

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA - FEMEC

GEORGE DECHICHI BARBAR

Fusão multimodal para visualização 3D de defeitos usando termografia
infravermelha

Uberlândia
2022

GEORGE DECHICHI BARBAR

Fusão multimodal para visualização 3D de defeitos usando
termografia infravermelha

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Análise de Falhas

Orientador: Prof. Dr. Henrique Coelho
Fernandes

Uberlândia
2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

B229
2022 Barbar, George Dechichi, 1999-
Fusão Multimodal para Visualização 3D de Defeitos
Usando Termografia Infravermelha [recurso eletrônico] /
George Dechichi Barbar. - 2022.

Orientador: Henrique Coelho Fernandes.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Fernandes, Henrique Coelho,
1986-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

GEORGE DECHICHI BARBAR

Fusão multimodal para visualização 3D de defeitos usando
termografia infravermelha

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Análise de Falhas

Uberlândia, 25/03/2022

Banca Examinadora:

Henrique Coelho Fernandes - Prof. Dr. (UFU)

Ana Marta de Souza - Profa. Dra. (UFU)

João Rodrigo Andrade - Prof. Dr. (UFU)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda minha família, em especial meus pais Paula e Joseph que nunca deixaram de me apoiar, incentivar e mostrar o valor da educação, meu irmão Gabriel que me mostrou que nenhum objetivo é impossível quando se esforça e realmente deseja atingi-lo, e à minha irmã Giovana, não só um exemplo de superação e força, mas também minha motivação em todos os momentos.

Agradeço aos meus amigos da 101ª turma de Engenharia Mecânica por todo o apoio e a amizade ao longo desses quase 5 anos de curso, em especial àqueles que se importaram e caminharam lado a lado durante toda essa caminhada.

Ao professor Henrique pela oportunidade de poder trabalhar com algo que tenho muito interesse, apesar de uma área totalmente nova. Além de toda a orientação, apoio, paciência e interesse em darmos novos passos.

Agradeço também à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e à todos os professores que contribuíram para minha formação.

BARBAR, George Dechichi. Fusão multimodal para visualização 3D de defeitos usando termografia infravermelha. 2022. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, 2022.

RESUMO

Com os diversos avanços nos mais variados campos da engenharia, a demanda pelo controle da qualidade das peças aumentou. Tal necessidade tem relação direta com a redução dos riscos de falhas críticas, de paradas inesperadas nas linhas de produção e, conseqüentemente, maior segurança, a depender do caso analisado. Para possibilitar ter esse controle, algumas técnicas de análise foram desenvolvidas, desde testes diretos na peça até mesmo na qualidade do produto final.

A termografia infravermelha (IRT) se destacou frente às demais técnicas de análise de falha, visto que consegue fornecer informações estruturais internas da peça (subsuperficiais) e ser não destrutiva e rápida. Contudo, seu resultado é uma imagem 2D e pode ser de difícil interpretação. Para facilitar a interpretação dos resultados, o presente trabalho teve como objetivo apresentar um método de análise por fusão multimodal, com base na imagem termográfica e em um modelo 3D da peça.

Dessa maneira, foram feitas a modelagem 3D da peça, a projeção de seus pontos no plano, respeitando o referencial da câmera utilizada no teste termográfico, e posterior correlação entre a projeção e os dados da termografia. Assim, foi possível concluir que a fusão multimodal é uma técnica interessante para ser aplicada e que pode ser de grande auxílio para a análise estrutural da peça.

Palavras-chave: Termografia infravermelha; Ensaio não destrutivo; Falhas subsuperficiais; Fusão multimodal.

ABSTRACT

Along with the many advances in various fields of engineering, the demand for quality control of parts has increased. This need is directly related to reducing the risks of critical failures, unexpected stops in production lines and, consequently, greater safety, depending on the case analyzed. In order to make this control possible, some analysis techniques have been developed, from direct tests on the part to the quality of the final product.

Infrared thermography (IRT) has stood out from other failure analysis techniques because it can provide internal (subsurface) structural information about the part while being non-destructive and fast. However, its result is a 2D image and can be difficult to interpret. To facilitate the interpretation of the results, the present work aimed to present a multimodal fusion analysis method, based on the thermographic image and on a 3D model of the part. Therefore, the 3D modeling of the part in a *software*, the projection of its points on the plane, according to the referential of the camera used in the thermographic test, and subsequent correlation between the projection and the thermography data were performed. In this way, it was concluded that multimodal fusion is an interesting technique to be applied and that it can be of great help for the structural analysis of the part.

Keywords: Infrared thermography; Non-destructive test; Subsurface cracks; Multimodal fusion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplos de aplicação da termografia infravermelha para análise de a) câncer de mama (Lahiri <i>et al.</i> 2012), b) concreto (Rocha e Póvoas 2017) e c) painel elétrico (Aplicações da termografia na análise elétrica.).	15
Figura 2 – Exemplo de equipamento móvel utilizado para termografia infravermelha. Retirado de https://www.flir.com.br/products/flir-one-gen-3/	17
Figura 3 – Comportamento de um corpo real submetido a irradiação.	18
Figura 4 – Exemplo de reflexões difusa e especular.	19
Figura 5 – Diferentes tipos de ensaios de termografia infravermelha. Adaptado de Worksheel Thermal Camera.	20
Figura 6 – Procedimentos para fusão de dados no contexto da termografia infravermelha.	22
Figura 7 – Exemplos de falhas em compósitos. Adaptado de Ogawa e Masuda 2021.	24
Figura 8 – Representação da termografia pulsada em configuração de transmissão.	27
Figura 9 – Modelos da peça no <i>SolidWorks</i> a) 3D e b) no formato <i>STL</i>	28
Figura 10 – Pontos utilizados no algoritmo POSIT a) no modelo 3D e b) na imagem termográfica.	29
Figura 11 – Malha gerada pelo programa.	31
Figura 12 – Exemplo de uma malha sem refinamento na espessura.	32
Figura 13 – Sobreposição dos pontos sobre a imagem termográfica.	32
Figura 14 – Imagens termográficas em diferentes instantes: a) 0 s; b) 0,87 s; c) 1,5 s; e d) 2,5 s.	33
Figura 15 – Modelo 3D reconstruído com dados da termografia.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros intrínsecos da câmera.	31
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IRT - Infrared Thermography (Termografia Infravermelha)

CAD - Computer-Aided Design (Desenho Assistido por Computador)

PDE - Partial Differential Equation (Equações Diferenciais Parciais)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Termografia Infravermelha	17
2.2	Fusão de Dados para Visualização 3D	22
2.3	Defeitos e Materiais Compósitos	23
3	METODOLOGIA	27
3.1	Ensaio de Termografia Infravermelha	27
3.2	Modelagem 3D	27
3.3	Mudança do Referencial do Mundo Real para o da Câmera .	28
3.3.1	Calibração	28
3.3.2	Mudança para a Referência da Câmera	29
3.4	Projeção 2D	30
3.5	Reconstrução do modelo 3D	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5	CONCLUSÃO	35
6	PRÓXIMOS TRABALHOS	37
	REFERÊNCIAS	39
	APÊNDICE A – CÓDIGO MATLAB	43
	APÊNDICE B – PROJETO DA PEÇA	47

1 INTRODUÇÃO

Todo material está sujeito a sofrer falhas e apresentar defeitos ao longo de sua aplicação. Porém, em alguns casos, essas imperfeições podem resultar em uma falha crítica e inesperada. A fim de evitar tais eventos acidentais que, muitas vezes, provocam mortes ou longas paradas em linhas de produção, por exemplo, é interessante inspecionar a integridade dos materiais periodicamente. Dessa maneira, um tipo de supervisão muito aplicada é a visual, por ser rápida, barata e não interferir na integridade da peça para a análise. Entretanto, em locais de difícil observação ou em casos em que os defeitos são no interior da peça, essa inspeção não é a melhor a ser aplicada.

