



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Rafaela Porto Lemos

**REPAROS COMPÓSITOS AUTOEXCITÁVEIS NA INSPEÇÃO COM
SHEAROGRAFIA**

Florianópolis

2021

Rafaela Porto Lemos

**REPAROS COMPÓSITOS AUTOEXCITÁVEIS NA INSPEÇÃO COM
SHEAROGRAFIA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr. Eng.

Coorientador: Daniel Pedro Willemann, Dr. Eng.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Lemos, Rafaela Porto

Reparos compósitos autoexcitáveis na inspeção com shearografia / Rafaela Porto Lemos ; orientador, Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, coorientador, Daniel Pedro Willemann, 2021.

83 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Shearografia. 3. Ensaio não destrutivo. 4. Materiais compósitos. 5. Reparo autoexcitável. I. Gonçalves Júnior, Armando Albertazzi. II. Willemann, Daniel Pedro. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Rafaela Porto Lemos

**REPAROS COMPÓSITOS AUTOEXCITÁVEIS NA INSPEÇÃO COM
SHEAROGRAFIA**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng. - Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Mauro Eduardo Benedet, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Sergio Damasceno Soares, Dr. Eng.
PETROBRAS – CENPES (Aposentado)

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Paulo de Tarso R. de Mendonça, Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
Orientador

Florianópolis, 2021.

RESUMO

Na indústria do petróleo e gás, é comum que estruturas metálicas sofram com processos de corrosão devido ao ambiente em que estão inseridas. Por esse motivo, procedimentos de manutenção que sejam realizados de forma ágil, eficaz e com o mínimo de interferência na produção são necessários para uma operação segura. Nos últimos anos, materiais compósitos reforçados por fibras vêm sendo muito utilizados no reparo dessas estruturas. Após a realização do reparo, é de extrema importância que inspeções sejam feitas para garantir que esteja de acordo com as normas exigidas. Uma das técnicas que podem ser aplicadas é a shearografia, que é um método de inspeção não destrutiva que utiliza luz laser e baseia-se em técnicas de interferometria. Para que seja possível identificar os defeitos no material durante a aplicação desse método, é necessário gerar um campo de deformações na superfície da estrutura analisada através de um carregamento (excitação). Nesse trabalho, a excitação será gerada por camadas do próprio revestimento, denominado de reparo autoexcitável. Para isso, um corpo de prova foi desenvolvido para a avaliação do comportamento do material através de análises com termopares, simulações térmicas e ensaios com shearografia. Ainda, dois métodos adicionais de excitação térmica com lâmpada halógena e infravermelha foram analisados para fins de comparação com o método desenvolvido neste trabalho. Verificou-se que, dentre as opções de carregamento, a lâmpada halógena apresenta melhores resultados do ponto de vista térmico para o aquecimento mais uniforme do revestimento. Notou-se, também, que o reparo autoexcitável conseguiu evidenciar os defeitos presentes no material o suficiente para gerar imagens razoáveis na inspeção com shearografia. Portanto, o método estudado neste trabalho satisfaz as necessidades de uma inspeção em campo. Para fins de comparação com os resultados obtidos neste trabalho e para o melhor desenvolvimento do método, novos corpos de prova podem ser construídos alterando-se a disposição das fibras, e testes podem ser refeitos com diferentes configurações no corpo de prova atual.

Palavras-chave: Petróleo e Gás, Materiais Compósitos, Ensaio Não-Destrutivo, Shearografia, Carregamento Térmico, Revestimento Autoexcitável.

ABSTRACT

In the Oil and Gas industry, it is common for metallic structures to suffer from corrosion processes due to the environment in which they are inserted. For this reason, maintenance procedures that are performed quickly, efficiently and with minimal interference in production are necessary for safe operation. In recent years, fiber-reinforced composite materials have been widely used to repair these structures. After the repair is done, it is extremely important to perform inspections to ensure that the repair is in accordance with the required standards. One of the techniques that can be applied is shearography, which is a non-destructive inspection method that uses laser light and is based on interferometry techniques. In order to identify defects in the material during the application of this method, it is necessary to generate a deformation field on the surface of the analyzed structure through loading (excitation). In this study, the excitation will be applied through layers of the coating itself, named self-excitable repair. In this regard, a specimen was developed to evaluate the material's behavior through thermocouple analysis, thermal simulations and shearography tests. Furthermore, two additional methods of thermal excitation with halogen and infrared lamp were analyzed for comparison purposes with the method developed in this study. It was found that, among the charging options, the halogen lamp presents better results from a thermal point of view for more uniform heating of the coating. It was also noted that the self-excitable repair was able to evidence the defects present in the material enough to generate reasonable images in the inspection with shearography. Therefore, the method studied in this work satisfies the needs of a field inspection. For purposes of comparison with the results obtained in this work and for the best development of the method, new specimens can be built by changing the fiber arrangement, and tests can be redone with different configurations on the current specimen.

Keywords: Oil and Gas, Composite Materials, Non-Destructive Tests, Shearography, Thermal Loading, Self-excitable Repair.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Defeitos encontrados em materiais compósitos laminados	21
Figura 2 - Exemplos de utilização de materiais compósitos: (a) reparos de tubulações, (b) revestimentos de tanques e (c) fabricação de tubulações.	23
Figura 3 - Aplicação de revestimento em material compósito realizado em campo.	24
Figura 4 - Processo de inspeção visual	25
Figura 5 - Aplicação da técnica ultrassom em uma tubulação	26
Figura 6 - Imagem capturada por uma câmera termográfica.....	27
Figura 7 - Técnica geral de ensaio radiográfico na indústria	28
Figura 8 - Resultado de tomografia computadorizada	29
Figura 9 - Componentes básicos de um sistema de tomografia computadorizada	29
Figura 10 - (a) Interferômetro de Michelson Modificado; (b) Imagem lateralmente deslocada na direção horizontal mostrando o quadrado “duplicado”.	30
Figura 11 - (a) Reflexão aleatória; (b) Padrão de <i>speckles</i>	31
Figura 12 - Exemplo de remoção do salto de fase.....	34
Figura 13 - Subtração dos mapas de fase e obtenção do Mapa das Diferenças de Fase.	34
Figura 14 - (a) Franjas de interferência em região sem defeitos; (b) Alterações no padrão de franjas na presença de defeitos.	35
Figura 15 - Funcionamento do carregamento mecânico por tração..	36
Figura 16 - Funcionamento do carregamento mecânico à vácuo..	37
Figura 17 - Câmara para aplicação de vácuo.....	37
Figura 18 - Atuador piezoelétrico: <i>shaker</i>	38
Figura 19 - Funcionamento do carregamento vibracional.....	39
Figura 20 - Lâmpada halógena para aplicação de carregamento térmico	40
Figura 21 - Funcionamento do carregamento térmico.....	41
Figura 22 - Excitação térmica externa com uso de lâmpada.	42
Figura 23 - Aquecimento por efeito Joule.	43
Figura 24 - Geração do efeito Joule.....	44
Figura 25 - Camada de excitação: fibra de carbono com ligações elétricas.....	45
Figura 26 - Disposição das camadas e termopares utilizados para montagem do CP. A linha preta representa a camada eletricamente conectada.	46

Figura 27 – Corpo de prova após montagem com fibras de vidro e de carbono, e ligações elétricas. A parte esquerda mostra uma vista frontal e a da direita o fundo da placa metálica onde são visíveis os defeitos artificiais.....	47
Figura 28 - Fonte inversora de bancada utilizada no experimento.....	48
Figura 29 – Esquemático da média da coluna de termopares (união das colunas A e B).	49
Figura 30 - Gráfico da variação de temperatura do experimento E1.....	51
Figura 31 - Gráfico da variação de temperatura do experimento E2.....	51
Figura 32 - Gráfico da variação de temperatura do experimento E3 com os valores máximos de variação de temperatura.....	52
Figura 33 - Gráfico da equação da reta para os termopares T2 (camada de aquecimento), T3 (camada intermediária) e T4 (camada de interesse).	52
Figura 34 - Camadas utilizadas na estimativa da quantidade máxima de camadas.	55
Figura 35 - Gráfico da variação de temperatura por camada.	56
Figura 36 - Quantidade final de camadas ao atingir a T_g	56
Figura 37 - Intervalos para o cálculo do IPA.....	59
Figura 38 - Corpo de prova e revestimento utilizado em teste anterior.	61
Figura 39 - Valores utilizados para o cálculo do IPA temporal no teste com autoexcitável....	62
Figura 40 - Valores utilizados para o cálculo do IPA temporal no teste com lâmpada halógena.	62
Figura 41 - Valores utilizados para o cálculo do IPA temporal no teste com lâmpada infravermelha.....	63
Figura 42 – Modelo 3D da chapa metálica criado no ANSYS AIM.....	65
Figura 43 - Modelagem da fibra de carbono bidirecional no CP.	66
Figura 44 - Modelagem da fibra de carbono unidirecional (em branco) no CP.....	67
Figura 45 - Vista lateral de parte do CP modelado para identificação das camadas.....	67
Figura 46 - Vista (a) frontal e (b) traseira do CP com trama bidirecional.....	68
Figura 47 - Vista (a) traseira e (b) frontal do CP com trama unidirecional.....	69
Figura 48 - Fluxo de calor no CP com trama unidirecional.	71
Figura 49 - Fluxo de calor no CP com trama bidirecional.	71
Figura 50 - Montagem da bancada de ensaios, sendo (1) o corpo de prova, (2) a câmera, (3) o interferômetro e (4) o laser.	72
Figura 51 - Indicação da corrente elétrica utilizada nos ensaios.	73

Figura 52 - Mapas de diferença de fase obtidos para o aquecimento de 3 segundos nas direções de sensibilidade Vertical (esquerda) e Horizontal (direita).	74
Figura 53 - Mapas de diferença de fase obtido para o aquecimento de 4 segundos nas direções de sensibilidade Vertical (esquerda) e Horizontal (direita).	74
Figura 54 - Mapa de diferença de fase obtido para o aquecimento de 5 segundos.	75
Figura 55 - Mapa de diferença de fase obtido para o aquecimento de 10 segundos.	76
Figura 56 - Imagem termográfica do CP durante o Experimento 3.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo de aquecimento do CP em cada teste.	48
Tabela 2 - Maiores variações de temperatura em [°C] no termopar T2 situado na camada de aquecimento.	50
Tabela 3 - Maiores variações de temperatura em [°C] no termopar T4 situado na camada de interesse.	50
Tabela 4 - Temperaturas máximas em [°C] atingidas em cada termopar.	50
Tabela 5 – Estimativas da variação de temperatura nas camadas em função do tempo considerando o modelo linear da Figura anterior.	53
Tabela 6 - Camadas e seus valores de variação de temperatura para estimar a quantidade máxima de camadas.	55
Tabela 7 - Características das fibras para o cálculo do fluxo térmico.	57
Tabela 8 - Fluxo térmico em cada experimento.	57
Tabela 9 - Resultados do cálculo do IPA.	59
Tabela 10 - Resultados do cálculo do IPA temporal.	60
Tabela 11 - Resultados apresentados para o cálculo do IPA nos três métodos de excitação térmica.	63
Tabela 12 - Resultado dos cálculos do IPA temporal.	63
Tabela 13 - Valores adotados para as propriedades dos materiais.	66
Tabela 14 - Resultados do IPA para cada tipo de malha utilizada.	69

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CP	Corpo de prova
END	Ensaio não-destrutivo
FC	Fibra de carbono
FPSO	<i>Floating, Production, Storage and Offloading</i>
FV	Fibra de vidro
IPA	Índice de profundidade de aquecimento
IPA_t	Índice de profundidade de aquecimento temporal
LabMetro	Laboratório de Metrologia e Automatização
P&G	Petróleo e Gás
PoD	Probabilidade de deteção
PRFC	Polímero reforçado por fibras de carbono
PRFV	Polímero reforçado por fibras de vidro
PZT	Piezoelétrico
T_g	Temperatura de transição vítrea

