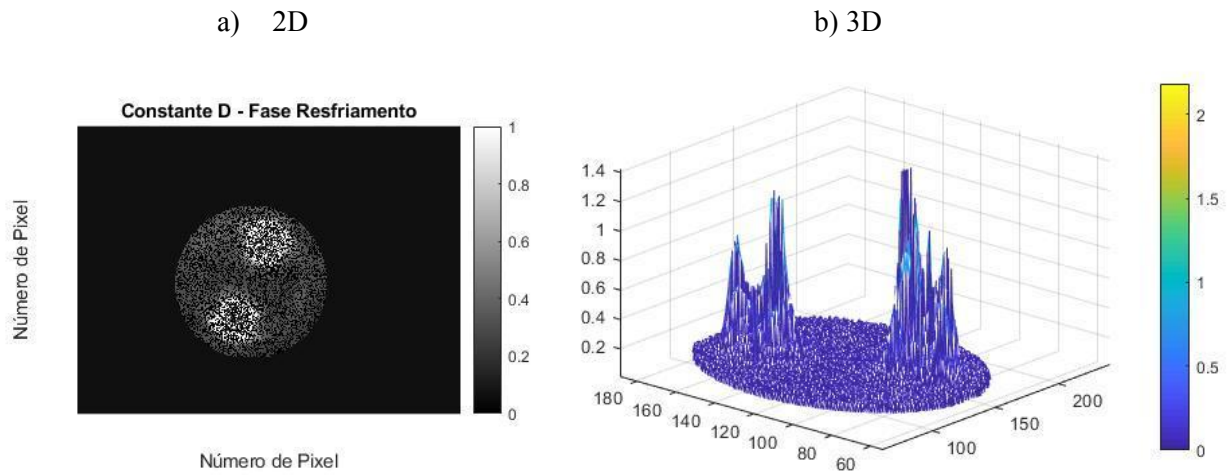
Devido ao gigantesco volume de dados, uma etapa importante no processamento é a redução sem perda de informação relevante. SILVA *et al.* (2022) desenvolveu um modelo de compressão utilizado para reduzir a dimensão dos dados em até 98% utilizando a equação (22) como modelo para o ajuste de resfriamento elaborado especificamente para análise da curva de resfriamento de sinais radiométricos para a faixa do baixo e médio infravermelho.

$$y = a.e^{-b.t} + c.e^{-d.t} \quad (22)$$

São calculados os quatro parâmetros (a, b, c e d) por regressão não linear de Gauss-Newton. O sinal de temperatura de cada pixel é normalizado, onde os dados e a curva ajustada pela equação 1 calcula o sinal normalizado ao longo do tempo.

Antes de ajustá-los, foi aplicado o filtro da mediana para eliminar algum ruído (alta frequência) e facilitar o ajuste, tornando a convergência mais rápida. Na Figura 49 a) observa-se o resultado da constante de resfriamento ‘d’ em 2D com a exclusão do fundo e apenas os dados relevantes para análise. Ao lado, na Figura 49 b) observa-se a constante em 3D evidenciando as regiões com falhas

Figura 49: Constante de fase de resfriamento ‘d’.

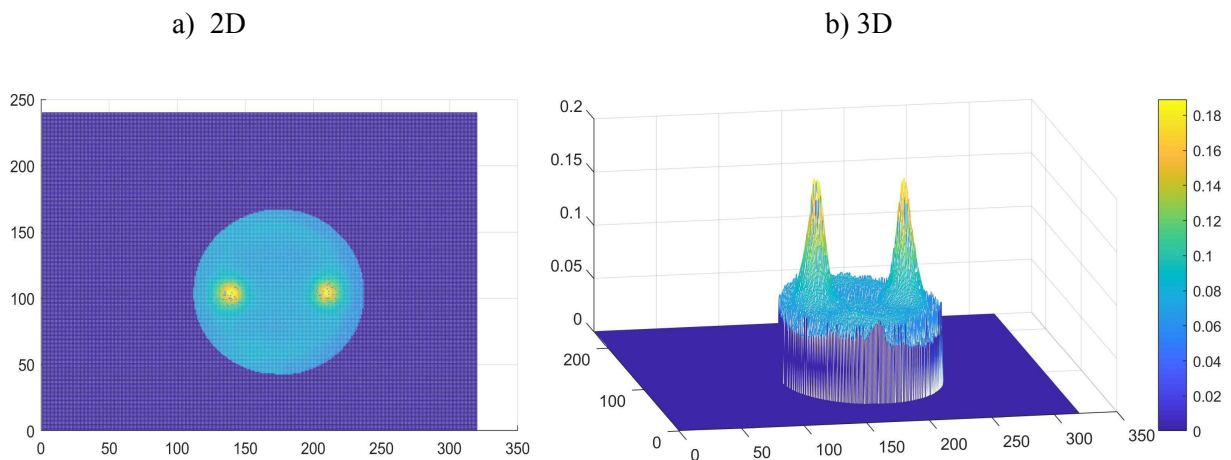


É importante salientar o significado físico do ajuste aplicado do modelo utilizado considerando as restrições do fenômeno físico, portanto, seguindo as leis de transferência de calor e termodinâmica. É possível verificar a similaridade entre as teorias de Newton Lei do resfriamento na Eq. 21 e o ajuste com a soma de o modelo exponencial na Eq. 20:

$$T = T_a + (T_0 - T_a) \cdot e^{\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)} \quad (21)$$