Um tipo de análise de falhas muito estudado ao longo dos últimos anos é o ensaio com base na termografia infravermelha. Apesar de ser bastante conhecida e aplicada com outros objetivos, como no diagnóstico de câncer de mama, na análise do funcionamento de painéis elétricos e no estudo estrutural de concreto (Figura 1), ela também pode ser utilizada para a verificação estrutural de peças. Além de não apresentar dificuldades em relação a observação da área desejada, é possível analisar a subsuperfície (região interna do material), de forma não destrutiva e rápida. Contudo, a realização do ensaio pode apresentar dificuldades quando realizado fora de laboratórios controlados ou quando a parte analisada apresenta geometria complexa.

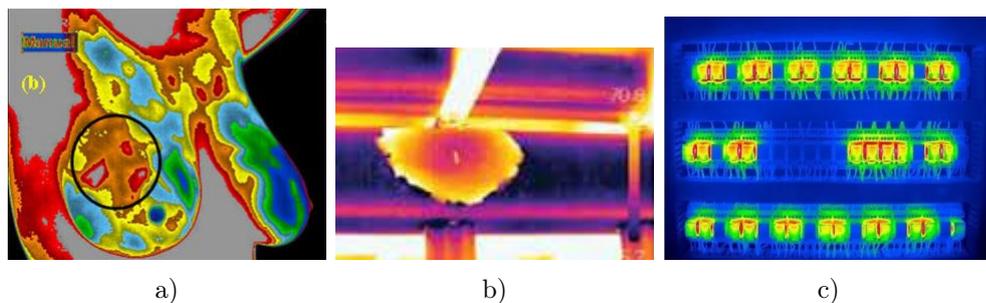


Figura 1 – Exemplos de aplicação da termografia infravermelha para análise de a) câncer de mama (Lahiri *et al.* 2012), b) concreto (Rocha e Póvoas 2017) e c) painel elétrico (Aplicações da termografia na análise elétrica.).

Apesar de ser muito interessante de ser aplicada em diversas áreas e conter uma quantidade expressiva de informações em seus resultados, a análise adequada dos resultados da Termografia Infravermelha (IRT - *Infrared Thermography*) é fundamental para a avaliação correta da integridade estrutural do material. Pelo resultado ser uma representação 2D de um objeto 3D, a interpretação não é trivial e pode até mesmo ser pouco conclusiva. Por isso, é interessante haver um tratamento posterior da imagem gerada pelo teste, de maneira que os resultados possam ser vistos em uma reconstrução 3D da peça, facilitando

a análise. Uma técnica para obtenção da reconstrução 3D da peça é a fusão multimodal, que realiza uma correlação entre os pontos de um modelo CAD (*Computer-Aided Design* - Desenho Assistido por Computador) da peça e os *pixels* da imagem termográfica 2D.

O objetivo do presente trabalho foi realizar um teste de fusão multimodal de dados com base em um ensaio de IRT já realizado (KIMBERLI, 2018). Assim, para abordar todo os processos e os conceitos envolvidos, o trabalho foi dividido em tópicos. Seguindo ao primeiro tópico, introdução, no tópico 2 uma breve revisão bibliográfica com os principais assuntos para a compreensão do estudo é apresentada. Já no terceiro tópico, a metodologia utilizada no estudo é explicada, para que seja possível compreender o processo aplicado na fusão de dados. No tópico 4, os resultados obtidos são apresentados e uma discussão acerca deles é feita, abordando aspectos importantes para se analisar a qualidade e a validade do trabalho. No tópico 5 é apresentada a conclusão do trabalho com possibilidades de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico será apresentada uma breve revisão bibliográfica de assuntos fundamentais para o entendimento do trabalho. Dentre esses assuntos, pode-se destacar os fundamentos e as especificações da termografia infravermelha, a fusão de dados e suas aplicações, e o que são defeitos e materiais compósitos e a importância de estudá-los.

2.1 Termografia Infravermelha

A termografia infravermelha (IRT) é um tipo de ensaio não destrutivo que tem por base a medição da radiação infravermelha e sua posterior correlação com a temperatura. Por ser uma técnica que não envolve nenhum tipo de radiação nociva ao ser humano, não requer contato com a peça e não danifica a área a ser analisada, ela apresenta diversas aplicações. Porém, esse método resulta em uma imagem 2D, de forma que, atualmente, o foco dos estudos é o tratamento dessa imagem gerada buscando estratégias para uma análise mais conclusiva.

A origem da IRT data do início do século XIX. Desde então, diferentes pesquisadores contribuíram com estudos sobre termografia e radiação infravermelha. Dentre eles, pode-se citar o astrônomo Sir William Herschel e a descoberta da radiação infravermelha; o alemão Heinrich Rudolf Hertz, com a confirmação da reflexão e refração de ondas eletromagnéticas; e o alemão Max Planck e a distribuição do poder emissivo em função do comprimento de onda (MEOLA, 2012). Mais tarde, no século XX, a termografia começou a avançar exponencialmente, muito influenciada pela aplicação militar durante as Guerras Mundiais (PANTOJA, 2016). Atualmente, muitas empresas popularizaram a aplicação dessa tecnologia, sendo possível até utilizar aplicativos no próprio celular (Figura 2).



Figura 2 – Exemplo de equipamento móvel utilizado para termografia infravermelha. Retirado de <https://www.flir.com.br/products/flir-one-gen-3/>.

Mesmo com grandes avanços dos equipamentos utilizados para a termografia, é importante ter o conhecimento dos fenômenos envolvidos no teste para evitar possíveis erros de análise. Dessa forma, a termografia infravermelha tem por base a medição da radiação infravermelha, cuja intensidade tem relação direta com a temperatura, sendo possível estabelecer uma correlação entre elas. Além disso, apesar de invisível para o olho humano, qualquer corpo com temperatura superior ao zero absoluto emite radiação infravermelha (USAMENTIAGA *et al.*, 2014).

Todos os objetos absorvem, refletem e transmitem parte da radiação incidente (Figura 3), em concordância com a Primeira Lei da Termodinâmica, referente à conservação de energia. No caso da IRT, como o objetivo é avaliar apenas a radiação emitida pelo corpo, há alguns fatores importantes para serem avaliados na análise e no tratamento da imagem termográfica. As propriedades térmicas que devem ser analisadas são: emitância, absorptância, refletividade e transmitância (MALDAGUE, 2001):

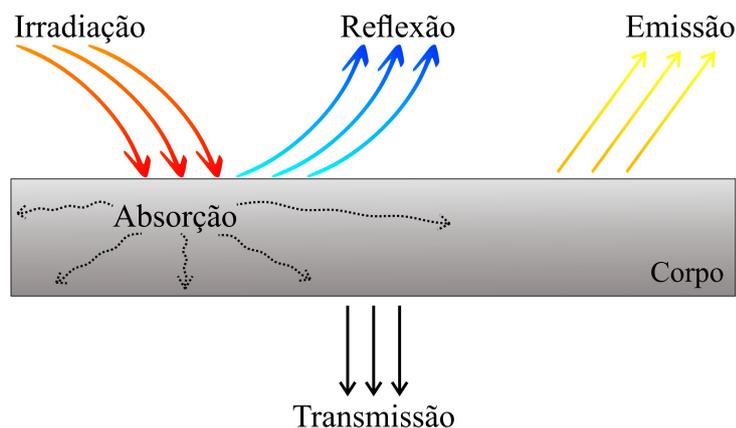


Figura 3 – Comportamento de um corpo real submetido a irradiação.

- **Emitância ou Emissividade (ε):** É um fator de correção que se refere a capacidade do objeto de emitir energia absorvida. É um valor numérico entre 0 e 1, de maneira que a quantidade de energia emitida é comparada com a quantidade de energia que seria emitida no caso de um corpo negro (capaz de emitir 100% da radiação incidente) nas mesmas condições. Apesar de ser uma propriedade relacionada ao corpo, não é constante, sendo que depende da direção de emissão avaliada, da temperatura e do comprimento de onda (MALDAGUE, 2001).
- **Absortância (α):** É uma propriedade relacionada à fração de irradiação absorvida pelo corpo. Também depende da direção e do comprimento de onda, com pouca influência da temperatura. Normalmente, em análises e estudos, trabalha-se com uma média direcional, a fim de reduzir a complexidade (INCROPERA *et al.*, 2003).