LISTA DE SÍMBOLOS

dx	Distância entre dois pontos lateralmente deslocados;
P1, P2	Pontos lateralmente deslocados;
λ	Comprimento de onda;
ξ	Rugosidade;
Ii	Intensidade de cada ponto da imagem;
I₀	Intensidade média;
I₀₀	Modulação do termo de interferência;
f	Diferença de fase causada pela rugosidade;
Δ	Diferença de fase em função do carregamento aplicado ao objeto;
R	Resistência elétrica;
i	Corrente elétrica;
V	Tensão;
ΔT	Variação de temperatura;
k_c	Condutividade térmica da fibra de carbono;
k_v	Condutividade térmica da fibra de vidro;
L_c	Espessura da fibra de carbono;
L_v	Espessura da fibra de vidro.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	COMPÓSITOS E A INDÚSTRIA PETROLÍFERA	18
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS	18
2.2	DEGRADAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS	20
2.3	MATERIAIS COMPÓSITOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO	22
3	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	25
3.1	INSPEÇÃO VISUAL	25
3.2	ULTRASSOM	26
3.3	TERMOGRAFIA	27
3.4	RADIOGRAFIA INDUSTRIAL	28
3.5	TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA INDUSTRIAL	29
4	SHEAROGRAFIA	30
4.1	PRINCÍPIOS DA SHEAROGRAFIA	30
4.1.1	Formação do <i>speckle</i>	31
4.1.2	Diferença de fase	32
4.1.3	Deslocamento de fase	33
4.2	TÉCNICAS DE CARREGAMENTO	35
4.2.1	Carregamento mecânico	35
4.2.2	Carregamento mecânico por vácuo	36
4.2.3	Carregamento vibracional	38
4.2.4	Carregamento térmico	39
5	REVESTIMENTO AUTOEXCITÁVEL	42
5.1	EFEITO JOULE	44
5.2	CORPO DE PROVA	45
6	ANÁLISE TÉRMICA	48
6.1	ESTIMATIVA DO TEMPO DE AQUECIMENTO	53
6.2	ESTIMATIVA DA ESPESSURA	54
6.3	FLUXO DE CALOR	56
6.4	AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DO AQUECIMENTO AO LONGO DA ESPESSURA	57
6.5	COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS DE EXCITAÇÃO TÉRMICA	60
7	MODELAGEM NUMÉRICA DO CORPO DE PROVA	65
8	ANÁLISE EXPERIMENTAL COM SHEAROGRAFIA	72
9	CONCLUSÕES	78
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Na indústria de petróleo e gás, os sistemas de tubulações são fundamentais para todos os processos produtivos, sendo eles os responsáveis por distribuir o óleo e o gás produzidos até seu local de armazenamento. Diversos investimentos foram realizados a fim de desenvolver novas ligas e revestimentos para diminuir os problemas causados por efeitos inerentes à natureza do aço. Devido a esforços mecânicos cíclicos, como a ação de ondas, e contato com água salina, as estruturas e tubulações da indústria do petróleo estão constantemente expostas a agentes corrosivos, processos de degradação e fadiga (CARVALHO, 2009).

O processo de corrosão é o principal responsável pelos acidentes com tubulações na indústria. A maioria das soluções encontradas para esse problema, como o uso de recobrimentos ou de aço inoxidável, são caras e, portanto, inviáveis para a aplicação em larga escala (NOGUEIRA, 2015; THOMAS, 2004).

Com o desenvolvimento dos materiais compósitos, surgiram diversas vantagens, como a possibilidade de recobrimento do aço com reparos compósitos, ou mesmo a produção de dutos feitos inteiramente em materiais compósitos, e a eliminação do problema de corrosão. Por isso, esses materiais vêm sendo amplamente aplicados em diversos setores, como a indústria aeronáutica, aeroespacial e marítima, com o intuito de aumentar a confiabilidade das estruturas e a sua vida útil.

Na indústria de Petróleo e Gás (P&G), os materiais compósitos são atualmente aplicados como reparos e revestimentos em tubulações, tanques de armazenamento e cascos de plataformas FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*). Muitas vezes, quando realizada em campo, a aplicação desse material pode ocorrer em condições adversas. Essa situação facilita o aparecimento de defeitos internos ao material, como bolhas, delaminações entre camadas e descolamentos entre o material compósito e o substrato metálico. Por isso, inspeções devem ser realizadas periodicamente para que os riscos potenciais de falhas sejam identificados.

Devido ao tamanho e à complexidade das estruturas envolvidas em ambientes marinhos, a melhor solução é o uso de avançadas técnicas de ensaios não destrutivos (END). As técnicas END são capazes de detectar defeitos, avaliar características do material e monitorar a degradação de componentes, equipamentos e estruturas sem provocar a destruição da peça analisada. Podem ser amplamente empregadas nos setores petrolíferos, pois contribuem

para a qualidade dos serviços, redução de custos e preservação do meio ambiente (NOGUEIRA, 2015; RIZZO, 2010). Uma técnica atualmente aplicada com sucesso para identificar defeitos em materiais compósitos é a shearografia.

A shearografia é um método óptico baseado em interferometria. Essa técnica utiliza um padrão aleatório gerado pelas interferências da luz coerente de um laser para medir o campo de deformações na superfície inspecionada. As informações sobre as deformações apresentadas na estrutura inspecionada são obtidas através da aplicação de um carregamento, cujo objetivo é causar os efeitos capazes de serem avaliados e que serão transformados em imagens (ALBERTAZZI *et al.*, 2006; HECHT, 2008). Carregamentos dos tipos mecânico (variação de pressão, flexão, vibracional etc.) e térmico (lâmpada halógena, soprador térmico, manta térmica etc.) são exemplos de excitações que podem ser aplicadas na inspeção por shearografia.

Na maioria dos casos, principalmente no tipo térmico com sopradores e lâmpadas, o carregamento é aplicado externamente ao material, ou seja, a excitação é gerada partindo da camada mais externa em direção à camada mais interna do revestimento. Essa situação, muitas vezes, dificulta a detecção de defeitos em camadas mais internas devido às perturbações geradas nas imagens causadas pelas deformações mais intensas das camadas externas. Desta forma, a aplicação de um carregamento a partir de uma camada interna do revestimento pode resultar em uma imagem com melhor qualidade e, conseqüentemente, em uma maior probabilidade de detecção de defeitos internos (ASNT, 2012). Nesse trabalho, a excitação será gerada através do aquecimento por efeito Joule, causado pela passagem de corrente elétrica por uma fibra de carbono do próprio revestimento, e será chamado de reparo autoexcitável.

Devido à importância da aplicação de um carregamento eficiente durante a inspeção por shearografia, o principal objetivo desse trabalho é avaliar a possibilidade e os ganhos da utilização de reparos autoexcitáveis na detecção de defeitos em materiais compósitos utilizados na indústria de Petróleo e Gás. Portanto, a eficiência desse método será estudada e comparada a outras técnicas de excitação a fim de se obter imagens com melhor qualidade para a detecção de defeitos. Os objetivos específicos deste trabalho consistem em otimizar a configuração do reparo autoexcitável, variar o tempo de aplicação de corrente elétrica a fim de se determinar o melhor procedimento a ser utilizado em ensaios não destrutivos (END), além de realizar a comparação com outros métodos de carregamento. Para isso, serão realizados estudos, testes e simulações sobre a geração e a propagação de calor ao longo da espessura do reparo.

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma: no capítulo 2 serão definidos os conceitos acerca dos materiais compósitos, como suas características e aplicações na indústria de P&G. No capítulo 3 serão abordadas diferentes metodologias para aplicação de inspeção não-destrutiva. No capítulo 4 são apresentados os princípios de funcionamento da técnica shearografia, bem como suas vantagens e os possíveis tipos de carregamento aplicados nesse método. No capítulo 5 será apresentada a ideia acerca do revestimento autoexcitável, seu funcionamento e suas aplicações. No capítulo 6 será explicada a metodologia dos testes realizados com termopares aplicados ao corpo de prova. No capítulo 7 será apresentada a modelagem do corpo de prova e a comparação entre duas possíveis construções do revestimento autoexcitável. No capítulo 8 serão apresentados os resultados da inspeção por shearografia com aplicação de carregamento térmico por autoexcitação. Por fim, no capítulo 9, as conclusões obtidas nesse estudo serão dispostas, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2 COMPÓSITOS E A INDÚSTRIA PETROLÍFERA

A utilização dos materiais compósitos na indústria está em constante expansão. Por apresentarem diversas possibilidades de aplicação, podem ser encontrados na indústria aeronáutica, aeroespacial, automotiva, e energética e petrolífera. Este capítulo contém uma apresentação sobre os materiais compósitos, destacando sua aplicação na indústria de P&G.

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos consistem na combinação de dois ou mais materiais distintos, em escala macroscópica, para funcionar como um novo material. Esse novo material apresenta um conjunto de propriedades que não seriam possíveis de se obter com nenhum dos componentes utilizados individualmente. Os compósitos são formados pelo reforço e pela matriz. A interface entre esses dois componentes é primordial para garantir as características do material.

As propriedades do composto decorrem de fatores como a geometria das fibras ou partículas, distribuição, orientação e compatibilidade interfacial entre os constituintes da mistura. É imprescindível que haja uma afinidade entre os materiais unidos para que trabalhem em conjunto respondendo aos esforços do meio. Os compósitos são heterogêneos e, em sua maioria, apresentam comportamento mecânico anisotrópico (MALLICK, 2007; MARINUCCI, 2011).

Dentre as características que podem ser aprimoradas, pode-se citar: resistência mecânica, resistência à corrosão, ao desgaste e à fadiga, isolamento térmico e acústico, condutividade térmica e densidade. Essas características garantem a melhoria da integridade das estruturas, aumentando sua vida útil e promovendo maior segurança operacional (GAY, 2003; PAES, 2013). Dessa forma, é possível alcançar novos campos de aplicação a partir de combinações que não são encontradas nos materiais convencionais (JONES, 1999).

O reforço, que é a fase dispersa do material, representa a parte mais importante em termos de propriedades mecânicas, uma vez que é o responsável por proporcionar as propriedades adicionais ao composto. Essa fase pode se apresentar na forma de fibras ou particulados. Em compósitos estruturais, é comum o uso de fibras de vidro e de carbono. As fibras podem ser contínuas (longas) ou descontínuas (curtas). Essas últimas são processadas mais facilmente, apesar de apresentarem menor eficiência de reforço. Dependendo da

orientação das camadas de fibras, podem ainda se apresentar de forma unidirecional ou bidirecional.

A matriz tem a função de unir e manter a fase dispersa no lugar, transmitir cargas e protegê-la contra as reações químicas com o ambiente e danos mecânicos causados pelo manuseio. Essa componente pode ser polimérica, metálica ou cerâmica, e sua escolha depende da aplicação final do material. Ainda, a composição da matriz é responsável por determinar a temperatura de serviço, o processamento e a durabilidade do compósito (CALLISTER, 2002; MALLICK, 2007; REDDY, 1997). Para a fabricação de reforços estruturais, as matrizes poliméricas são as mais empregadas. Já as matrizes metálicas e cerâmicas são utilizadas em aplicações que estão sujeitas a altas temperaturas (a partir de 200°C).

O material mais utilizado nas matrizes de compósitos com fibras é o polímero. Embora sejam mais baratos, fáceis de processar e mais resistentes a produtos químicos do que os metais, seu uso é limitado devido à sua menor temperatura de operação e resistência mecânica (AGARWAL, 2006). A exposição prolongada à luz ultravioleta e a alguns solventes, por exemplo, podem causar a degradação das propriedades desse material (CHAWLA, 2013). Com base no seu comportamento, existem duas classes principais de polímeros: os termoplásticos e os termorrígidos.

Os polímeros termoplásticos possuem propriedades físicas reversíveis, ou seja, podem ser reprocessados ao reaplicar certas condições de temperatura e pressão. Os termorrígidos, por sua vez, são compostos por uma rede de ligações cruzadas e irreversíveis entre as cadeias macromoleculares. Ao contrário dos termoplásticos, esse material se decompõe ao ser exposto por determinado período de tempo em elevadas temperaturas. Por serem líquidos à temperatura abaixo de 50°C, podem ser processados na temperatura ambiente e o seu endurecimento acontece pela adição de agentes químicos apropriados ou pela aplicação controlada de calor e pressão. Uma vez que esse material se solidifica pelo processo de cura, não pode ser remodelado (CHAWLA, 2013). Os polímeros termorrígidos, como a resina epóxi, são mais empregados em reparos estruturais devido a algumas vantagens em relação aos termoplásticos, como alta rigidez, estabilidade térmica e dimensional, e boas propriedades de isolamento térmico e elétrico.