Na Figura 50, pode-se verificar o pólo dominante aplicado à amostra “A6”. Notando a forte característica dos pontos com falhas.

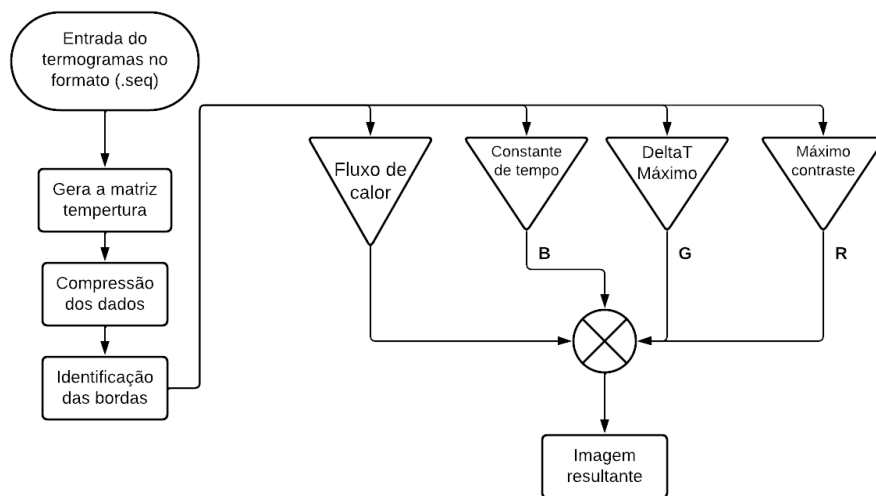
Figura 50: Pólo dominante aplicado aos ensaios do corpo de prova A6.



6.6 IMAGEM RESULTANTE

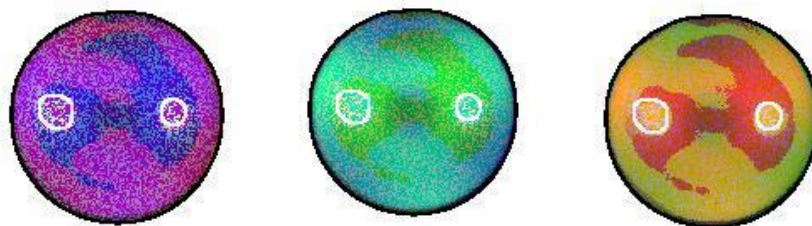
O método da imagem resultante sugerido por SILVA *et al.* (2022) possui a finalidade de entregar ao operador e mantenedor uma única imagem capaz de sintetizar todas as regiões importantes para identificação de falhas internas. Mediante um simples entendimento dos conceitos físicos envolvidos se espera converter a análise de uma única imagem em um processo rápido e que entregue agilidade no processo de tomada de decisão.

Figura 51: Fluxograma do algoritmo desenvolvido por (SILVA, 2020).



Calculou-se segundo os 3 indicadores que representam sinais de entrada para os canais RGB da imagem resultante: o Máximo contraste, a Variação máxima de cada pixel ($\Delta T_{\text{máx}}$) e a constante de tempo apresentado na Figura 51. Constata-se o resultado exposto na Figura 52. Importante ressaltar que o fundo da imagem térmica foi excluído utilizando a técnica do limiar de Otsu que a partir de um valor de *threshold* deletamos dados abaixo desse valor ajustado e mantemos apenas os dados acima, conservando a região de interesse para minimizar a quantidade de dados e atingir um processamento dos dados mais rápido.

Figura 52: Resultado final atribuindo os indicadores em cada canal RGB.



7. CONCLUSÃO

Nesta pesquisa foi apresentado a aplicação de uma fonte térmica alternativa para o aquecimento de amostras de polipropileno. Desenvolvemos um setup de aquecimento robusto e realizamos ensaios experimentais, onde todos os dados obtidos foram processados utilizando o Matlab. A aplicação da termografia ativa se mostrou bastante abrangente, permitindo a resolução de uma variedade de problemas. No entanto, é fundamental direcionar a abordagem de acordo com o tipo de falha que se deseja detectar, ressaltando que os ensaios não destrutivos (END) devem ser utilizados de forma complementar, uma vez que nenhuma técnica isoladamente consegue capturar todas as características presentes nos objetivos sob estudos.