- **Refletividade (ρ):** É uma propriedade responsável por determinar a fração de energia da irradiação que é refletida pela superfície. Diferentemente do que foi citado anteriormente, além da direção refletida e do comprimento da onda, a direção de incidência da irradiação também interfere, sendo necessário fazer uma análise simplificadora, considerando apenas uma refletividade média. Ao se analisar a reflexão, é possível definir dois tipos de superfícies, as difusas, quando a intensidade da radiação refletida independe do ângulo de reflexão para qualquer ângulo de incidência (Figura 4a), e as especulares, as quais refletem a radiação incidente com um ângulo de reflexão igual ao de incidência (Figura 4b) (INCROPERA *et al.*, 2003).

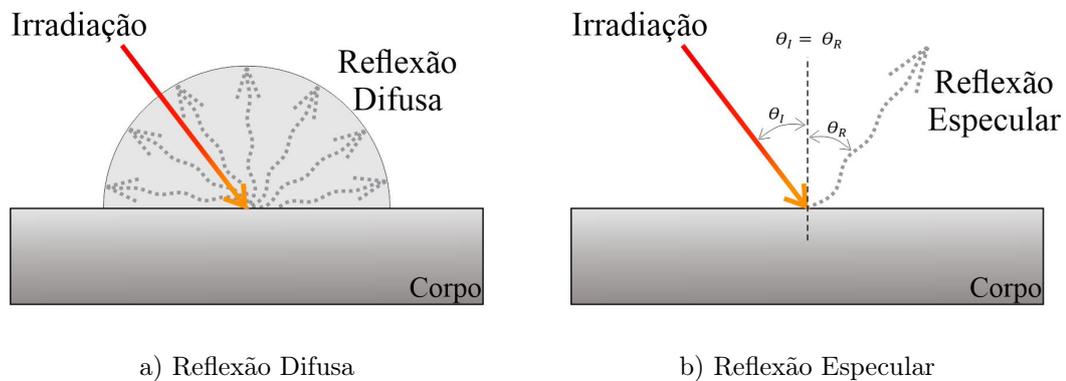


Figura 4 – Exemplo de reflexões difusa e especular.

- **Transmitância (τ):** Refere-se à quantidade de energia irradiada transmitida pelo corpo, isto é, energia que passa pelo material. Dessa forma, é uma razão entre a quantidade de radiação que passa pelo objeto e a quantidade total de irradiação. Como as demais propriedade citadas, é de difícil avaliação, o que leva a utilização de valores totais independentes de direção, e também depende do comprimento de onda analisado (INCROPERA *et al.*, 2003).

A informação de interesse para a IRT é a radiação emitida pelo corpo. Porém, nos testes, o equipamento termográfico de aquisição (sensor ou câmera) também capta a energia refletida pelo objeto e a energia emitida pelo meio em que o teste é realizado (KYLILI *et al.*, 2014). Essas outras radiações aferidas afetam o resultado final do teste, de tal forma que uma calibração prévia do instrumento e um tratamento posterior da imagem devem ser feitos, a fim de se obter uma análise correta dos resultados.

Muitos estudos verificaram a importância da calibração da câmera infravermelha (SILVA, 2012). Em alguns testes, cujo objetivo era determinar o coeficiente de condutividade térmica de materiais, os erros chegaram a 25%, quando o teste era realizado sem a calibração da câmera infravermelha (SILVA, 2012). O procedimento de calibração pode

variar a depender do instrumento utilizado, mas o objetivo básico é ter uma correlação precisa entre radiação observada e temperatura. Normalmente, são feitas medições de alvos com temperaturas conhecidas e, em seguida, compara-se os valores conhecidos com os medidos.

Além da calibração e do tratamento posterior da imagem, é importante determinar qual o melhor ensaio a ser realizado para observação desejada. Apesar de envolver os mesmos conceitos e princípios da termodinâmica, há diferentes tipos de testes de IRT (MALDAGUE, 2001). Essas variações surgiram devido a necessidade de se analisar características diferentes nos mais diversos tipos de materiais. Para caracterizar um ensaio de termografia infravermelha, há muitos aspectos a serem definidos, como a fonte, o tipo de excitação e o método de escaneamento. Como mostra a Figura 5, é necessário estabelecer alguns parâmetros para que o teste seja bem definido e compreendido, uma vez que há grandes variações que os distinguem.

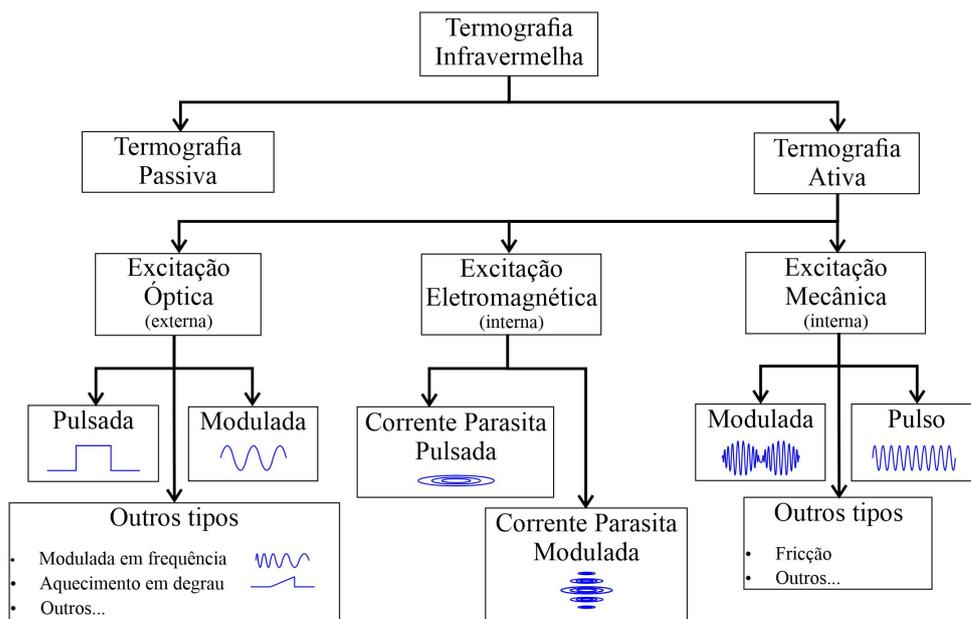


Figura 5 – Diferentes tipos de ensaios de termografia infravermelha. Adaptado de Worksheel Thermal Camera.

Dentre os diversos tipos de ensaios mostrados, vale ressaltar a distinção entre dois grandes grupos de termografia: a passiva e a ativa. Essa diferença refere-se a fonte de energia, sendo que, na o ensaio de termografia passiva, não há a presença de uma fonte externa de energia, ou seja, o próprio corpo de ensaio gera um diferencial de temperatura para ser analisado, como no caso da termografia do corpo humano. Já nos ensaios ativos, a região não apresenta uma geração de energia própria e é necessário utilizar uma fonte externa para impor a diferença de energia no sistema.