Os laminados compostos que utilizam mais de um tipo de fibra em uma única matriz são chamados de compósitos híbridos. Seu comportamento é influenciado por variáveis como: fração de volume e peso das fibras constituintes em relação a todo o laminado híbrido,

sequência e orientação das fibras, e propriedades relevantes da matriz e das fibras utilizadas (AGARWAL, 2006). É possível realizar diversas combinações entre as fibras para chegar a um determinado conjunto de propriedades. Podem ser fabricados/laminados de forma em que cada camada superposta é constituída por um tipo de fibra, ou podem ser construídos compostos onde as fibras estão todas misturadas umas com as outras.

As fibras de vidro possuem menor custo e boas propriedades mecânicas, como alta resistência à tração. Quando usadas em conjunto com a resina epóxi, possuem a vantagem de apresentarem maior resistência a falhas estáticas e por fadiga. Por outro lado, tornam-se materiais não condutores (GAY, 2003). Esse material tem a melhor relação custo/benefício, sendo utilizado em grande parte dos reparos estruturais com materiais compósitos.

As fibras de carbono possuem as melhores propriedades mecânicas, pois possuem maior resistência à umidade e a muitos ácidos e solventes. Além disso, esse material tem baixa massa específica e alto módulo de elasticidade. No entanto, as fibras de carbono possuem um custo elevado e a necessidade de importação, o que faz com que sua aplicação seja mais restrita a estruturas que justifiquem o investimento (MALLICK, 2007). Uma característica importante das fibras de carbono é o fato de serem extremamente anisotrópicas, uma vez que a organização do carbono em sua microestrutura assume a configuração do grafite, ou seja, com ligações químicas mais fortes dentro de um mesmo plano e mais fracas entre planos diferentes.

Em compósitos estruturais, é comum a combinação entre fibras de vidro e fibras de carbono. As fibras de carbono, apesar de terem um custo elevado, proporcionam um reforço de baixa densidade e compensam a falta de rigidez das fibras de vidro, que são mais baratas. Portanto, torna-se mais vantajosa a fabricação de um material a partir da combinação desses dois componentes, tanto do ponto de vista estrutural, quanto do econômico (CALLISTER, 2002).

2.2 DEGRADAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

Com o crescente uso dos materiais compósitos na indústria de P&G, estes são expostos a ambientes extremamente agressivos e carregamentos que podem comprometer a sua resistência estrutural. Ainda que aditivos possam ser usados na fabricação de materiais compósitos para aumentar sua vida útil, os revestimentos de compósitos são suscetíveis à degradação assim como os materiais convencionais. Os danos podem surgir durante todo o processo de aplicação e uso desse revestimento, e ainda nas fases de processamento da matéria-

prima, armazenamento, transporte e manuseio da peça fabricada ou como consequência da ocorrência de eventos extraordinários como impactos ou abrasão (MALLICK, 2007).

Os fatores ambientais e a ação da temperatura influenciam o material desde seus constituintes separados, como as fibras e o material da matriz, até a interface entre eles. É de extrema importância o conhecimento sobre o ambiente em que serão instalados, bem como o comportamento dos materiais e os efeitos que podem ser causados nestes em diferentes situações (REZENDE, COSTA e BOTELHO, 2011). A degradação dos materiais compósitos pode resultar da perda de resistência das fibras de reforço, da perda de adesão e resistência da ligação interfacial devido à degradação da interface fibra-matriz, e da degradação química do material da matriz (AGARWAL, 2006).

Os fatores citados anteriormente podem resultar em defeitos como delaminação (falta de adesão entre as camadas de fibras), descolamento entre o substrato metálico e o compósito, inclusões e porosidades (REZENDE, COSTA e BOTELHO, 2011). A concentração de tensões na extremidade de um defeito pode gerar uma trinca, a qual pode se propagar e resultar em uma falha total da estrutura. No caso da matriz, um dos fatores resultantes da sua decomposição é a perda de rigidez do material. Quando a rigidez é reduzida o suficiente ao ponto de causar a instabilidade estrutural ou a indução de falhas/rupturas no material, seu uso deve ser interrompido (AGARWAL, 2006).

A Figura 1 apresenta desenhos esquemáticos dos principais defeitos encontrados em reparos compósitos laminados.

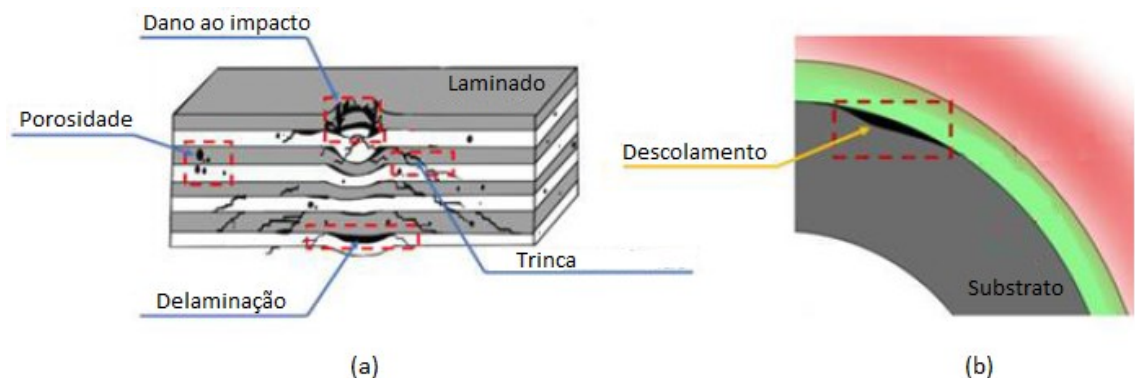


Figura 1 - Defeitos encontrados em materiais compósitos laminados (Adaptado de VIEIRA, 2019).

- **Delaminação:** Falta de aderência entre camadas de compósitos laminados;
- **Descolamento:** Separação da interface fibra-matriz;
- **Inclusões:** Introdução de partículas estranhas entre os laminados;

- **Dano ao impacto:** Pequenos pedaços quebrados na superfície ou nas bordas do material;
- **Porosidade:** Bolsões de ar no interior do material;
- **Trinca:** Ruptura do laminado.

2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO

A indústria do P&G enfrenta ambientes extremamente agressivos, o que exige a utilização de materiais com elevada resistência à corrosão e tenacidade. Com o desenvolvimento dos materiais compósitos, plásticos reforçados com fibras vêm sendo cada vez mais usados na indústria de petróleo devido às suas melhores propriedades. Diferentemente dos materiais convencionais, os compósitos podem operar em ambientes hostis por longos períodos por serem mais resistentes à corrosão, sendo essa a principal motivação do seu crescente uso na indústria petrolífera (DANIEL e ISHAI, 2006).

Perdas de espessura da parede em tubulações metálicas acontecem no decorrer da vida útil dessas estruturas. Quando a espessura é reduzida significativamente gerando defeitos indesejáveis a ponto de se tornar um risco para a produção, é necessário que essa tubulação seja reparada. A escolha do método de correção depende do grau de risco que o defeito apresenta ao duto. Em muitos casos, a correção dos defeitos pode ser feita a partir da aplicação de um revestimento de material compósito na tubulação. Esse revestimento tem a função de retardar a ação da corrosão e de reforço estrutural e que conseqüentemente aumenta a vida útil da tubulação, sem que seja necessário interromper a produção para realizar de imediato a troca de toda ou parte da estrutura. Dessa forma, o reparo pode ser feito em um menor espaço de tempo e menor custo de operação. Dentre as opções para essa aplicação, existem o Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) e Plástico Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC). Por razões econômicas, é mais comum encontrar revestimentos feitos a partir da fibra de vidro. Conforme mostra a Figura 2, os compósitos podem ser aplicados nos reparos de tubulações *onshore* e *offshore* (Figura 2(a)), revestimentos de tanques de armazenamento (Figura 2(b)), e na fabricação de tubulações (Figura 2(c)).



(a)



(b)



(c)

Figura 2 - Exemplos de utilização de materiais compósitos: (a) reparos de tubulações, (b) revestimentos de tanques e (c) fabricação de tubulações.

Além das vantagens já apresentadas anteriormente, as estruturas em material compósito possuem fácil manutenção e melhor relação resistência-peso quando comparadas ao aço, por exemplo. Essa última vantagem, juntamente à alta rigidez específica, são a base para a superioridade do desempenho estrutural dos materiais compósitos. O grande benefício da aplicação dos compósitos na indústria petrolífera é que não há a necessidade de parar a produção para realizar a manutenção, já que não se faz necessário o uso de chama ou arco de solda nas operações de manutenção com compósitos (Figura 3) (ALBERTAZZI *et al.*, 2006). No entanto, sua propriedade anisotrópica pode ser considerada uma desvantagem. Apesar de o reforço apresentar elevada resistência quando solicitado na direção longitudinal de suas fibras, possui piores propriedades mecânicas nas outras direções, especialmente em solicitações perpendiculares à direção das fibras.



Figura 3 - Aplicação de revestimento em material compósito realizado em campo (Rust Engenharia, 2020).

A fim de garantir a segurança no trabalho, a aplicação de materiais compósitos em estruturas no setor petrolífero é regida por normas técnicas como as normas N-2727 (Manutenção de Dutos Rígidos Submarinos) da Petrobrás, ISO/TS 24817 (*Composite repairs for pipework*) ou ASME PCC-2 (*Repair of Pressure Equipment*). Essas normas definem, por exemplo, os procedimentos a serem adotados para a realização do reparo, a temperatura máxima de operação e os requisitos para sua manutenção. Cada reparo deve apresentar um projeto específico contendo certificado de matéria-prima, termo de garantia e detalhes do projeto (COSTA, 2012).

3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Ensaaios não destrutivos são técnicas utilizadas para inspecionar materiais e componentes onde a sua execução não provoca a destruição da peça ensaiada. É o contrário do que ocorre com os ensaios destrutivos, que geralmente levam o objeto ensaiado à ruptura ou a uma deformação permanente. As técnicas END são amplamente empregadas nos setores petrolíferos, contribuindo para a qualidade dos serviços, redução de custos e preservação e segurança do meio ambiente e dos trabalhadores. Esses ensaios incluem métodos que são capazes de detectar defeitos, características do material, além de monitorar a degradação de componentes, equipamentos e estruturas (WORKMAN e MOORE, 2012).

As principais técnicas de END para análise de materiais compósitos são a inspeção visual, *tap test* (“barulho de oco”), radiografia industrial, ultrassom, termografia, emissão acústica, tomografia computadorizada e shearografia.

3.1 INSPEÇÃO VISUAL

A inspeção visual, ilustrada na Figura 4, é um dos métodos de inspeção mais antigos utilizados nos setores industriais, principalmente devido à sua simplicidade e baixo custo. Pode ser aplicada a qualquer tipo de peça ou componente, e está presente em todo o processo de fabricação, monitoramento e manutenção. Essa técnica serve como uma primeira etapa no processo de controle de qualidade (ABENDI, 2019).



Figura 4 - Processo de inspeção visual (SPEM, 2021).

Normalmente, a inspeção visual permite a rápida verificação a olho nu de alterações dimensionais, padrão de acabamento superficial e descontinuidades superficiais. Nos casos em que o acesso a essas superfícies é complexo, como em regiões internas, distantes ou muito

pequenas, podem ser utilizados equipamentos auxiliares, como microscópios, lupas ou boroscópios. A aplicação dessa técnica exige operadores treinados e especializados para cada tipo de produto.

3.2 ULTRASSOM

O ensaio por ultrassom, mostrado na Figura 5, caracteriza-se por um método não destrutivo muito utilizado pela indústria para o controle de qualidade e integridade de materiais, tanto em inspeções internas ou mesmo na superfície (ABENDI, 2019). É especialmente importante no estudo de degradação porque permite avaliar a evolução de processos de corrosão ou desgaste. É mais usado em materiais homogêneos.



Figura 5 - Aplicação da técnica ultrassom em uma tubulação (SPEM, 2021).

O método consiste na introdução de um feixe sonoro de alta frequência (acima de 20 kHz) na peça estudada, originada por um aparelho eletrônico. O objetivo é encontrar discontinuidades e, ao mesmo tempo, determinar seu tamanho, forma e localização.