Os resultados obtidos evidenciam que a relação entre a profundidade e o diâmetro da falha é crucial para determinar a capacidade da técnica de identificação. Observou-se que as amostras A4 e A5 apresentaram limitações na visualização das falhas, o que estava alinhado com as expectativas indicadas pela literatura. Com os dados experimentais, foi possível ajustar os valores de temperatura e tempo de aquecimento, alcançando resultados satisfatórios.

Através do cálculo do pixel relativo, pode-se determinar o diâmetro das falhas e compará-lo com os valores reais, permitindo uma verificação quantitativa dos dados obtidos. O processamento dos termogramas possibilitou a aplicação de técnicas de pós-processamento, que enriqueceram a análise qualitativa e quantitativa dos dados. O contraste padrão reforçou a relação entre a profundidade e a capacidade da técnica em identificar falhas, especialmente em situações onde fatores estavam abaixo de 2. Adicionalmente, o processamento dos dados levou à compressão dos dados, resultando em uma redução de 98% enquanto preservava as informações essenciais. A imagem resultante sintetiza as principais características dos dados obtidos, apresentando uma visão clara e concisa das falhas detectadas.

Conclui-se que a técnica desenvolvida apresentou resultados promissores, permitindo a identificação de defeitos na maioria das amostras analisadas. No entanto, as limitações das amostras A4 e A5 destacam a necessidade de considerar o contexto de aplicação da técnica, que, embora eficaz, tem restrições em comparação com métodos mais avançados, como a termografia Lock-in e o pulso óptico, que possibilitam o aquecimento sem contato, possibilitando a análise no período de aquecimento. Este estudo, portanto, não apenas valida a utilização de uma fonte térmica alternativa, mas também abre caminhos para futuras investigações que possam integrar diferentes técnicas de ensaio não destrutivo para uma análise mais abrangente.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar o banco de dados desenvolvido para aplicar outros métodos de processamento de sinais e calcular a profundidade das falhas;
- Neste trabalho foi utilizado um material não condutor, esta análise pode ser estendida para verificar falhas internas de isolamento elétrico e comparar com os resultados dos ensaios elétricos;
- Aplicação de outras ferramentas matemáticas para análise e extração de informações;
- Desenvolvimento de algoritmo automatizado para diminuir as interferências humanas no procedimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAN, C. et al. **Handbook of image and video processing**. [S.l.]: San Diego: Academic Press, 2000.
- BALAGEAS, D. A. BOSHER, D. D., **Characterization and nondestructive testing of carbon–epoxy composites by a pulsed photothermal method**, Mater. Eval. 45 (1987) 461–465.
- BALAGEAS, D.L. LEROY, F. H. and ROCHE, J. M., **Images of Thermographic Signal Reconstruction Coefficients: A Simple Way for Rapid and Efficient Detection of Discontinuities**, September, 2013 – ResearchGate.
- BALASUBRAMANIAM, K., SIKDAR, S., ZIAJA, D., and JUREK, M., **A global -local damage localization and quantification approach in composite structures using ultrasonic guided waves and active infrared thermography**, DOI: 10.1088/1361-665X/acb578, 2023.
- BARROS, A. L. L., **UMA ABORDAGEM SOBRE O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO POR MEIO DE ESTUDOS DE CASO**, dissertação de mestrado profissional de ensino de física, Campos dos Goytacazes/RJ, 2018.
- BATISTA, L. V. **Introdução ao Processamento Digital de Imagens**. Nota de Aula, 2005.
- BOVIK, A. C. **The essential guide to image processing**. [S.l.]: Academic Press, 2009.
- BU CHI-WU, ZHAO BO, LIU TAO, LIU GUO-ZENG, LIAO CHANG-YU e TANG QING-JU, **Infrared thermal imaging detection of debonding defects in carbon fiber reinforced polymer based on pulsed thermal wave excitation**, Thermal Science 2020 Volume 24, Issue 6 Part B, Pages: 3887-3892, <https://doi.org/10.2298/TSCI2006887B>.
- CALLISTER, W. D. MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING, AN INTRODUCTION. 10ª Edição. 2013.
- CARVALHO M.S., MARTINS A.P., SANTOS T.G., **Simulation and validation of thermography inspection for components produced by additive manufacturing**, Applied Thermal Engineering (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113872>.
- FERNANDES, H., ZHANG, H., FIGUEIREDO, A., IBARRA-CASTANED, C., GUIMARÃES, G., and MALDAGUE, X., "Carbon fiber composites inspection and defect characterization using active infrared thermography: numerical simulations and experimental results" Appl. Opt. 55, D46-D53, doi.org/10.1364/AO.55.000D46, 2016.
- FREITAS, J. P. O., **DESENVOLVIMENTO DE UMA INTERFACE GRÁFICA PARA OBTENÇÃO E ANÁLISE DE VÍDEOS TÉRMICOS**, TCC de Engenharia Mecânica, UFS, São Cristóvão, 2018.
- GONZALEZ, R. C., Woods, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. 1 ed. São Paulo, Edgard Blucher, 2000.
- GROSSO, M., **Deteção de Defeitos em Aços com Revestimentos Anticorrosivos Através da Técnica de Termografia aliada ao Emprego de Simulação Computacional**. Tese de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.
- GRYS, S. **Determining the dimension of subsurface defects by active infrared thermography – experimental research**, doi: <https://doi.org/10.5194/jsss-7-153-2018>.
- GRYS, S., MINKINA, W., VOKOROKOS, L. **Automated characterisation of subsurface defects by active IR thermographic testing – Discussion of step heating duration and defect depth determination**, 2015 – Elsevier.
- GRYS, S.; VOKOROKOS, L.; BOROWIK, L. **Size determination of subsurface defect by active thermography-simulation research**. Infrared Physics & Technology, Elsevier, v. 62, p. 147-153, 2014.
- GRYS, S. **NEW THERMAL CONTRAST DEFINITION FOR DEFECT CHARACTERIZATION BY ACTIVE THERMOGRAPHY**. Elsevier, 2012.