Destaca-se três definições importantes para a realização do teste, são elas:

- **Abordagem:** A abordagem da termografia infravermelha refere-se a presença ou não de um estímulo externo com o auxílio de algum equipamento adicional. Há duas grandes divisões, a passiva e a ativa. Na termografia passiva, o teste é realizado baseado no processo de operação da peça e na conservação de energia, sem que haja a presença de um estímulo energético externo ao processo. Normalmente, é aplicada de maneira qualitativa, com o objetivo de verificar temperaturas anormais no processo. Já na termografia ativa, a diferença de temperatura é gerada a partir de um estímulo externo, sendo esse de aquecimento ou resfriamento (MALDAGUE, 2001; PEACOK *et al.*, 2021).
- **Tipo de Excitação:** A maneira como ocorrerá o estímulo térmico do corpo é de fundamental importância para que seja possível observar o resultado desejado. A excitação pode ocorrer de maneira externa ou interna, isto é, o equipamento pode promover a diferença de temperatura de dentro para fora ou de fora para dentro da peça. Um tipo de estímulo externo muito estudado, por sua simplicidade, é a excitação óptica, que consiste em uma fonte de luz. Apesar de certas limitações inerentes, que dificultam a avaliação de materiais muito anisotrópicos e de defeitos profundos e pequenos (POELMAN *et al.*, 2020).
- **Modelagem da Excitação:** A modelagem correta da excitação térmica implicará na qualidade do resultado, uma vez que determina a maneira como o estímulo será de fato aplicado sobre a peça. Dois tipos mais aplicados, são as excitações ópticas pulsada e a modulada. A pulsada consiste no rápido aquecimento da peça e monitoramento do decaimento de temperatura. É muito aplicada por ser um teste rápido, com um estímulo que pode variar de milisegundos, para materiais condutores, a alguns segundos, para materiais isolantes. Em contrapartida, a excitação modulada é um tipo de ensaio mais longo que tem grande dependência do monitoramento temporal e térmico simultâneos. Sua análise é feita pela oscilação de temperatura do regime permanente e podem ser aplicados estímulos periódicos da fonte (MALDAGUE, 2001).

Mesmo que haja diversos tipos de ensaios de termografia infravermelha, ainda há algumas limitações e variações que ocorrem, principalmente pela falta de controle do ambiente de ensaio, erro comum quando os testes são feitos em campo. A importância de se ter um ambiente controlado fica nítido no trabalho de Maroy *et al.* (2017), o qual constatou uma oscilação de 80% nos resultados de efetividade térmica de um tipo de vidro na construção civil, devido a velocidade do vento.

Por ser um teste que depende diretamente das propriedades termodinâmicas do material, alguns trabalhos mostraram que materiais com alto coeficiente de condutividade térmica podem apresentar dificuldades, uma vez que a energia térmica pode fluir muito

rápido pela peça, sem ter tempo para verificar o que se deseja (DIZEU; BENDADA; LAURENDEAU, 2017). Com isso, por essa difusão do calor ocorrer no interior do corpo, é difícil de se observar defeitos profundos.

Mesmo sendo internos, os defeitos ficam visíveis nas imagens termográficas devido maneira como interagem com o calor. Isto é, como se comportam de forma semelhante a vazios internos, quando o calor está sendo difundido pela peça e passa por um defeito (vazio), ele é conduzido de maneira mais rápida com uma dispersão menor, gerando assim uma região de maior temperatura na imagem termográfica. Portanto, regiões com um diferencial de temperatura elevado de maneira inesperada, podem ser representações de defeitos.

2.2 Fusão de Dados para Visualização 3D

A fusão de dados entre a imagem 2D gerada pela termografia infravermelha e o modelo 3D da peça segue alguns passos fundamentais de base, como mostrado na Figura 6. Apesar de não fazer parte da fusão de dados em si, é importante ressaltar que os equipamentos utilizados devem estar calibrados e operando de maneira satisfatória.



Figura 6 – Procedimentos para fusão de dados no contexto da termografia infravermelha.

Fora a calibração de temperatura do equipamento termográfico, é necessário realizar um outro tipo de calibração, voltada para os parâmetros intrínsecos do equipamento, como o ponto focal e o ponto de princípio, para possibilitar a correlação entre os *pixels* da imagem termográfica e os pontos do modelo 3D do objeto. Dessa forma, é possível definir com

precisão a orientação e a posição dos pontos em relação às coordenadas da câmera, sendo tal procedimento a base para possibilitar a fusão de dados e outros tipos de reconstruções da imagem. Nesse caso, é comum haver um "objeto de calibração", com dimensões bem definidas e com posições espaciais fáceis de serem observadas na imagem, para obtenção de uma correlação entre as coordenadas (CHEN; WARREN, 2020).

Com isso, primeiro é necessário realizar a aquisição dos dados, ou seja, a execução do ensaio de termografia e a geração de um modelo 3D da peça. Em seguida, é realizado o tratamento dos dados, tanto da imagem termográfica que pode apresentar ruídos, quanto da projeção do modelo 3D em um modelo 2D em relação às coordenadas da câmera, o que definirá a relação entre os *pixels* e os pontos do modelo. Por fim, com os procedimentos anteriores feitos de maneira correta, basta relacionar os dados (pontos e temperaturas) e reconstruir o modelo 3D.

Apesar de ser possível tirar conclusões diretamente da termografia infravermelha, a fusão de dados é importante para que se possa ter a análise e o entendimento por meio de modelos reais da peça. Assim, é possível observar características e falhas subsuperficiais de maneira mais direta, como trincas internas (MENG *et al.*, 2019) e textura da fachada de construções (HOEGNER; STILLA, 2018).

Apesar do objetivo ser o mesmo, ou seja, visualizar os dados da termografia em um modelo 3D, muitos pesquisadores estudam diferentes métodos para realizar essa visualização. Muitos métodos que ainda são aplicados acoplam uma câmera 3D ao sensor infravermelho para ter o mapeamento das imagens termográficas 2D (DIZEU *et al.*, 2016). Além disso, pode-se destacar alguns exemplos de outros métodos utilizados que mostraram resultados satisfatórios, como a fusão automática dos dados com um modelo CAD estabelecido (SELS *et al.*, 2019) e a fusão por meio de imagens tridimensionais ópticas (MENG *et al.*, 2019).

2.3 Defeitos e Materiais Compósitos

Todo material está sujeito a apresentar defeitos no momento da fabricação ou danos ao longo da aplicação. A caracterização dessas discontinuidades pode variar dependendo do tipo de material e processo de fabricação. Por exemplo, aços fundidos podem ter formação de óxidos ou solidificação mal controlada, de maneira que vazios internos que atuam como concentradores de tensão aparecem na peça final, o que provoca a fragilização do material (CAMPBELL, 2017).

Os defeitos, ou imperfeições, em sólidos podem ser caracterizados em diferentes tipos, como lacunas e impurezas que distorcem a estrutura dos aços de maneira microscópica; ou poros, trincas e inclusões, os quais são maiores e definidos como defeitos volumétricos ou de massa (CALLISTER, 2002). Além disso, por afetarem de maneira considerável a resistência dos materiais e, por consequência, suas aplicações, muitas pesquisas focam em determinar

a posição, o tamanho e o formato desses defeitos, principalmente nos compósitos.

A composição básica dos compósitos é um material base, usado em maior quantidade, importante para uma ligação adequada entre os materiais, chamado de matriz; e um de reforço, que é utilizado em menor quantidade, o qual é responsável pela mudança das propriedades do material da matriz, chamado de fase dispersa. Assim, percebe-se que é possível definir diferentes materiais como compósitos, como o concreto armado utilizado em construções civis (a matriz é o concreto e a fase é a armação interna de barras de aço) e, até mesmo, a madeira (a lignina representa a matriz e a celulose a fase dispersa).

Os compósitos são muito estudados por serem capazes de apresentar combinações de propriedades, principalmente mecânicas, melhores do que as obtidas em ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos (CALLISTER, 2002). Porém, o processo de fabricação de materiais compósitos ainda não é um processo totalmente automatizado e depende da interação humana. Dessa maneira, a qualidade da peça final pode variar muito e diferentes tipos de defeitos podem aparecer, como delaminações, vazios internos, rachaduras e não uniformidade, como mostrado na Figura 7 (HELLSTEIN; SZWEDO, 2016).