Podem ser detectadas reflexões provenientes do interior da peça através de aparelhos especiais, podendo-se então localizar e interpretar as discontinuidades. Quanto maior a frequência de vibração, menor é o tamanho do defeito possível de ser detectado e maior é a absorção do sinal. Além disso, o menor tamanho detectável é aproximadamente um terço do comprimento de onda do ultrassom, cujo valor típico corresponde a 10mm.

As vantagens desse ensaio são: alta sensibilidade na detecção de pequenas discontinuidades internas e não requer planos especiais de segurança para a sua aplicação. Por outro lado, requer treinamento especializado do operador para interpretar os sinais obtidos e

apresenta desempenho limitado em materiais reforçados por fibras em função da contaminação do sinal refletido nas fibras.

3.3 TERMOGRAFIA

A termografia é uma técnica capaz de relacionar a temperatura de um objeto às radiações infravermelhas emitidas e refletidas por este. Essas informações são obtidas através de imagens que mostram a distribuição de temperatura na superfície do objeto analisado, que pode ser de forma monocromática ou em escala de cores (Figura 6). A radiação infravermelha emitida pela superfície de um objeto depende da sua temperatura, configuração geométrica e emissividade (capacidade de emitir calor).



Figura 6 - Imagem capturada por uma câmera termográfica.

Existem dois tipos de técnica termográfica para a identificação de defeitos: a ativa e a passiva. Na técnica passiva, o objeto apresenta temperatura diferente da temperatura ambiente, e a radiação infravermelha emitida naturalmente pelo objeto é captada. Já na termografia ativa, são aplicadas cargas térmicas no objeto para, em seguida, obter-se a imagem termográfica. Em ambos os casos, na presença de defeitos internos ao objeto, a distribuição de temperatura da sua superfície sofre perturbações. Logo, é possível de forma indireta identificar defeitos e falhas internas em materiais compósitos, como redução de espessura, poros, inclusões, entre outros (AHMED, 2008; MALDAGUE, 2002; STAUB, 2018).

3.4 RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

A radiografia é um método que se baseia na diferença de absorção da radiação penetrante em diferentes materiais e indica a existência de uma falha interna ou defeito no material. Pode ser detectada através de um filme, tubo de imagem ou medida por detectores eletrônicos de radiação (Figura 7).

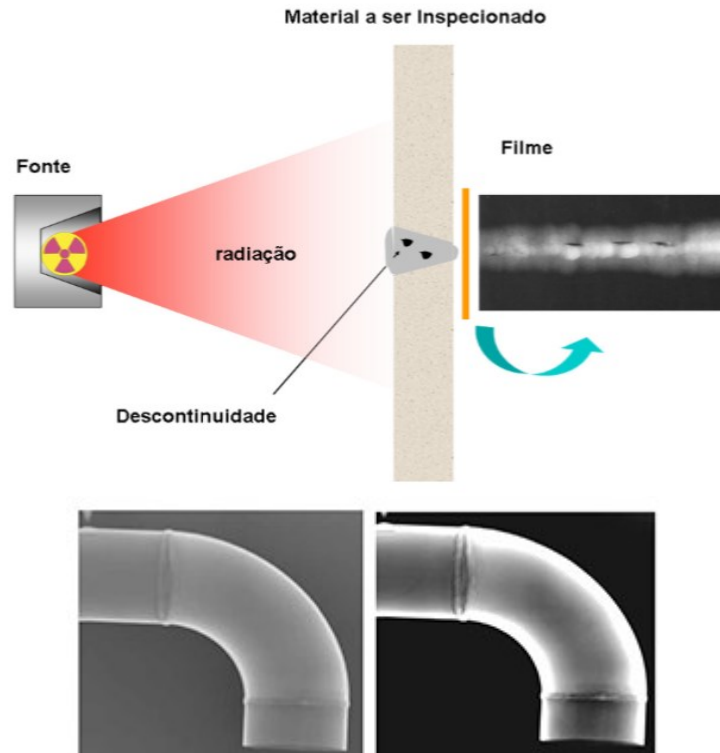


Figura 7 - Técnica geral de ensaio radiográfico na indústria (AMARAL, 2010; STARTEC, 2021).

Esse método é capaz de detectar com boa sensibilidade defeitos volumétricos, pois identifica com precisão a variação de espessuras ou densidades de uma região em relação à região vizinha. Defeitos como descontinuidades de vazios e inclusões em materiais compósitos também são facilmente detectados (STAUB, 2018). A radiografia desempenha um papel importante na indústria quanto à documentação da qualidade do produto examinado. No entanto, se a intensidade dos raios-X for regulada para revelar defeitos no compósito, não atravessará o metal. Caso seja regulada para o metal, não detectará o material compósito. Portanto, a radiografia industrial precisa ser regulada para o tipo de material que se deseja investigar.

3.5 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA INDUSTRIAL

A tomografia computadorizada industrial baseia-se nos mesmos princípios que a radiografia. Durante a análise, a estrutura analisada é atravessada pelos raios-X e, dependendo da sua composição, pode absorver mais ou menos radiação (Figura 8). A variação de absorção é indicada por uma imagem em escala de cinza (CERTI, 2021; SOUZA, 2012).

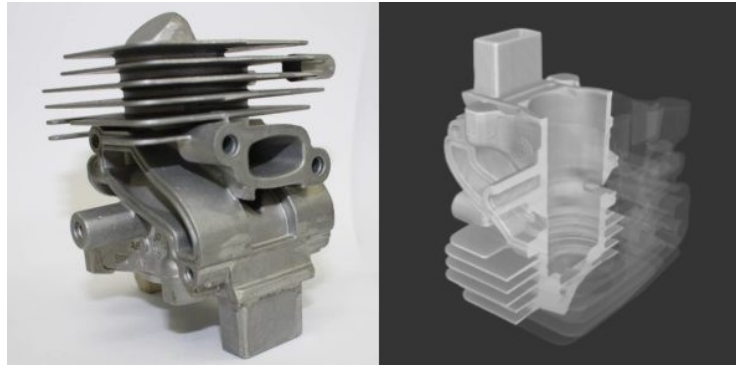


Figura 8 - Resultado de tomografia computadorizada (CERTI, 2021).

A diferença entre a tomografia computadorizada e a radiografia convencional é a geração de uma imagem 3D da estrutura. Essa técnica possui grande versatilidade na detecção de diferentes tipos de defeitos em diversos materiais. Em materiais compósitos, a tomografia computadorizada apresenta poucas restrições para a detecção de defeitos. Podem ser identificados diferentes densidades de poros, bolhas de ar, delaminações, inclusões, rachaduras, entre outros (NARDELLI, 2012; SOUZA, 2012; STAUB, 2018).

A Figura 9 apresenta os componentes básicos necessários para a aplicação da técnica.

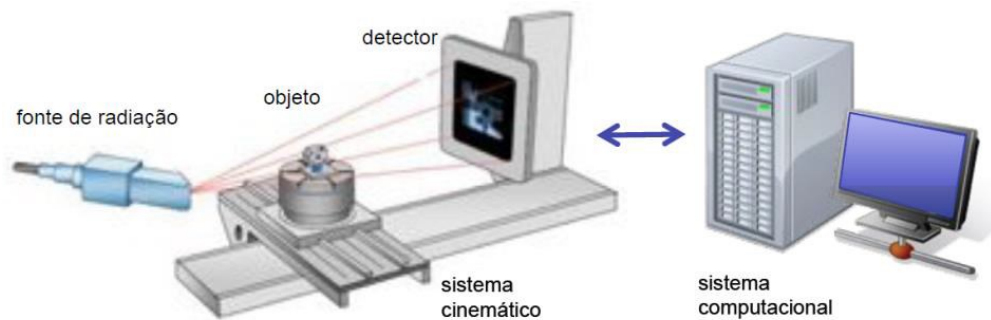


Figura 9 - Componentes básicos de um sistema de tomografia computadorizada (NARDELLI, 2012).

4 SHEAROGRAFIA

A shearografia consiste em uma técnica de inspeção não destrutiva baseada na interferência óptica da luz. A técnica detecta defeitos na estrutura analisada a partir de procedimentos de deslocamento de fase e interferometria. Para isso, uma deformação é induzida no material por um carregamento controlado, gerando um campo de deslocamentos na superfície. Neste capítulo, essa técnica será abordada de forma detalhada.

4.1 PRINCÍPIOS DA SHEAROGRAFIA

O sistema óptico mais comumente utilizado pela shearografia é baseado em um interferômetro de Michelson Modificado capaz de formar imagens duplas, lateralmente deslocadas entre si (Figura 10). O interferômetro consiste em um espelho móvel com um elemento piezoelétrico responsável por variar a sua posição no eixo “x” e um espelho inclinável que sofre uma pequena rotação $\delta\theta$. A rotação pode ser aplicada apenas no eixo “x”, apenas no eixo “y”, ou em ambos os eixos simultaneamente. No plano de formação da imagem, é posicionado um sensor de imagem de uma câmera que está conectada a um computador (ALBERTAZZI *et al.*, 2006; MALACARA, 2007).

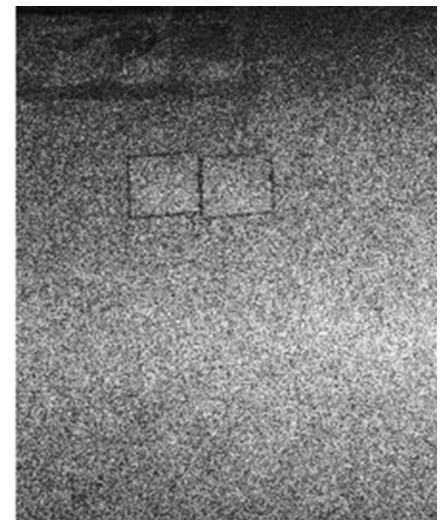
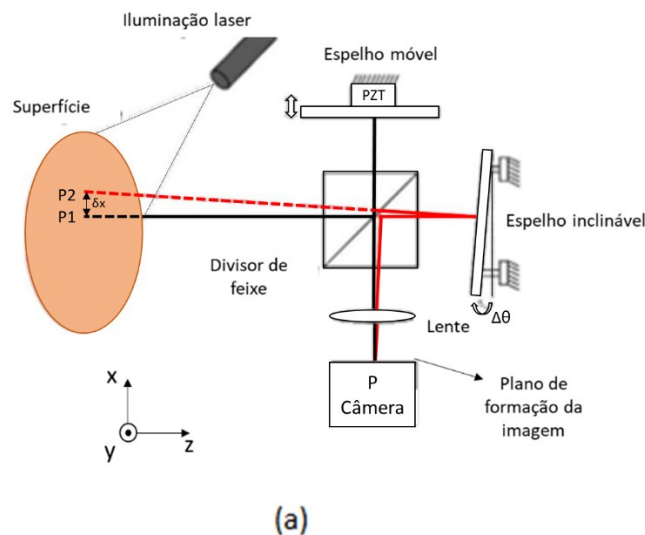


Figura 10 - (a) Interferômetro de Michelson Modificado; (b) Imagem lateralmente deslocada na direção horizontal mostrando o quadrado “duplicado”. Adaptado de (PAES, 2013).

No procedimento de inspeção por shearografia, a luz laser é expandida sobre o objeto analisado e tem seus feixes refletidos de forma difusa pela superfície. O sensor de imagem da câmera recebe as informações de conjuntos de pares de pontos vizinhos da superfície, por

exemplo P1 e P2 (Figura 10), que estão a uma distância δx entre si. No sensor da câmera, os dois pontos se combinam em um só e interferem entre si. A intensidade de interferência entre os dois pontos é influenciada pela diferença de fase provocada pela desigualdade entre os caminhos ópticos percorridos partindo do laser até o sensor de imagem passando por cada ponto (ASNT, 2012; STAUB, 2018).

4.1.1 Formação do *speckle*

Ao incidir a luz de um laser sobre um objeto, cada ponto em sua superfície se comporta como uma pequena fonte de ondas secundárias, caracterizando o princípio de Huygens. Uma superfície com rugosidade ξ maior que o comprimento de onda λ do laser incidido refletirá sua luz de forma aleatória em todas as direções, como visto na Figura 11(a) (GOODMAN, 1976; VAUGHAN, 2014).