GOMES, O. F. M, **Processamento e Análise de Imagens Aplicados à Caracterização Automática de Materiais**, dissertação apresentada no departamento de Ciência de Materiais e Metalurgia da PUC/Rio, setembro de 2001.

IBARRA-CASTANEDO, C. JEAN-MARC, P., STÉPHANE, G. et al, **COMPARATIVE STUDY OF ACTIVE THERMOGRAPHY TECHNIQUES FOR THE NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF HONEYCOMB STRUCTURES**, Research in Nondestructive Evaluation, 20: 1–31, 2009. ISSN: 0934-9847 print=1432-2110 online, DOI: 10.1080/09349840802366617.

ISO 18434-2:2019 (E), **International Standard: Condition Monitoring and Diagnostics of Machine Systems – Thermography. Part 2: Image interpretation and diagnostics**, Maio, 2019.

LACERDA, P. M. M., **Simulações computacionais para termografia infravermelha aplicada a materiais compósitos**. 2022. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -- Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

LAHIRI, B. B., BAGAVATHIAPPAN, S., RESHMI, P. R., PHILIP, J., JAYAKUMAR, T., RAJ, B., **Quantification of defects in composites and rubber material using active thermography**, Infrared Physics & Technology, Elsevier, 2012.

LIMA, C. R. A., **TÓPICOS DE LABORATÓRIO DE FÍSICA MODERNA**, UFJF, 213.

GOMBOC, T., ILJAZ, J., WROBEL, L. C., HRIBERSEK, M., MARN, J., **Design of constant temperature cooling device for melanoma screening by dynamic thermography**, Engineering Analysis with Boundary Elements, 2021.

KARDEC, A. NASCIF, J., **Manutenção: função estratégica**, 3ªed., Rio de Janeiro, Qualitymark: Petrobras, 2009. ISBN: 978-85-7303-898-9.

KLEIN, M. T., IBARRA-CASTANEDO, C., MALDAGUE, X. P., BENDADA, A., **A straightforward graphical user interface for basic and advanced signal processing of thermographic infrared sequences**, Quebec, Canada, 2008.

MACHADO, M. A., SILVA, M. I., MARTINS, A. P., CARVALHO, M. S., SANTOS, T. G., **Double active transient thermography**, NDT and E international, 2022.

MADRUGA, F. J., IBARRA-CASTANEDO, C. CODE, O. M. LÓPEZ-HIGUERA, J. M., MALDAGUE, X., **Infrared thermography processing based on higher-order statistics**, NDT International, Elsevier, 2010.

MALDAGUE, X. P. V. Nondestructive Evaluation of Material by Infrared thermography, ISBN-13:978-1-4471-1997-5, Springer, 1993.

MALDAGUE, X., MOORE, P.O. **Nondestructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing**. 3 ed. ASTN (American Society for Nondestructive Testing), 2001.

MARTINS, S. B. **Introdução ao Processamento Digital de Imagens. Parte 1 – Definições básicas, espaços de cores e histogramas**. UNICAMP, sem data.

MELO, R. A. C. **CONSTRUÇÃO DE BANCO DE IMAGENS TÉRMICAS DE CORPOS DE PROVA DEFEITUOSOS COM O USO DA TERMOGRAFIA ATIVA**, TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO, UFS, SÃO CRISTÓVÃO, SERGIPE, 2019.