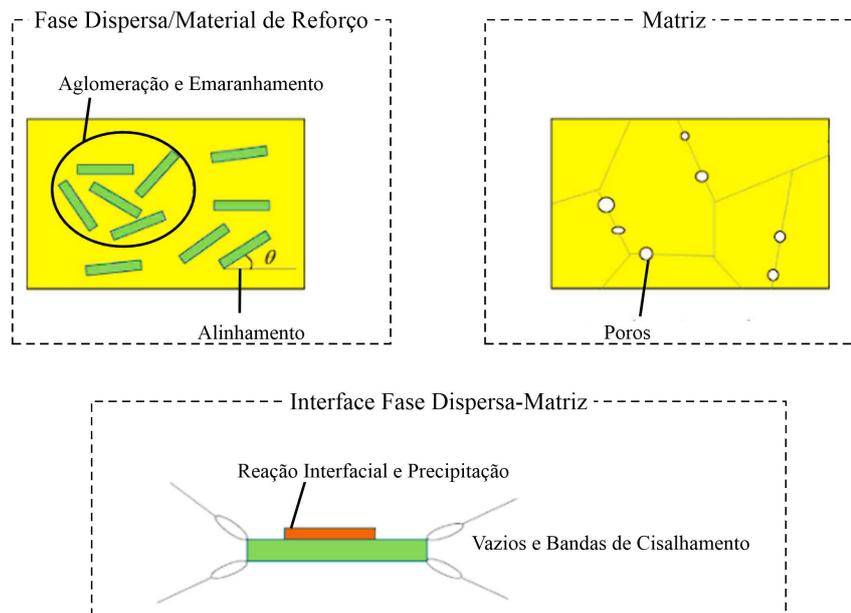


Figura 7 – Exemplos de falhas em compósitos. Adaptado de Ogawa e Masuda 2021.

As falhas podem ocorrer tanto em relação à fase dispersa (fibras), a qual pode estar configuradas de maneira desorganizada (não uniforme), quanto à matriz, que pode apresentar poros (Figura 7). Fora isso, a região da interface entre os dois materiais também é crítica, uma vez que é onde ocorre a ligação entre eles. Dessa forma, caso não haja um controle adequado na fabricação, pode haver reações que levam a formação de precipitados e/ou a formação de vazios e bandas de cisalhamento.

Entre os diferentes materiais compósitos usados na engenharia, destaca-se a ampla

utilização dos compósitos com carbono, sendo a fibra de carbono um exemplo. Isso ocorre devido a abundância de matéria-prima, facilidade na síntese dos materiais e propriedades interessantes, como resistência elevada e densidade baixa (WANG *et al.*, 2021). Assim, a análise e inspeção desses materiais é fundamental para que falhas inesperadas não ocorram. Portanto, a aplicação da termografia infravermelha, que é um ensaio não destrutivo, ou seja, não compromete a peça para a análise, além de oferecer uma resposta rápida de regiões invisíveis macroscopicamente, como a subsuperfície, pode ser uma das únicas possibilidades, em alguns casos.

3 METODOLOGIA

Para fazer a fusão multimodal do modelo 3D e da imagem termográfica, há alguns passos a serem seguidos, como mostrado pela Figura 6. Inicialmente, é necessário ter um modelo da peça em que foi feito o ensaio não destrutivo, seja por meio do escaneamento ou por meio de algum programa de CAD, e os resultados da termografia. Dessa forma, com arquivo da peça importado para o programa que será utilizado, é preciso mudar o referencial do modelo para o da câmera usada. Com a peça definida nos eixos da câmera, basta realizar sua projeção 2D e, assim, ter uma relação entre os *pixels* da imagem termográfica e os pontos do modelo 3D.

Para executar todas as etapas relacionadas à fusão de dados, um código no *MATLAB* foi desenvolvido (Apêndice A), de forma que o resultado final é o modelo 3D já reconstruído. Esse foi o *software* utilizado por já oferecer funções e ferramentas capazes de importar e gerar a malha, de maneira simples e rápida.

3.1 Ensaio de Termografia Infravermelha

O ensaio de termografia utilizado para obter as imagens termográficas utilizadas foi um ensaio de termografia ativa pulsada em configuração de transmissão. Dessa maneira, a peça é posicionada entre a fonte de energia, a qual gera apenas uma pulso de energia para promover o calor, e a câmera termográfica (Figura 8). Portanto, o dado de interesse nesse ensaio é o calor transmitido pela peça.

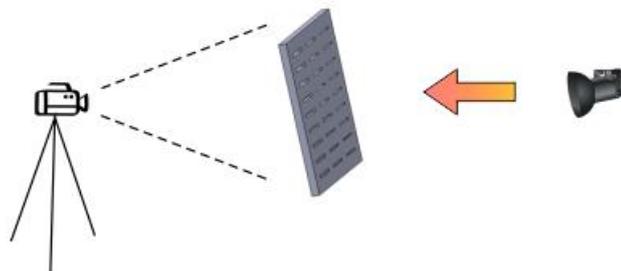


Figura 8 – Representação da termografia pulsada em configuração de transmissão.

3.2 Modelagem 3D

Para fazer o modelo 3D da peça, foi utilizado o *software* SolidWorks e, para ser importado posteriormente, o arquivo foi salvo no formato *STL*, o qual salva a geometria como uma composição de tetraedros (Figura 9). Além disso, a amostra utilizada neste trabalho é de PVC, tem 100 mm de largura, 100 mm de comprimento e 5 mm de espessura, e possui diversos furos feitos em sua parte traseira (chamados no inglês de *flat bottom*

holes) em diversas posições e com diversas profundidades (Apêndice B). Dessa forma, tem-se a peça 3D no ambiente computacional, na mesma referência do programa usado.

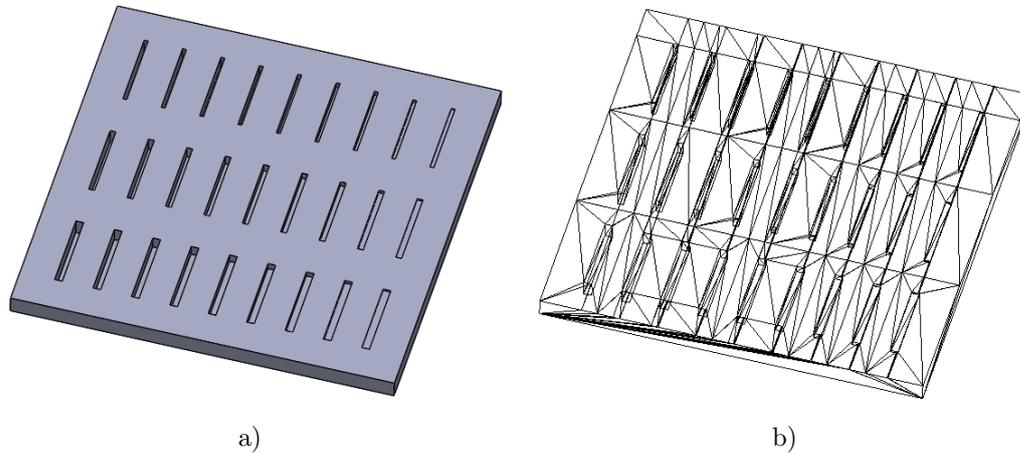


Figura 9 – Modelos da peça no *SolidWorks* a) 3D e b) no formato *STL*.

Os furos retangulares de diferentes espessuras e profundidades estão presentes para simular defeitos na peça e saber como aparecem na imagem termográfica. Dessa forma, é de se esperar que os furos mais profundos serão mais visíveis na imagem, uma vez que o calor será conduzido por uma fina camada de material, ou seja, será transmitido de maneira mais rápida para a câmera termográfica.

3.3 Mudança do Referencial do Mundo Real para o da Câmera

Para realizar a projeção da peça nos eixos de referência da câmera e, consequentemente, dar sequência à fusão dos dados, é preciso saber alguns parâmetros intrínsecos da câmera, que são obtidos por meio da calibração. Essas informações podem afetar a imagem gerada e referem-se às condições internas do equipamento usado, como: posição do centro, distância focal, *skewness* (relação de perpendicularidade entre os eixos) e distorção *lens* (distorção associada à lente da câmera).

3.3.1 Calibração

O processo de calibração da câmera é muito importante para que os dados encontrados estejam corretos e que o tratamento adequado dos dados seja possível de ser feito. Esse processo consiste na visualização de um anteparo com marcações bem definidas cujas posições no mundo real são conhecidas. Ao se relacionar as posições conhecidas do objeto no mundo real à imagem observada pela câmera, tem-se a calibração e os parâmetros intrínsecos definidos. Nesse trabalho, foram utilizadas as informações obtidas na calibração da câmera usada no trabalho de Kimberli (2018).