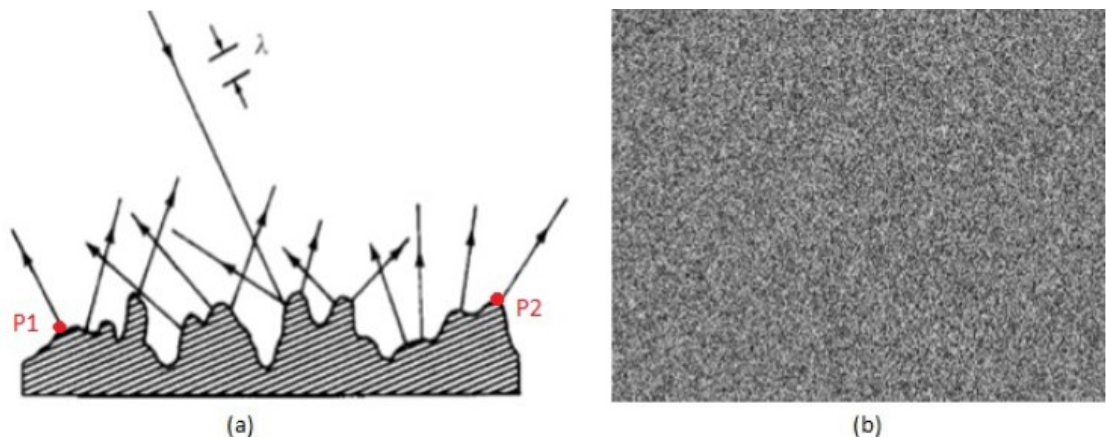


Figura 11 - (a) Reflexão aleatória; (b) Padrão de *speckles*. Adaptado de (SOUZA, 2015).

Visualmente, esse fenômeno resulta em um efeito granulado com pontos claros e escuros que caracterizam, respectivamente, as interferências construtivas e destrutivas da luz. A imagem gerada por essa interferência é chamada padrão de *speckles*, mostrada na Figura 11(b). Se o objeto se move ou se deforma, o padrão *speckle* se modifica de acordo com o movimento ou deformação ocorrida. Esse fenômeno acontece quando se usa uma fonte de luz coerente, como é o caso do laser.

Na shearografia, a superposição de duas imagens deslocadas lateralmente no sensor da câmera resulta em uma interferência entre dois padrões de *speckles* (HECHT, 2008; HUNG, 2005). A detecção dos defeitos acontece a partir da variação de fase dos pontos de interferência do padrão de *speckles*. Em outras palavras, a identificação dos defeitos é feita indiretamente

por meio da medição das mudanças ocorridas na intensidade luminosa do laser captada por cada pixel no sensor da câmera (SOUZA, 2015).

4.1.2 Diferença de fase

A fase da onda resultante proveniente da interferência entre P1 e P2 separados pela distância “ δx ” entre si é dada pela equação 4.1.

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \phi(x + \delta x, y) - \phi(x, y) \quad (4.1)$$

Caso os pontos sofram um mesmo deslocamento, a diferença de fase resultante da interferência será a mesma e não haverá modificação do padrão de interferência da imagem. Essa característica é responsável pela robustez da técnica, tornando a shearografia insensível a pequenos movimentos de corpo rígido sofridos pela estrutura e permitindo sua aplicação em campo, sendo essa a sua principal vantagem (PAES, 2013).

Na análise com shearografia é feita a comparação entre dois estados da superfície: o estado de referência e o estado deformado. A equação 4.2 revela a relação entre a intensidade e a diferença de fase de cada pixel da imagem de superposição dos pontos P1 e P2 no estado de referência, ou seja, antes da aplicação de um carregamento.

$$I_a = 2I_0^2[1 + \gamma \cos(\phi_o)] \quad (4.2)$$

onde I_0 é a amplitude luminosa aqui assumida como igual para os dois pontos, ϕ_o é a diferença de fase natural do *speckle* resultante da interferência entre os pares de pontos separados por uma distância igual ao deslocamento lateral, e γ é a modulação para o termo de interferência (STEINCHEN, 2003).

Ao aplicar um carregamento no objeto inspecionado, será obtido o estado deformado da superfície, que resultará na alteração do caminho óptico percorrido pela luz refletida. Neste caso, pode haver alteração da diferença de fase entre dois pontos vizinhos que interferem e a intensidade resultante é dada pela equação 4.3.

$$I_d = 2I_0^2[1 + \gamma \cos(\phi_o + \Delta\phi_o)] \quad (4.3)$$

onde I_d representa a intensidade depois da aplicação do carregamento e $\Delta\phi_o$ é a variação de fase decorrente da deformação nos pares de pontos vizinhos da superfície do objeto.

A partir do módulo da diferença (I_s) entre as intensidades das imagens de ambos os estados analisados, surgem padrões de franjas resultantes da deformação do objeto. A intensidade absoluta em cada ponto é obtida por:

$$|I_s| = |I_a - I_d| = \left| 4I_0^2 \left[\text{sen} \left(\phi_o + \frac{\Delta\phi_o}{2} \right) \text{sen} \left(\frac{\Delta\phi_o}{2} \right) \right] \right| \quad (4.4)$$

onde I_0^2 é a intensidade média ou de fundo (SOUZA, 2015; STAUB, 2018; STEINCHEN, 2003).

As variações de fase alteram a intensidade de cada pixel no sensor da câmera, e o valor da intensidade depende de parâmetros desconhecidos como I_0 , γ e ϕ_0 . Portanto, para se obter os valores relativos apenas à variação de fase ($\Delta\phi$), é necessária a aplicação da técnica de deslocamento de fase (ALBERTAZZI, 2006; GAVISK, 2002; WILLEMANN, 2007).

4.1.3 Deslocamento de fase

Como mencionado na seção anterior, a diferença de fase entre dois pontos em uma superfície é obtida a partir da combinação de imagens com incrementos de fase bem definidos. Os incrementos são aplicados de forma controlada pelo cristal piezoelétrico (PZT) no espelho móvel do interferômetro, paralelamente ao seu eixo. Dessa forma, o caminho percorrido pela luz será modificado, alterando a fase de cada ponto do padrão *speckle* (ASNT, 2012; FRANCIS, 2013; FRANCIS, TATAM e GROVES, 2010; WILLEMANN, 2002).

Para calcular a fase, são introduzidos incrementos de fase de 90° através do PZT. São adquiridas quatro imagens defasadas entre si antes e depois da aplicação do carregamento. A intensidade de cada ponto no padrão pode ser calculada com o seguinte sistema de equações:

$$I_1 = 2I_0^2[1 + \cos(\phi_0)] \quad (4.5)$$

$$I_2 = 2I_0^2[1 + \cos(\phi_0 + 90^\circ)] \quad (4.6)$$

$$I_3 = 2I_0^2[1 + \cos(\phi_0 + 180^\circ)] \quad (4.7)$$

$$I_4 = 2I_0^2[1 + \cos(\phi_0 + 270^\circ)] \quad (4.8)$$

Resolvendo o sistema anterior e isolando o valor da fase, obtém-se:

$$\phi_0 = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad (4.9)$$

Considerando os sinais do numerador e denominador da equação 4.9, determina-se os valores da fase dentro da faixa entre 0° e 360° . Além desse limite, a equação fornece valores cômputos dos ângulos referentes à primeira volta. Dessa forma, ocorre o “salto de fase”, correspondente a uma descontinuidade de 360° ao passar para uma franja vizinha, como mostrado na Figura 12. No entanto, o valor de fase real é uma quantidade contínua que ultrapassa esses limites, sendo necessária a utilização de um algoritmo de remoção de salto de fase – o *phase unwrapping*. (STAUB, 2018; STEINCHEN, 2003; WILLEMANN, 2002).

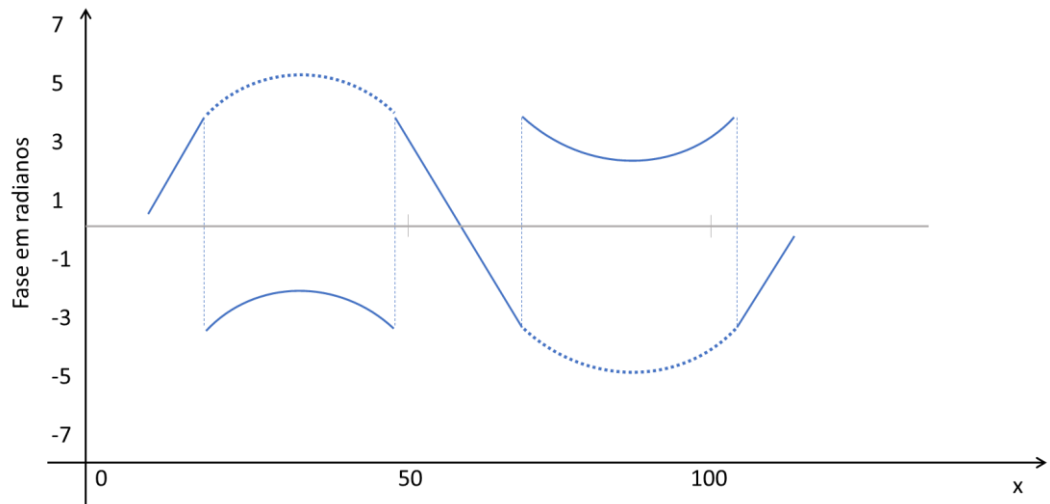


Figura 12 - Exemplo de remoção do salto de fase.

Através do conjunto de valores de fase de todos os pontos dessas imagens, obtêm-se os mapas de fases. A subtração entre os mapas de fase antes e após a aplicação do carregamento resulta no mapa de diferença de fases. Nesse mapa final, um padrão visual será observado. Caso existam defeitos internos, surgirão franjas de interferência responsáveis por demonstrar a variação da deformação na superfície da peça inspecionada, resultante da aplicação do carregamento (FRANCIS, TATAM e GROVES, 2010; NEWMAN, 2018; SOUZA, 2015). A Figura 13 ilustra a sequência para a produção do padrão de franjas característico.

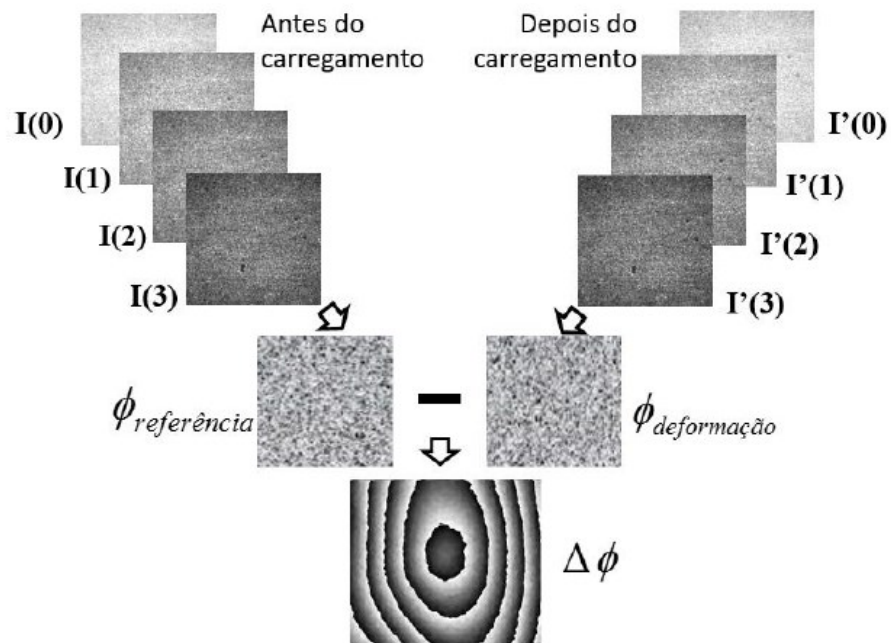


Figura 13 - Subtração dos mapas de fase e obtenção do Mapa das Diferenças de Fase (BORTOLI, 2019).

4.2 TÉCNICAS DE CARREGAMENTO

A aplicação da técnica shearografia exige que uma excitação externa seja aplicada ao material inspecionado, de modo que sejam criadas as condições necessárias para a visualização de seus possíveis defeitos internos. O carregamento deve manter a integridade da estrutura, ou seja, não deve ser invasivo nem danificar o material.