MERCURI, F. ZAMMIT, U., ORAZI, N, PAOLONI, S., MARINELLI, M., SCUDIERI, F., **Active infrared thermography applied to the investigation of art and historic artefacts**. Therm Anal Calorim, 2011. DOI 10.1007/s10973-011-1450-8

MEOLA, C., BOCCARDI, S. e CARLOMAGNO, G. M., **INFRARED THERMOGRAPHY IN THE EVALUATION OF AEROSPACE COMPOSITE MATERIALS**, Editora Elsevier Ltd, 2017. ISBN: 978-1-78242-172-6 (online).

MONTANINI, R., **Quantitative determination of subsurface defects in a reference specimen made of Plexiglas by means of lock-in and pulse phase infrared thermograph**, Infrared Physics & Technology, v. 53, pp. 363-371, 2010.

OGÊ, M.F, VIEIRA NETO, Hugo. **Processamento Digital de Imagens**, Rio de Janeiro: Brasport, 1999. ISBN 8574520098.

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. **Análise de imagens digitais: princípios, algoritmos e aplicações**. [S.l.]: Thomson Learning, 2008.

PEETERS, J., IBARRA-CASTANEDO, C., SFARRA, S., MALDAGUE, X., DIRCKX, J.J.J., STEENACKERS, G., **Robust Quantitative Depth Estimation on CFRP samples using active thermography inspection & numerical simulation updating**, NDT and E International, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.02.003>.

RODRÍGUEZ-MARTÍN, M., LAGÜELA, S., GONZÁLEZ-AGUILERA, D. e ARIAS, P., **Cooling analysis of welded materials for crack detection using infrared thermography**, doi: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2014.09.025>.

RODRÍGUEZ, F. de J. L., **DETECÇÃO DE DEFEITOS EM MATERIAIS CERÂMICOS USANDO TERMOGRAFIA**, dissertação de mestrado de Engenharia Mecânica da UFSC, Florianópolis, 2010.

SILVA, M. I. S., **Non-Destructive Testing for Polymer Matrix Composites produced by Additive Manufacturing**, Dissertação de mestrado, Universidade NOVA, 2020, Lisboa.

SILVA, W. F. da, MELO, R. A. C., GROSSO, M., PEREIRA, G. R. e RIFFEL, D. B., **Active Thermography Data-Processing Algorithm for Nondestructive Testing of Materials**, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025329>.

SILVA, W. F., MELO, R. A., GROSSO, M., PEREIRA, G. R., RIFFEL, D. B. **Active Thermography Data-processing Algorithm for Nondestructive Testing of Material**, IEEE Access, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3025329.

SHEPARD, S. M. **Flash Thermography of Aerospace Composites**. IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, 2007.

STOYNOVA, A. **Modeling for Thermography Detection of Subsurface Defects above Different Thickness**. XI National Conference with International Participation "Electronica 2020", Bulgaria.

SZYMANIK, B., CHADY, T. & GORACY, K., **Numerical modelling and experimental evaluation of the composites using active infrared thermography with forced cooling**, Quantitative InfraRed Thermography Journal, DOI: 10.1080/17686733.2019.1625243, 2019.

TORRES, C. M. A.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. de T.. **Física: Ciências e Tecnologia**. v. 3. 2. ed. São Paulo: Moderna, 2010.

TRAN, Q. H., DANG, Q.M., PHAM, X.T. **Impact of Wind Speed on the Use of Active Infrared Thermography**. J Nondestruct Eval 42, 35 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10921-023-00948-8>.

VAVILOV, V. BURLEIGH D. **Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing**, Springer, ISBN 978-3-030-48002-8 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-3-030-48002-8>, 2020.

VILARDO, V. N. **Utilização da Técnica de Termografia e de Simulação Computacional para Detecção de Defeitos em Compósitos de Fibra de Carbono**. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

WALKER, J. S. **A Primer on Wavelets and their Scientific Applications**. New York: CRC Press, 1999.

WANG, G.; PETER, W. T.; YUAN, M. **Automatic internal crack detection from a sequence of infrared images with a triple-threshold canny edge detector**. Measurement Science and Technology, IOP Publishing, v. 29, n. 2, p. 025403, 2018.

WANG, Z.; WAN, L.; ZHU, J.; CIAMPA, F. **Evaluation of defect depth in CFRP composites by long pulse thermography**, NDT & E International, Volume 129, 2022, 102658, ISSN 0963-8695, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2022.102658>.

ANEXO A - DADOS DO COMPUTADORES UTILIZADOS

Descrição da capacidade do notebook e desktop utilizados para realização do pós-processamento.