3.3.2 Mudança para a Referência da Câmera

Em seguida, com as informações provenientes da calibração da câmera, é preciso projetar as posições dos pontos da peça nos eixos de referência da câmera. Para isso, é necessário definir uma matriz de rotação e uma de translação, responsáveis por fazer essa mudança de referência. Assim, o algoritmo POSIT (*Pose from Orthography and Scaling with Iterations*) (BOUGET, 2015) foi utilizado.

Esse algoritmo é iterativo e rápido, capaz de gerar resultados confiáveis. Para utilizá-lo, é preciso informar pelos menos quatro pontos no modelo 3D e suas referências na imagem 2D, a distância focal e, caso haja, a posição do ponto central da imagem. Dessa maneira, os pontos escolhidos para serem relacionados no código, foram as quinas, por serem bem definidas e de fácil identificação, e mais um ponto adicional na aresta de um dos vazios internos que representam as falhas, para melhorar a convergência dos pontos (Figura 10).

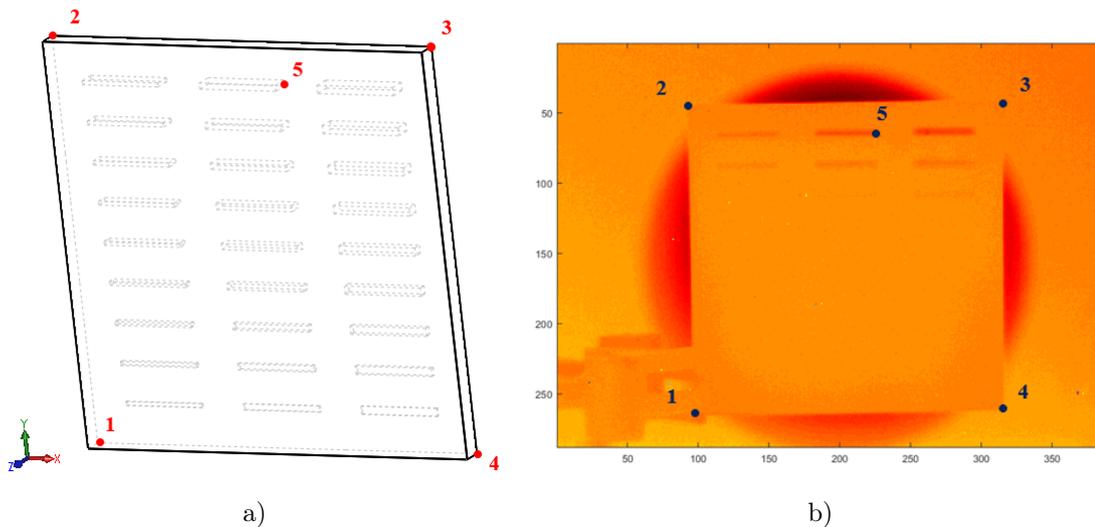


Figura 10 – Pontos utilizados no algoritmo POSIT a) no modelo 3D e b) na imagem termográfica.

A projeção dos pontos da peça nos eixos de referência da câmera pode ser feita como mostrado pela Equação 3.1:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_m & T_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

onde R_m é uma matriz 3x3 de rotação e T_m é uma matriz 3x1 de translação, sendo que ambas são obtidas por meio da aplicação do algoritmo POSIT. Já os pontos $P_c(X_c, Y_c, Z_c, 1)$

e $P_w(X_w, Y_w, Z_w, 1)$ representam as posições de cada um dos pontos nos eixos da câmera e do mundo real, respectivamente.

3.4 Projecção 2D

Com todos os pontos do modelo 3D projetados nos mesmos eixos de referência da peça, ainda é preciso fazer a projecção 2D, de tal forma que, ao final do processo, haverá uma relação entre os pontos projetados e os *pixels* da imagem termográfica. Dessa forma, essa relação pode ser encontrada por meio da Equação 3.2:

$$\begin{cases} u = \frac{X'}{Z'} \\ v = \frac{Y'}{Z'} \end{cases} \quad (3.2)$$

onde as posições dos *pixels* são representadas pelas coordenadas $[u, v]$.

Os valores de X', Y' e Z' são obtidos por meio da multiplicação da matriz de parâmetros intrínsecos da câmera com os pontos projetados nos eixos da câmera, como mostrado pela Equação 3.3. Dessa forma, fl representa a distância focal da câmera e $[c_x, c_y]$ são as posições do pontos central da imagem em *pixels*.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fl & 0 & c_x & 0 \\ 0 & fl & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Mesmo com a realização de todas as operações matemáticas, para saber se os pontos escolhidos, tanto no mundo real quanto na imagem termográfica, foram capazes de promover uma boa correlação, é importante verificar a projecção 2D da peça. Uma maneira de se fazer essa verificação é, na mesma imagem, plotar os pontos do modelo 3D projetados no plano e a imagem termográfica. Dessa forma, por uma inspeção visual da sobreposição dos pontos e da região da imagem, determina-se se a projecção está bem feita.

3.5 Reconstrução do modelo 3D

Para se ter a visualização do modelo 3D com os dados de termografia infravermelha, após todos os procedimentos feitos de maneira correta, basta recriar a malha 3D do modelo com a respectiva o objeto com as posições do modelo 3D representando as temperaturas e, assim, concluir a fusão multimodal e reconstrução do modelo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação a calibração da câmera utilizada, os dados foram retirados do equipamento utilizado por Kimberli (2018). Dessa forma, as informações relevantes para a fusão do modelo 3D com a imagem termográfica foram reunidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros intrínsecos da câmera.

Parâmetro	Valor
Distância Focal	747,3876 px
Posição do Centro [x ; y]	[196,6060 ; 151,1264] px
<i>Skewness</i>	0

Para se ter as informações do modelo 3D feito no *SolidWorks*, as funções *importGeometry* e *generateMesh* foram utilizadas para importar e gerar a malha, respectivamente. Dessa forma, um modelo PDE foi criado com todos os dados. Assim, uma malha de volumes tetraédricos e com refinamento nas quinas foi gerada (Figura 11), contendo 582967 nós.

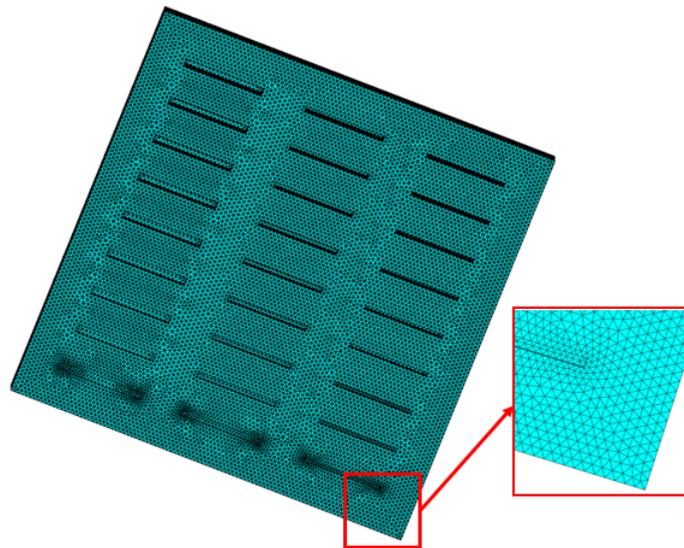


Figura 11 – Malha gerada pelo programa.

Apesar da facilidade de uso das funções utilizadas, elas não permitem que haja um controle refinado da malha, isto é, não é possível gerar uma malha otimizada com controle do refinamento. No caso estudado, por se tratar de uma peça muito fina, se comparar a espessura com as outras dimensões, era possível ter uma malha sem nenhum ponto interno, caso o refinamento fosse mal feito. Dessa maneira, o modelo importado se comportaria como duas camadas com uma vazia entre elas (Figura 12).

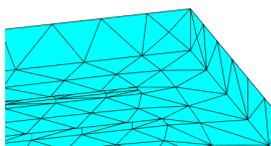


Figura 12 – Exemplo de uma malha sem refinamento na espessura.