Ao submeter um objeto a um carregamento, cria-se um campo de deformações em sua superfície. Caso existam defeitos internos no material, haverá uma concentração de tensão em torno do defeito que irão gerar anomalias no campo de deformações da superfície. Essas anomalias serão evidenciadas por um padrão de franjas no interferograma, como ilustrado na Figura 14 (VIOTTI e ALBERTAZZI, 2014).

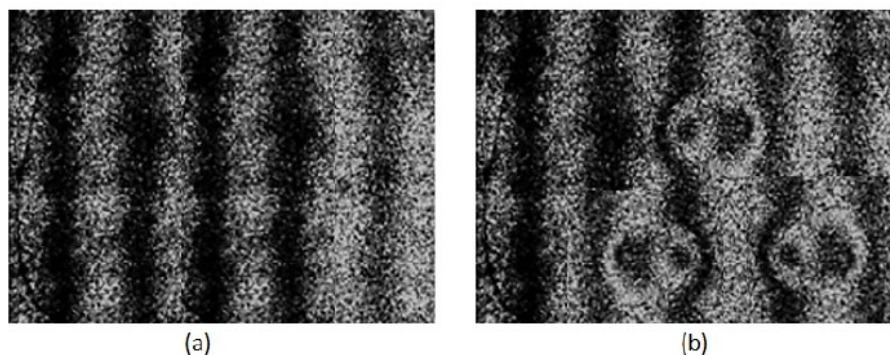


Figura 14 - (a) Imagem de intensidade em região sem defeitos; (b) Alterações no padrão de franjas na presença de defeitos. Adaptado de (ZHANWEI LIU *et al.*, 2011).

De maneira geral, os carregamentos podem ser classificados em estáticos e dinâmicos. O carregamento estático engloba os carregamentos mecânicos, como flexão, torção, compressão, variação de pressão interna (positiva) e vácuo. Já como carregamento dinâmico, podem ser citados os carregamentos térmicos e as vibrações harmônicas. A escolha do tipo, tempo de aplicação e da intensidade do carregamento devem levar em consideração o material inspecionado e as características do defeito a ser detectado (STAUB, 2018; STEINCHEN e YANG, 2003; WILLEMANN, ALBERTAZZI e MENICONI, 2007).

4.2.1 Carregamento mecânico

O carregamento mecânico consiste na aplicação de moderados níveis de tração, torção, flexão e variação da pressão interna (positiva ou negativa). Este último tipo de carregamento é muito aplicado em análise de vasos de pressão e tubulações. Esse tipo de carregamento gera campos de deformação relativamente uniformes quando aplicados em materiais compósitos. A

presença de um defeito no interior do material gera anomalias no campo de deformações, visíveis no mapa de diferenças de fase. Isso ocorre porque a região defeituosa não acompanha a deformação do material na mesma proporção que a região sem defeitos (SOUZA, 2012; WILLEMANN, ALBERTAZZI e MENICONI, 2007).

A Figura 15 mostra a aplicação de um carregamento mecânico por meio da tração do material.

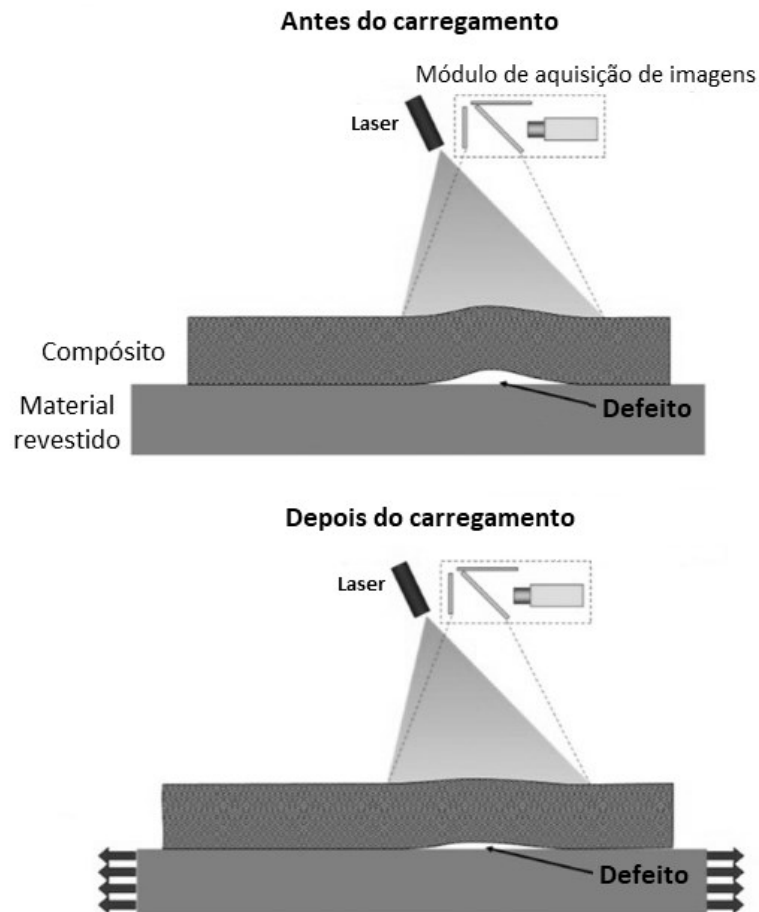


Figura 15 - Funcionamento do carregamento mecânico por tração. Adaptado de: (SOUZA, 2015).

4.2.2 Carregamento mecânico por vácuo

No caso do carregamento mecânico por vácuo, é aplicada pressão negativa na superfície revestida. Com a aplicação do vácuo, a bolha de ar no interior do material tende a se expandir e gera as discontinuidades na superfície (Figura 16). A aplicação desse carregamento, no entanto, apresenta algumas desvantagens por exigir o uso de câmara de vácuo (

Figura 17). Para cada tipo de análise, a câmara de vácuo utilizada deve ter dimensões e geometria apropriadas, o que dificulta sua aplicação generalizada em campo (STAUB, 2018; WILLEMANN, ALBERTAZZI e MENICONI, 2007).

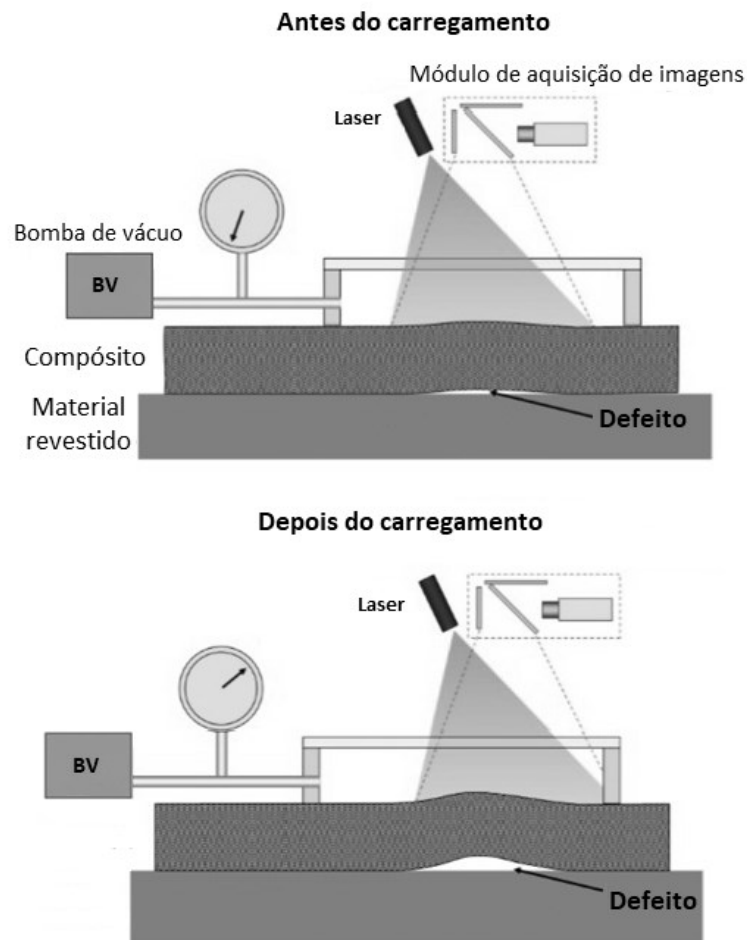


Figura 16 - Funcionamento do carregamento mecânico à vácuo. Adaptado de: (SOUZA, 2015).



Figura 17 - Câmara para aplicação de vácuo (ALBERTAZZI, 2006).

4.2.3 Carregamento vibracional

O carregamento vibracional pode ser feito através do acoplamento de atuadores piezoelétricos na superfície inspecionada (Figura 18), ou através de onda sonora utilizando alto-falantes. A faixa de frequências utilizada para excitar o material até sua camada mais interna costuma estar entre 1 a 100 kHz. Neste caso, o principal defeito a ser detectado é o descolamento entre camadas em uma região do revestimento (SOUZA, 2012; STAUB, 2018; VIOTTI e ALBERTAZZI, 2014).

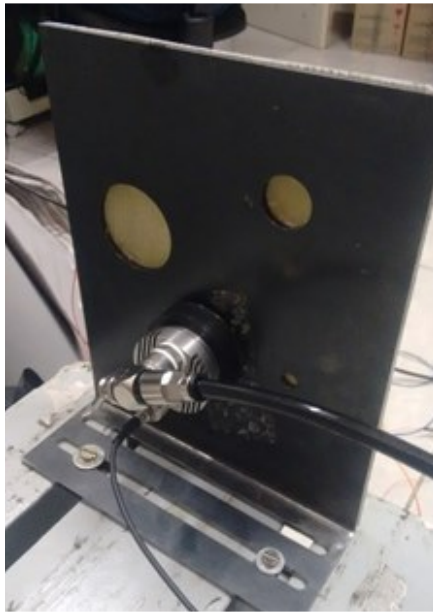


Figura 18 - Atuador piezoelétrico: *shaker* (STAUB, 2018).

A amplitude e a frequência de ressonância dependem do tipo, profundidade e extensão do defeito, bem como do material inspecionado. Dessa forma, é necessário realizar varreduras para identificar a frequência de ressonância de cada defeito. As camadas descoladas do material se comportam como uma membrana. Caso seja excitada em sua frequência de ressonância, sua vibração será muito intensa e diferente da região que não possui defeitos (Figura 19). As franjas de interferência obtidas são associadas à amplitude de vibração das camadas e, com isso, pode-se observar a presença de defeitos (ALBERTAZZI *et al.*, 2007; SCHÖNTAG, WILLEMANN e ALBERTAZZI, 2010).

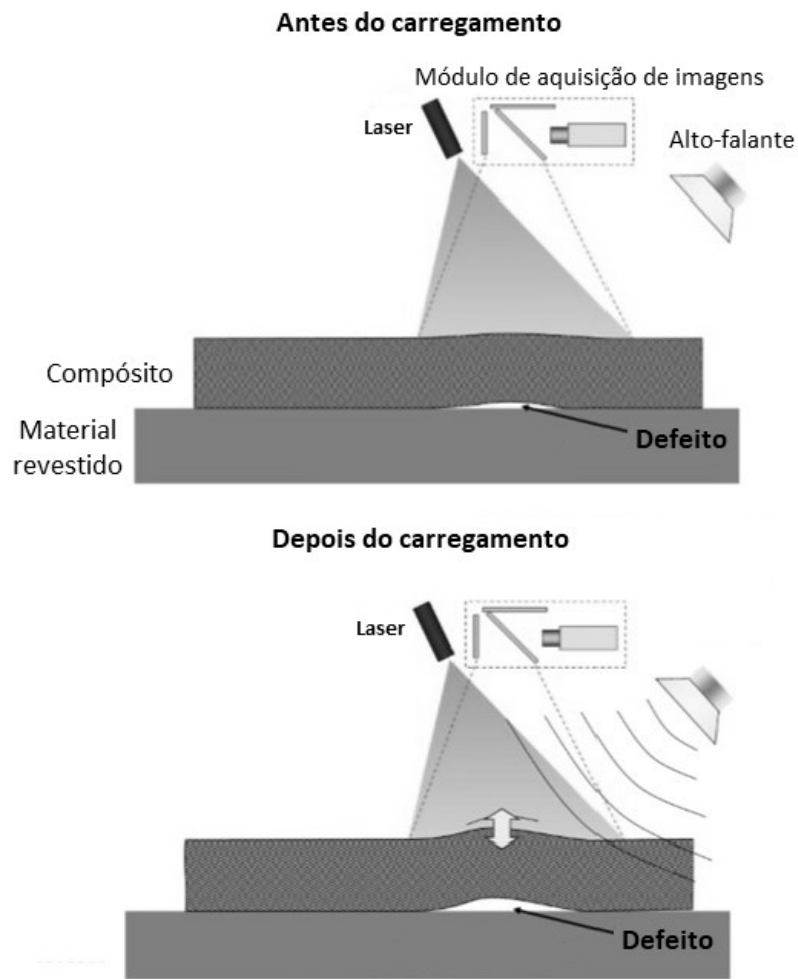


Figura 19 - Funcionamento do carregamento vibracional. Adaptado de: (SOUZA, 2015).