Nome do dispositivo: LAPTOP-RIFLODPN

Processador: Intel(R) Core(TM) i5-7200U CPU @ 2.50GHz 2.71 GHz

RAM instalada: 8,00 GB (utilizável: 7,89 GB)

Tipo de sistema: Sistema operacional de 64 bits, processador baseado em x64

Nome do dispositivo: SCORPIONS

Processador: Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1240 v3 @ 3.40 GHz

RAM instalada: 36,00 GB

Tipo de sistema: Sistema operacional de 64 bits, processador baseado em x64

APÊNDICE A - FALHAS DURANTE O PROCESSO DE AQUISIÇÃO DO DADOS

Figura: Termograma bidimensional para a amostra A4 E Falha da curva de resfriamento causada pelo mau contato entre a câmera e o computador.

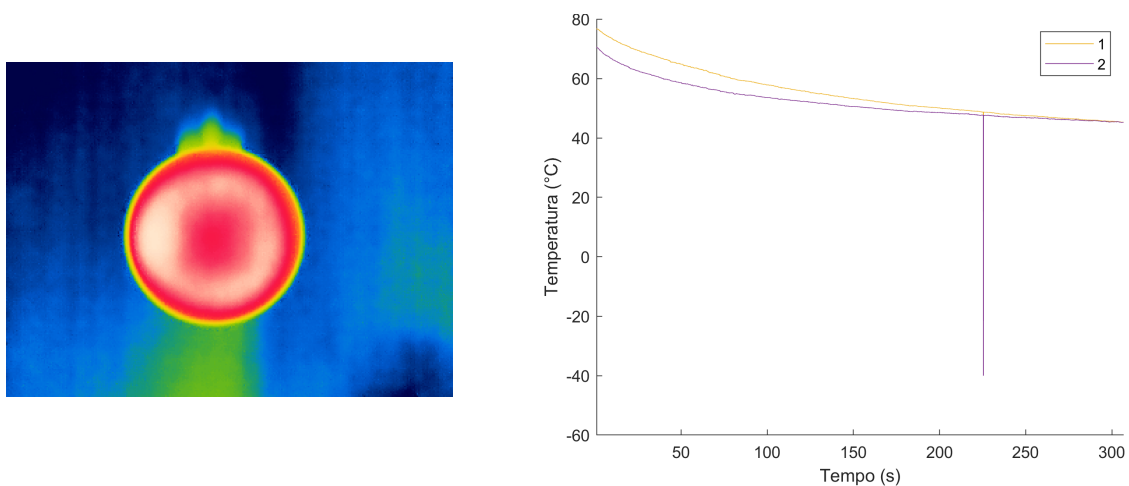
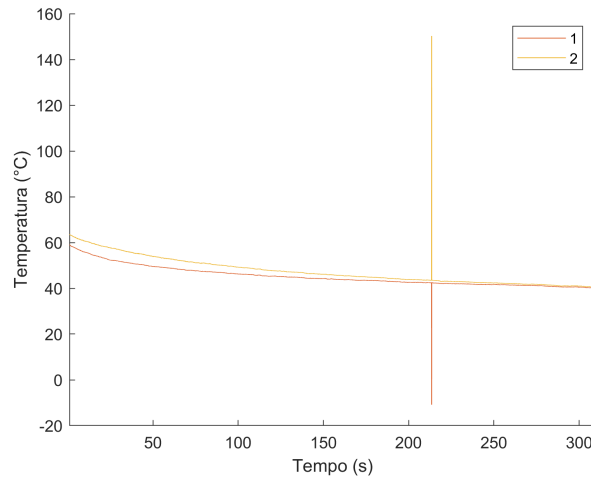
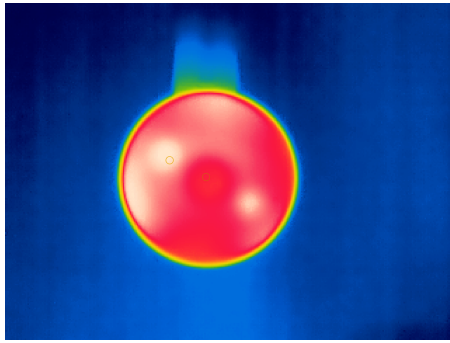


Figura: Distribuição térmica da amostra A6 e Curva de dois pixels no tempo e a falha.



Essas falhas podem ser corrigidas no tratamento dos dados dentro do Matlab, entretanto, ocorre a mudança da referência da curva e portanto por mais que possamos tratar esse impulso retirando no processamento dos dados, a evolução da curva altera as características intrínsecas da resposta temporal.