Com a malha gerada, a projeção 2D dos pontos da malha mostrada foi feita, possibilitando uma primeira análise da qualidade da projeção, ou seja, se os dados utilizados para correlacionar o referencial do modelo e da câmera estão corretos. Assim, é possível sobrepor os pontos projetados e a imagem termográfica, onde os pontos pretos representam os pontos do modelo 3D projetados no plano e, em laranja, a imagem termográfica. (Figura 13).

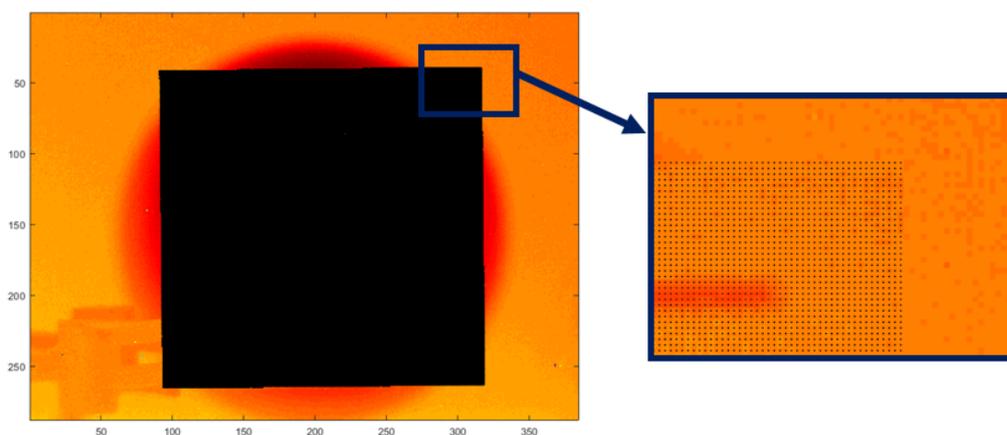


Figura 13 – Sobreposição dos pontos sobre a imagem termográfica.

Para se ter uma boa projeção 2D do modelo da peça, a mudança de referencial do mundo real para a referência da câmera é crucial. Dessa forma, a escolha dos pontos do mundo real e suas respectivas posições na imagem termográfica faz muita diferença no resultado. Portanto, quanto mais preciso for essa seleção, melhor é o resultado esperado (BOUGET, 2015).

No presente estudo, os pontos escolhidos foram as quinas e uma aresta de um dos vazios da peça. De maneira que as posições no mundo real foram definidas no código e as posições na imagem termográfica foram definidas a olho nu, por meio da interação do usuário, o qual selecionou os cinco pontos clicando sobre a imagem termográfica.

Mesmo representando regiões bem definidas e de fácil identificação, a seleção a olho nu da posição exata da quina é muito difícil, pois a imagem pode não possibilitar uma boa visualização do local, além da quina ser representada por apenas um único distinto ponto. Fora isso, há a seleção do centro da aresta, que pode não estar posicionada exatamente sobre a aresta nem em seu centro.

Vale ressaltar que a imagem termográfica utilizada aqui foi a da sequência temporal referente ao tempo de 2,5 s de um ensaio de termografia pulsada em configuração de transmissão, como já foi dito anteriormente, onde a energia térmica foi aplicada no tempo de 0,87 s. A escolha do *frame* utilizado foi feita com base na análise em diferentes tempos, até que a visualização dos vazios da peça fossem facilmente identificados (Figura 14).

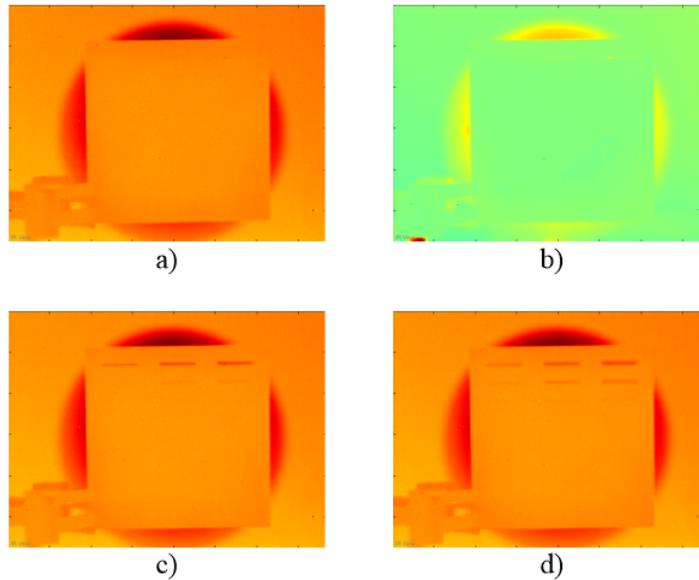


Figura 14 – Imagens termográficas em diferentes instantes: a) 0 s; b) 0,87 s; c) 1,5 s; e d) 2,5 s.

Com uma boa relação entre os pontos do modelo 3D no plano e a imagem termográfica, consegue-se atribuir a cada ponto um valor obtido do teste de termografia. Por fim, é possível reconstruir o modelo 3D com os dados do ensaio não destrutivo associados a ele (Figura 15).



Figura 15 – Modelo 3D reconstruído com dados da termografia.

5 CONCLUSÃO

Nota-se que mesmo sem um controle preciso de todos os parâmetros da malha, o modelo importado para o estudo permitiu um bom refinamento na largura e no comprimento, bem como uma boa definição na espessura, o que é mais importante no caso de se querer observar falhas internas, dada a necessidade de se ter informações termográficas da parte interna da peça. Portanto, para esse caso, a importação do modelo por meio de funções já existentes no *MATLAB*, foi suficiente para a análise.

Além disso, é possível perceber que a projeção 2D do modelo é algo que apresenta muitas variáveis e possibilidades de erro, ainda mais dependendo da seleção manual dos pontos na imagem. Contudo, com uma análise da sobreposição dos pontos projetados e da imagem termográfica (Figura 13), foi possível concluir que os pontos definidos foram bem escolhidos.

Ao se analisar todo o procedimento e os resultados atingidos, percebe-se que o resultado atingido foi satisfatório de acordo com a proposta. Dessa forma, foi feita a fusão multimodal de um teste de termografia infravermelha com um modelo 3D feito em um programa CAD, o que possibilita uma forma de se analisar falhas internas da peça de uma maneira mais simples e definitiva do que analisar apenas a imagem 2D.

6 PRÓXIMOS TRABALHOS

Com base em tudo que foi exposto e discutido ao longo desse trabalho, uma sugestão interessante para um próximo estudo, seria a verificação de como o calor se comporta ao longo do tempo. Assim, o próximo passo nessa pesquisa é gerar uma sequência de imagens 3D para visualização de todo o volume temporal do ensaio termográfico.

Por fim, como melhorias, alterações na maneira como os pontos são definidos para a mudança do referencial do mundo real para o da câmera ou na geração da malha podem resultar em correlações mais precisas entre a peça e a termografia. Sendo que outros *softwares* podem ser estudados para a verificação da fusão multimodal mostrada, até mesmo com auxílio de engenharia reversa para determinação dos parâmetros.