4.2.4 Carregamento térmico

A aplicação de um carregamento térmico é feita a partir da introdução de um fluxo de calor no material analisado, através de lâmpadas halógenas (Figura 20) ou emissoras de radiação infravermelha, aquecedores elétricos ou sopradores térmicos. Sua grande vantagem é a facilidade de aplicação, motivo pelo qual é muito empregado em campo.



Figura 20 - Lâmpada halógena para aplicação de carregamento térmico (WILLEMANN, ALBERTAZZI e MENICONI, 2007).

Com a aplicação do calor, o material tende a expandir devido à dilatação térmica. Na ausência de defeitos, o campo de deformação causado pela variação de temperatura é relativamente uniforme. No entanto, em regiões defeituosas, o campo de deformações apresenta descontinuidades. Devido à diferença entre os coeficientes de dilatação térmica dos compósitos e do material metálico de base, são geradas grandes anomalias nos padrões de franjas que auxiliam na detecção de defeitos. A Figura 21 ilustra um exemplo da aplicação de carregamento térmico.

Para a shearografia, o importante é que haja a variação nos campos de deformações dos mapas adquiridos. Portanto, a inspeção com excitação térmica pode ser realizada tanto na fase de aquecimento da estrutura, quanto na fase de resfriamento. Ainda, o aquecimento pode ser realizado tanto continuamente, quanto de forma pulsada. O tempo e a potência de aquecimento dependem da espessura do revestimento, da profundidade do defeito e do tipo de material compósito. Variações de temperatura provocadas pelo carregamento térmico na faixa de 2°C e 5°C são geralmente suficientes para a obtenção de franjas (VIOTTI e ALBERTAZZI, 2014; WILLEMANN, ALBERTAZZI e MENICONI, 2007).

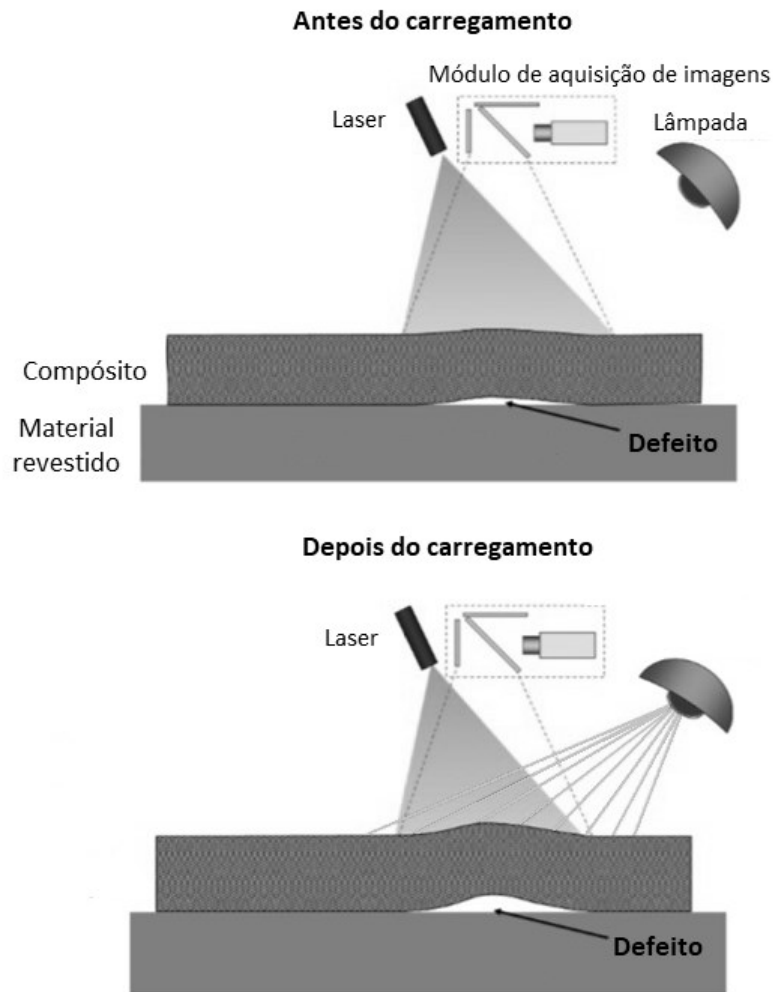


Figura 21 - Funcionamento do carregamento térmico. Adaptado de: (SOUZA, 2015).

Neste trabalho, será apresentada uma nova técnica para aplicação de carregamento térmico através do efeito Joule.

5 REVESTIMENTO AUTOEXCITÁVEL

Como mencionado na sessão anterior, a shearografia é uma técnica capaz de realizar inspeções não destrutivas em materiais compósitos. É imprescindível que a aplicação de uma excitação no material gere uma deformação capaz de causar os efeitos necessários para que seja possível a visualização dos defeitos internos ao revestimento. No caso do carregamento térmico, é necessário que exista alterações de temperaturas no interior do compósito.

Na maioria dos casos, a perturbação causada pelo carregamento é gerada a partir da camada mais externa, por exemplo, com o uso de lâmpadas e sopradores térmicos (Figura 22). Essa configuração faz com que as camadas mais externas se deformem muito mais que as internas. A ocorrência de deformações mais acentuadas na camada externa do reparo dificulta a detecção dos defeitos que estão localizados nas camadas mais internas do compósito, principalmente em peças espessas.

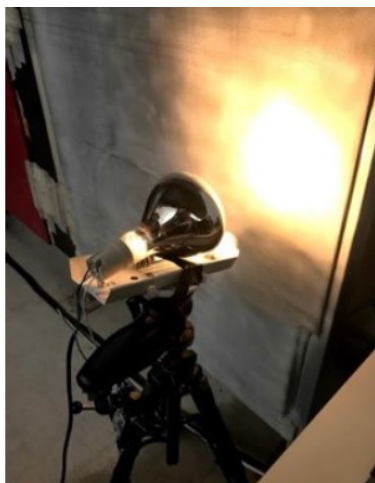


Figura 22 - Excitação térmica externa com uso de lâmpada.

A fim de melhorar a qualidade das imagens de shearografia obtidas com carregamento térmico convencional, este trabalho tem como objetivo analisar uma estrutura especial capaz de gerar a excitação térmica a partir de uma camada intermediária do revestimento. Isto significa que uma das camadas internas do reparo é transformada em um elemento ativo de aquecimento e a aplicação do carregamento térmico é feita de dentro para fora. Nesse caso, como a excitação é realizada a partir do próprio revestimento, dispensando um módulo de carregamento à parte, é possível denominá-lo de “revestimento autoexcitável”.

As fibras de vidro são amplamente utilizadas em reparos de materiais metálicos. No entanto, como esse material não transmite eletricidade eficientemente, adicionou-se ao reparo uma camada de fibra de carbono. Neste caso, a fibra de carbono tem a função principal de servir

como uma resistência elétrica que, ao ser conectada a um circuito elétrico através do qual é transmitida uma corrente elétrica, é capaz de gerar calor através do efeito Joule. O calor gerado é dissipado para as camadas adjacentes, aquecendo o material, como mostrado na Figura 23.

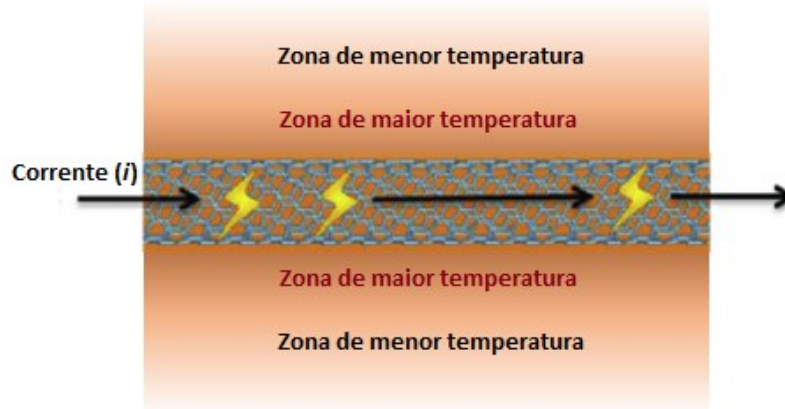


Figura 23 - Aquecimento por efeito Joule. Fonte: Adaptado de (CHIEN, A. et al, 2014).

O objetivo da estrutura autoexcitável é facilitar as atividades de inspeção e torná-las mais frequentes, viabilizando o monitoramento mais frequente dessas estruturas e minimizando os riscos de falhas. Com processos de inspeção não-destrutiva mais confiáveis e normatizados, a indústria do Petróleo e Gás poderá ampliar o uso das estruturas compósitas com mais segurança.

Idealmente, entende-se que o reparo autoexcitável pode representar uma combinação de vantagens observadas na utilização de dois carregamentos básicos: térmico externo e por pressão. Assim como no carregamento térmico externo, por meio de lâmpada halógena ou soprador térmico, esse método se manteria transparente ao processo produtivo, ou seja, poderia ser executado sem causar alguma interferência na produção. Adicionalmente, o reparo autoexcitável poderia produzir imagens de shearografia com qualidade similar àquelas obtidas com carregamento por pressão, apresentando maior contraste entre franjas e menor nível de ruído. Com isso, almeja-se uma maior probabilidade de detecção dos defeitos internos.

Outra vantagem que pode ser apresentada por esse dispositivo é a possibilidade de geração de fluxo térmico a partir de diferentes profundidades. Neste caso, mais de uma camada excitadora pode ser inserida no revestimento de modo que seja possível também avaliar a profundidade do defeito, especialmente em reparos espessos.

5.1 EFEITO JOULE

Quando uma corrente elétrica é transmitida através de um condutor não ideal, este se aquece, ou seja, a energia elétrica é transformada em energia térmica. Este fenômeno é conhecido como efeito Joule. Fisicamente, o fenômeno acontece devido às colisões dos elétrons da corrente elétrica com as partículas do condutor. O processo faz com que parte da energia cinética do elétron seja transferida para o átomo, aumentando seu estado de agitação e, portanto, sua temperatura. O efeito Joule é gerado apenas enquanto há a aplicação de um campo elétrico no material, como mostra a Figura 24. Quando a corrente é removida, o aquecimento cessa e o material retorna à sua temperatura inicial (LU, 2019).

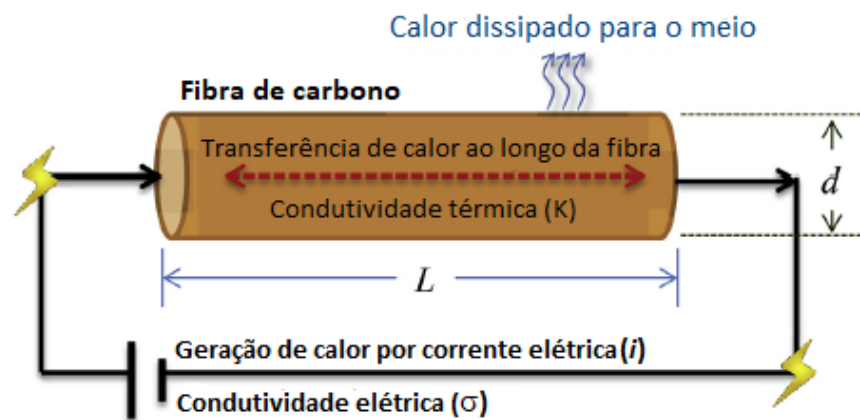


Figura 24 - Geração do efeito Joule. Fonte: Adaptado de (CHIEN, A. et al, 2014).