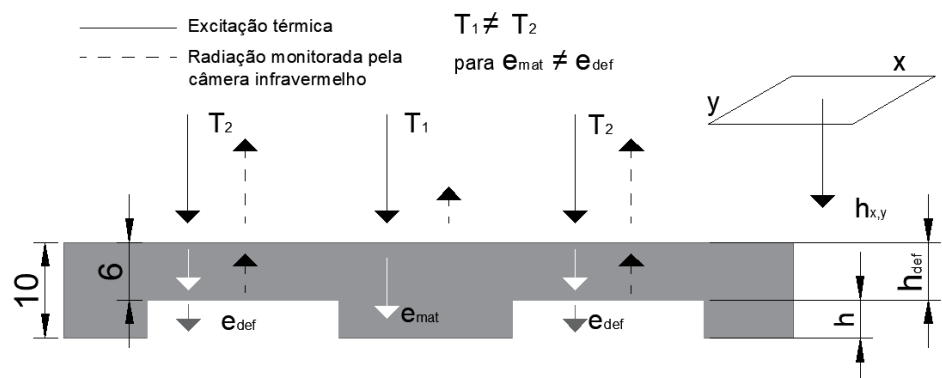
APÊNDICE B - CÁLCULO DA EFUSIVIDADE DO MATERIAL E DA FALHA

A termografia ativa pode ser eficaz apenas se os parâmetros térmicos de material e defeito diferem consideravelmente. A efusividade térmica, caracteriza a quantidade de energia que o material é capaz de absorver e conecta três outros parâmetros, de acordo com a seguinte equação:

$$e = \sqrt{k \cdot \rho \cdot c_p} \quad (1)$$

Onde: e - efusividade ($J/(m^2 \cdot K \cdot s^{1/2})$); k - condutividade térmica (W/mK); ρ - densidade (kg/m^3);
 c_p - Calor específico (KJ/Kg)

Figura 57: Diagrama da estrutura dos dois materiais, hdef é a profundidade do defeito em relação a superfície de análise e h é a profundidade do defeito.



Considerando a eq. 1 calculamos a efusividade Os resultados estão apresentados na tabela 2.

Tabela 6: Parâmetros físicos e térmicos.

Parâmetro	Polipropileno	Ar
Densidade (kg/m³)	900	1,2754
Condutividade (W/mK)	0,21	0,03
Calor específico (J/kg)	1930	1012
Efusividade (J/m²Ks¹/²)	603,96	6,22

APÊNDICE C - CÁLCULO DO FATOR DE INCOMPATIBILIDADE TÉRMICA

O fator de incompatibilidade térmica (FIT) entre o material e o ar (material do defeito) pode ser calculado utilizando a seguinte equação:

$$\Gamma = \frac{e_{ar} - e_{mat}}{e_{ar} + e_{mat}} \tag{2}$$

Onde: e_{ar} - efusividade do ar; e_{mat} - efusividade do material; Γ - Fator de incompatibilidade térmica

Para o polipropileno encontramos o valor de -0,9796 e para a poliamida o valor de -0,9815, ambos aproximam de -1 que indica uma alta capacidade de indicação da diferença térmica entre as áreas com defeito e sem defeito. Abaixo, apresenta-se a tabela 5 que determina as características do fator Gama aplicado à termografia ativa. Este fator é importante para definir se as condições das falhas são sensíveis à técnica. Podemos verificar se o fator de incompatibilidade for muito próximo de zero a capacidade da termografia detectar o defeito é impossível. Evidente, pois as diferentes características entre a falha e o material de análise que produz diferença na efusividade térmica produzida.

Tabela 7 – Fator de incompatibilidade térmica (Gama) e significado nos ensaios por termografia ativa.

Γ	Característica	Defeito é _____ em relação ao material testado	Contraste térmico entre região com e sem defeito	Detectibilidade do defeito por termografia ativa
-1	Alto	Bom isolador térmico	Rápido	Alto
-0,1	Baixo	Ruim isolador térmico	Lento	Baixo
0	Não há	O mesmo	Não há	Impossível
0,1	Baixo	Ruim condutor térmico	Lento	Baixo
1	Alto	Bom condutor térmico	Rápido	Alto

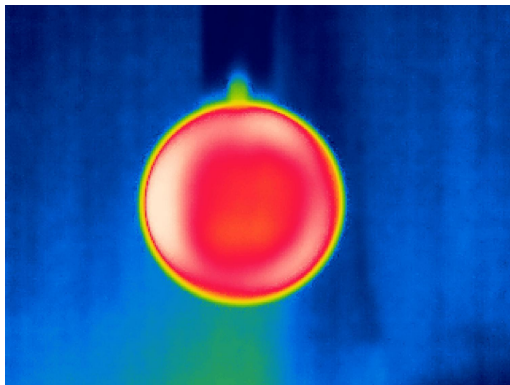
APÊNDICE D - VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DA TÉCNICA EM DETECTAR DEFEITO SEGUNDO A RELAÇÃO ENTRE DIÂMETRO E PROFUNDIDADE

Verificação dos corpos de provas A4 e A5. Na tabela 2 pode-se constatar que estas amostras possuem relação entre o diâmetro e a profundidade menores que 2, fator que determina a pouca ou baixa capacidade do ensaio detectar as falhas.