REFERÊNCIAS

- APLICAÇÕES da termografia na análise elétrica. <<https://tokenengenharia.com.br/servicos/termografia-eletrica/>>. Acessado em 29/03/2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 15.
- BOUGET, J. Complete camera calibration toolbox for matlab©. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 32.
- CALLISTER, W. D. Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução, 5ª edição. **Rio de Janeiro: LTC**, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- CAMPBELL, J. Melting, remelting, and casting for clean steel. **steel research international**, Wiley Online Library, v. 88, n. 1, p. 1600093, 2017. Citado na página 23.
- CHEN, Y.; WARREN, W. 3d fusion of infrared images with dense rgb reconstruction from multiple views—with application to fire-fighting robots. **arXiv preprint arXiv:2007.14606**, 2020. Citado na página 23.
- DIZEU, F. D.; BENDADA, A.; LAURENDEAU, D. Nondestructive testing of objects of complex shape using infrared thermography: Determination of the spatiotemporal distribution of the irradiation heat flux. **Infrared Physics Technology**, v. 83, p. 164–176, 2017. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449516306946>>. Citado na página 22.
- DIZEU, F. D. *et al.* Three-dimensional nondestructive evaluation of cylindrical objects (pipe) using an infrared camera coupled to a 3d scanner. **NDT**, 2016. Citado na página 23.
- HELLSTEIN, P.; SZWEDO, M. 3d thermography in non-destructive testing of composite structures. **Measurement Science and Technology**, IOP Publishing, v. 27, n. 12, p. 124006, 2016. Citado na página 24.
- HOEGNER, L.; STILLA, U. Mobile thermal mapping for matching of infrared images with 3d building models and 3d point clouds. **Quantitative Infrared thermography journal**, Taylor & Francis, v. 15, n. 2, p. 252–270, 2018. Citado na página 23.
- INCROPERA, F. P. *et al.* Fundamentos de transferência de calor e massa. 6ª edição. **Rio de Janeiro, editora LTC**, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- KIMBERLI, R. **Validierung eines Thermografiemoduls unter Verwendung ambienter Thermografie**. 2018. Citado 3 vezes nas páginas 16, 28 e 31.
- KYLILI, A. *et al.* Infrared thermography (irt) applications for building diagnostics: A review. **Applied Energy**, Elsevier, v. 134, p. 531–549, 2014. Citado na página 19.
- LAHIRI, B. *et al.* Medical applications of infrared thermography: a review. **Infrared Physics & Technology**, Elsevier, v. 55, n. 4, p. 221–235, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 15.
- MALDAGUE, X. **Theory and Practice of Infrared Tachnology for Nondestructive Testing**. Nova York: Wiley, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 18, 20 e 21.

MAROY, K. *et al.* Assessing the thermal performance of insulating glass units with infrared thermography: Potential and limitations. **Energy and Buildings**, v. 138, p. 175–192, 2017. ISSN 0378-7788. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816313767>>. Citado na página 21.

MENG, X. *et al.* Nondestructive inspection of curved clad composites with subsurface defects by combination active thermography and three-dimensional (3d) structural optical imaging. **Infrared Physics Technology**, v. 97, p. 424–431, 2019. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449518308764>>. Citado na página 23.

MEOLA, C. **Infrared thermography recent advances and future trends**. [S.l.]: Bentham Science Publishers, 2012. Citado na página 17.

OGAWA, F.; MASUDA, C. Fabrication and the mechanical and physical properties of nanocarbon-reinforced light metal matrix composites: A review and future directions. **Materials Science and Engineering: A**, Elsevier, p. 141542, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 24.

PANTOJA, P. A termografia infravermelha na salvaguarda de monumentos culturais como mé todo ão destrutivo de diagnóstico. **MSc diss., Universidade Federal do Pará**, 2016. Citado na página 17.

PEACOCK, T. M. *et al.* Infrared thermography: A new approach for the characterization and management of activated carbons applied in water treatment. **Chemical Engineering Science**, v. 246, p. 116881, 2021. ISSN 0009-2509. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250921004462>>. Citado na página 21.

POELMAN, G. *et al.* Multi-scale gapped smoothing algorithm for robust baseline-free damage detection in optical infrared thermography. **NDT E International**, v. 112, p. 102247, 2020. ISSN 0963-8695. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869519305481>>. Citado na página 21.

ROCHA, J. H. A.; PÓVOAS, Y. V. A termografia infravermelha como um ensaio ão destrutivo para a inspeção de pontes de concreto armado: Revisão do estado da arte. **Revista Alconpat**, Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación . . . , v. 7, n. 3, p. 200–214, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 15.

SELS, S. *et al.* A cad matching method for 3d thermography of complex objects. **Infrared Physics & Technology**, Elsevier, v. 99, p. 152–157, 2019. Citado na página 23.

SILVA, R. N. T. d. Influência dos erros da câmara de infravermelho na estimativa de parâmetros termofísicos. Universidade Federal de Pernambuco, 2012. Citado na página 19.

USAMENTIAGA, R. *et al.* Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 14, n. 7, p. 12305–12348, 2014. Citado na página 18.

WANG, Z. *et al.* Application of carbon dots and their composite materials for the detection and removal of radioactive ions: A review. **Chemosphere**, Elsevier, p. 132313, 2021. Citado na página 25.

WORKSHEEL Thermal Camera. <<https://workswell-thermal-camera.com/workswell-active-thermoinspector/>>. Acessado em 18/09/2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 20.

APÊNDICE A – Código MATLAB

```

% =====
% Universidade Federal de Uberlândia - UFU
% Código TCC - Fusão multimodal para visualização 3D de termografia infravermelha
% Autor: George Dechichi Barbar - 11721EMC020
% =====
% =====
% Variáveis
% - cameraCalibrationFileName: Arquivo .mat com dados da calibração da câmera
% - modelFileName: Arquivo .stl do modelo 3D da peça
% - thermographyFileName: Arquivo .mat com os dados da termografia infravermelha
% =====

% Limpar dados da memória e fechar janelas abertas
%% =====
clear; clc; close all;
% =====

% Nomes dos arquivos a serem importados
%% =====
cameraCalibrationFileName = 'calibrationSession.mat';
modelFileName = 'Peça.stl';
thermographyFileName = 'PVC SÄS.2\PRC3_TRA1550_MWIR.mat';

load(cameraCalibrationFileName);
load(thermographyFileName);
% =====

% Importação do modelo e geração da malha
%% =====
numberOfPDEs = 1;
pdem = createpde(numberOfPDEs);
gm = importGeometry(pdem,modelFileName);
msh = generateMesh(pdem,'Hmax',1,'Hmin',0.01,'Hgrad',1.2);
malha = msh.Nodes';
% =====

```

```

% Matrizes de rotação e translação
%% =====
frame = 150;
sizeRawImage = size(imgMWIR);
colormap jet;
imagesc(imgMWIR(1:sizeRawImage(1,1),1:sizeRawImage(1,2),frame));
axis image;
[xImage, yImage] = getpts;
imagePoints = [xImage, yImage];
worldPoints = [0 0 0;0 100 0;100 100 0;100 0 0;60 90 0];
focalLength = mean(calibrationSession.CameraParameters.FocalLength);
intrinsicMatrix = calibrationSession.CameraParameters.IntrinsicMatrix;
center = [intrinsicMatrix(3,1) intrinsicMatrix(3,2)];
[rot,trans] = modernPosit(imagePoints, worldPoints, focalLength,center);
% =====

% Pontos na referência da câmera
%% =====
meshPoints = msh.Nodes;
meshPoints(4,:) = 1;
world2CameraMatrix = [rot trans];
world2CameraMatrix(4,4) = 1;
world2Camera = world2CameraMatrix * meshPoints;
% =====

% Projeção na percepção da câmera
%% =====
cameraPerspectiveMatrix = intrinsicMatrix';
cameraPerspectiveMatrix(:,4) = 0;
worldProjection = cameraPerspectiveMatrix * world2Camera;
% =====

% Relação entre pixels e pontos
%% =====
x_linha = worldProjection(1,:);
y_linha = worldProjection(2,:);
z_linha = worldProjection(3,:);
numUVPixels = length(x_linha);
pixelsMatrix = zeros(numUVPixels,2);

```

```

for i = 1:1:numUVPixels
u = round(x_linha(i)/z_linha(i));
v = round(y_linha(i)/z_linha(i));
T_ref = imgMWIR(v, u, frame);
pixelsMatrix(i,:) = [u v];
temperatureMesh(i,:) = [malha(i,:) T_ref];
end
% =====

% Plot para conferir semelhança de pontos
%% =====
colormap jet;
imagesc(imgMWIR(1:sizeRawImage(1,1),1:sizeRawImage(1,2),frame));
hold on;
plot(pixelsMatrix(:,1),pixelsMatrix(:,2),'.k');
axis image;
% =====

% Reconstrução do modelo 3D em nova janela
%% =====
figure;
pdeplot3D(pdem,'ColorMapData',temperatureMesh(:,4));
% =====

```


APÊNDICE B – Projeto da Peça