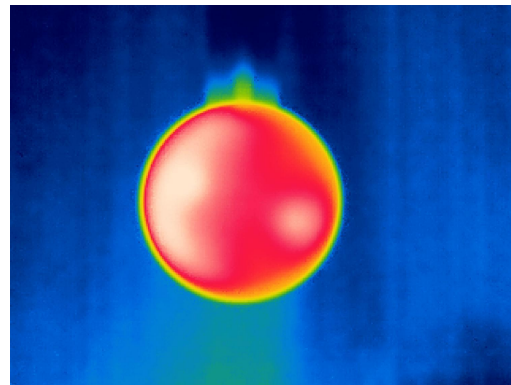
A seguir iremos verificar as condições do ensaio - temperatura de 60°C e aquecimento por 60s, as respostas de A4 e A5 para o mesmo frame.

>> frame 3000 equivalente a 100 segundos de resfriamento.

A4

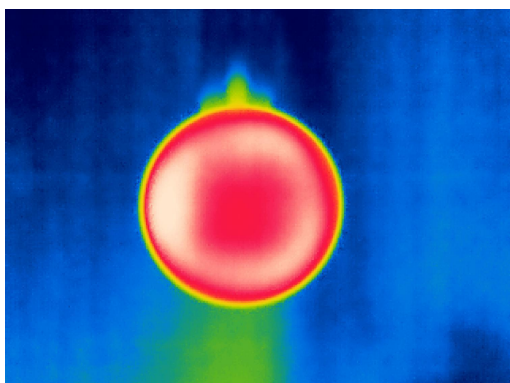


A5

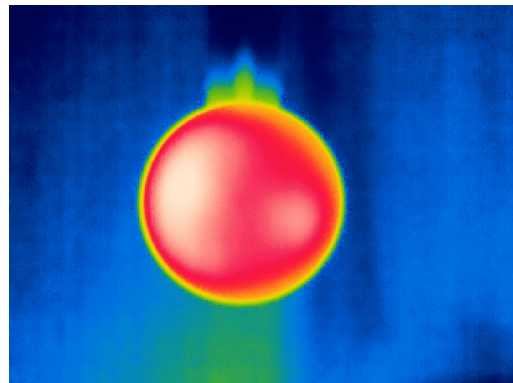


>> frame 6000 equivalente a 200 segundos de resfriamento.

A4

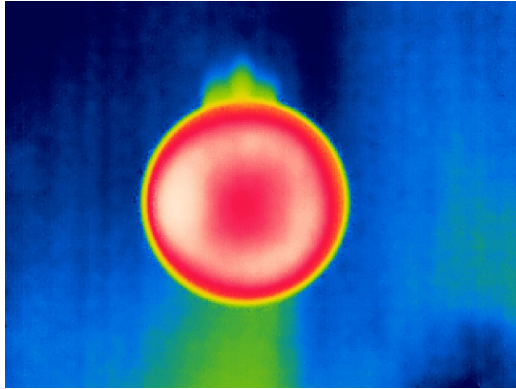


A5

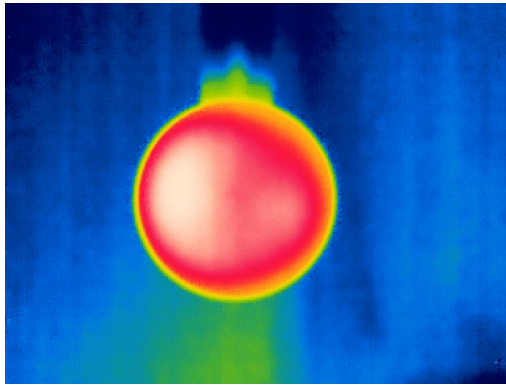


>> frame 9000 equivalente a 300 segundos de resfriamento.

A4



A5



As imagens acima mostram nos resultados experimentais algo que pode ser previsto anteriormente com o cálculo da relação entre a profundidade da falha e seu diâmetro. Na amostra A4 após decorrido 300s é possível verificar uma distribuição térmica incomum e por conhecermos a localização das falhas, pode-se sugerir que começou a indicá-la, entretanto não é um resultado claro.

O resultado da amostra A5 já se comporta minimamente diferente, apresentando a localização das falhas, mas tendo uma distribuição térmica desequilibrada. A falha pode ser identificada, mas com baixa qualidade.