Para que o efeito Joule aconteça é necessário que o condutor apresente alguma resistência elétrica, ainda que muito baixa. No caso de revestimentos por material compósito polimérico, é imprescindível a presença de filamentos condutores elétricos. O material mais comum utilizado para essa finalidade é o carbono (HELERBROCK, 2021). A fibra de carbono, além de ser condutora elétrica, torna o compósito mais resistente sem agregar peso significativo a ele, mantendo boa relação resistência-peso dos reparos compósitos (CHUNG, 2000).

Para investigar a relação entre a corrente elétrica, o efeito Joule e a temperatura, pode-se calcular a variação de temperatura causada pelo efeito Joule a partir da Equação 5.1:

$$\Delta T_J = \frac{Q}{mc} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{Ui}{mc} dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{EJ}{c\rho} dt \quad (5.1)$$

onde c é o calor específico [J/(kg.K)], Q é a quantidade de calor causada pelo aquecimento por efeito Joule [J], m é a massa [kg], U é a tensão aplicada [V], i é a corrente elétrica [A], t é o

tempo de medição [s], ρ é a densidade da fibra de carbono [kg/m^3], E é o campo elétrico aplicado [V/m] e J é a densidade da corrente elétrica [A/m^2].

5.2 CORPO DE PROVA

Componentes expostos a agentes corrosivos representam a maior demanda por reforços estruturais na indústria de Petróleo e Gás. Costados de navios FPSOs e tubulações são considerados os componentes mais críticos por estarem constantemente em contato com agentes corrosivos tanto interna quanto externamente. Por ser de mais fácil modelagem, os corpos de prova considerados são planos, que bem representam trechos de costado de FPSO. Os procedimentos adotados neste trabalho também poderão ser, futuramente, aplicados em estudos de outros componentes não planos, como as tubulações.

O conceito do revestimento autoexcitável baseia-se na inserção de uma ou mais camadas de fibra de carbono eletricamente conectadas dentre as demais camadas de fibras de vidro que, juntamente com a resina, formam o material compósito. Para a(s) camada(s) de fibra de carbono é feita ligação a terminais de alimentação elétrica responsáveis por fornecer energia para a geração de calor. Os filamentos do tecido da fibra são separados em conjuntos e envoltos por conectores metálicos tubulares (com aproximadamente 3mm de diâmetro) nas suas extremidades. Os conectores metálicos são, então, soldados a um fio de cobre, como mostrado na Figura 25.

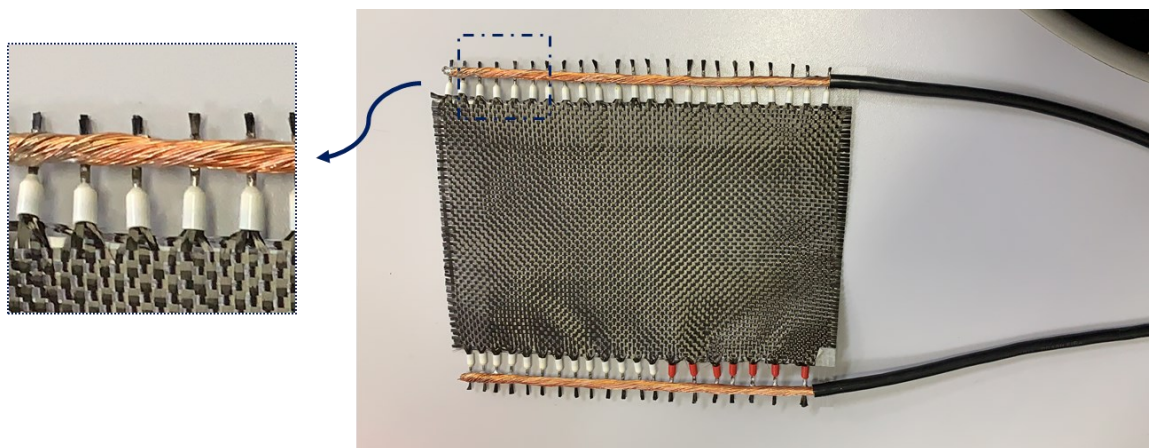


Figura 25 - Camada de excitação: fibra de carbono com ligações elétricas.

A escolha do tecido de fibra de carbono foi baseada no fato deste ser constituído com filamentos agrupados, o que facilita a ligação aos terminais elétricos. Dessa forma, o conjunto de filamentos pode ser representado por várias resistências ligadas em paralelo.

Nesta análise, um corpo de prova (CP) foi construído com dez camadas de fibra de vidro e uma camada de fibra de carbono dispostas sobre uma chapa metálica (Figura 26). A espessura total do revestimento é em torno de 5mm. Reparos protetores de compósitos com espessuras próximas a esta são comumente encontrados na indústria de P&G.

Adicionalmente, nove termopares tipo T, cuja incerteza de medição é de $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$, foram inseridos entre as camadas, sendo quatro deles posicionados no ponto A, quatro no ponto B e um para a medição da temperatura ambiente, conforme esquematizado na Figura 26, para avaliar a variação de temperatura ao longo da espessura do material.

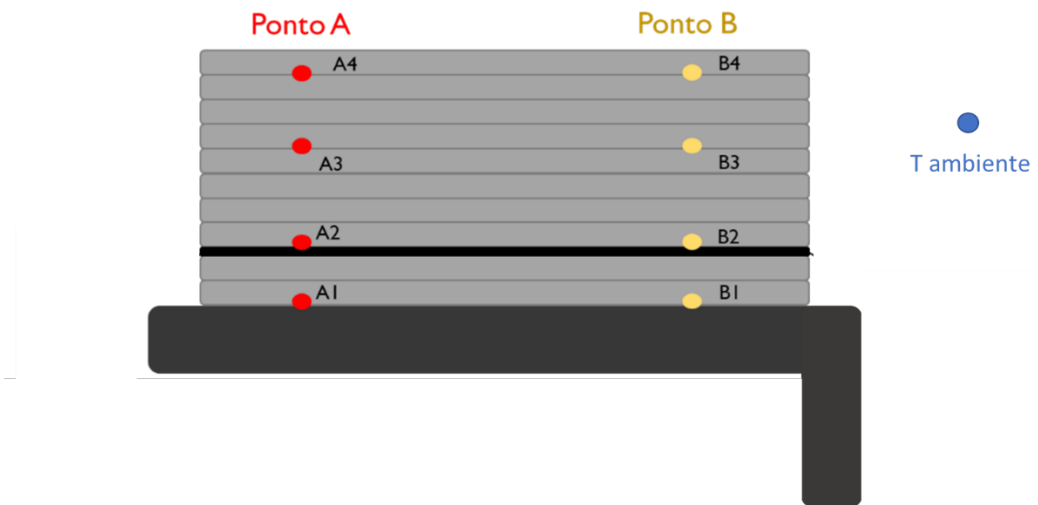


Figura 26 - Disposição das camadas e termopares utilizados para montagem do CP. A linha preta representa a camada eletricamente conectada.

A chapa metálica utilizada como base do CP apresenta defeitos inseridos artificialmente, como furos e rasgos. Os furos são de 5, 15 e 25 mm de diâmetro. Já os rasgos possuem de 40 a 60 mm de comprimento e 10 mm de largura. O revestimento compósito foi confeccionado através da técnica de laminação manual, que consiste na deposição sequencial de camadas alternadas de resina e de fibra. Para facilitar o processo de cura e garantir melhor aderência entre as camadas, foi utilizada a aplicação de vácuo. É importante lembrar que o fato de o CP ter sido construído de forma manual, não garante um percentual uniforme de fibra e resina. O resultado da montagem do CP pode ser visto na Figura 27.

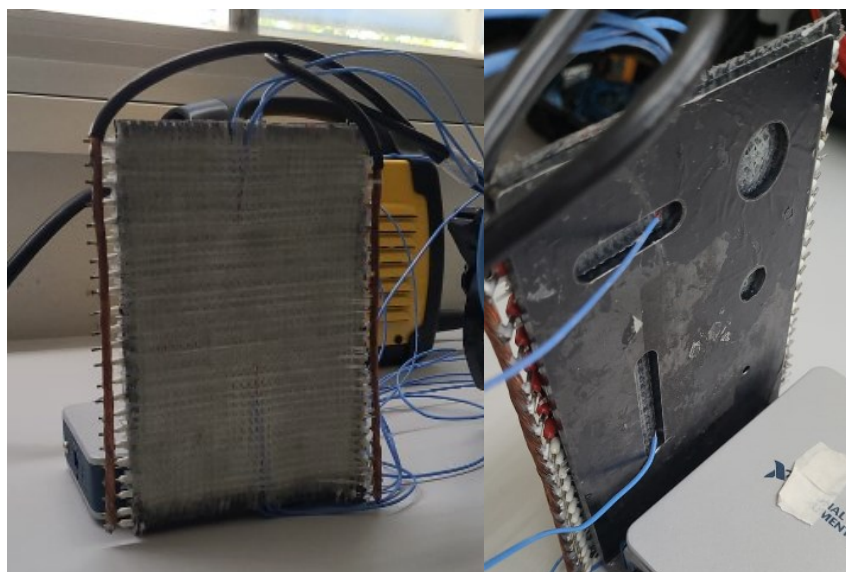


Figura 27 – Corpo de prova após montagem com fibras de vidro e de carbono, e ligações elétricas. A parte esquerda mostra uma vista frontal e a da direita o fundo da placa metálica onde são visíveis os defeitos artificiais.

6 ANÁLISE TÉRMICA

Neste capítulo é feita uma análise térmica do comportamento do reparo autoexcitável para avaliar sua eficiência na inspeção com shearografia.

Para avaliar de forma mais aprofundada a utilização de carregamentos térmicos em inspeções com shearografia, foi realizada uma análise inicial da distribuição e variação da temperatura entre as camadas do revestimento do corpo de prova desenvolvido. Para isso, os termopares inseridos no CP foram conectados ao sistema de aquisição de dados DAQ USB da National Instruments, e os terminais de ligações elétricas da fibra de carbono foram conectados a um circuito elétrico.

Para fornecer a alimentação elétrica à camada de excitação, foi utilizada uma fonte inversora de solda modelo Vonder-RIV136, mostrada na Figura 28. Esta fonte trabalha com o valor mínimo de corrente elétrica de 10A. Desse modo, esse valor foi estabelecido para esta análise. Os experimentos realizados consistiram em variar o tempo de aplicação da corrente elétrica e verificar o comportamento do material em relação ao seu aquecimento ao longo do tempo nos pontos onde os termopares foram instalados. Dessa forma, pode-se observar o fluxo de calor nas camadas do revestimento.



Figura 28 - Fonte inversora de bancada utilizada no experimento. Fonte: Vonder, 2021.

O tempo de aplicação da corrente elétrica no material variou conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Tempo de aquecimento do CP em cada teste.

Ensaio	Tempo (s)
Experimento 1 - E1	3
Experimento 2 - E2	4
Experimento 3 - E3	5

Cada experimento foi repetido três vezes, tendo sido aguardado um tempo entre experimentos de pelo menos 15 minutos, o que foi suficiente para que o corpo de prova esfriasse. O tempo total de aquisição de dados da temperatura no interior do CP foi de aproximadamente 5 minutos até que a temperatura final chegasse o mais próximo possível da temperatura ambiente. Para cada termopar, foi adquirida uma medição por segundo.

Os dados foram obtidos através de software específico desenvolvido em LabVIEW e posteriormente analisados no Excel. Para cada uma das três repetições, primeiramente foram calculadas as variações de temperatura em relação à temperatura inicial da respectiva camada. Posteriormente, calculou-se a variação de temperatura média para cada experimento.

A partir dos dados observados nos testes, notou-se que os valores de temperatura referentes aos pontos A e B apresentaram diferenças insignificantes. Por esse motivo, as colunas A e B foram simplificadas em uma única coluna de termopares a partir da média entre as temperaturas entre ambos os pontos, como demonstrado na Figura 29.

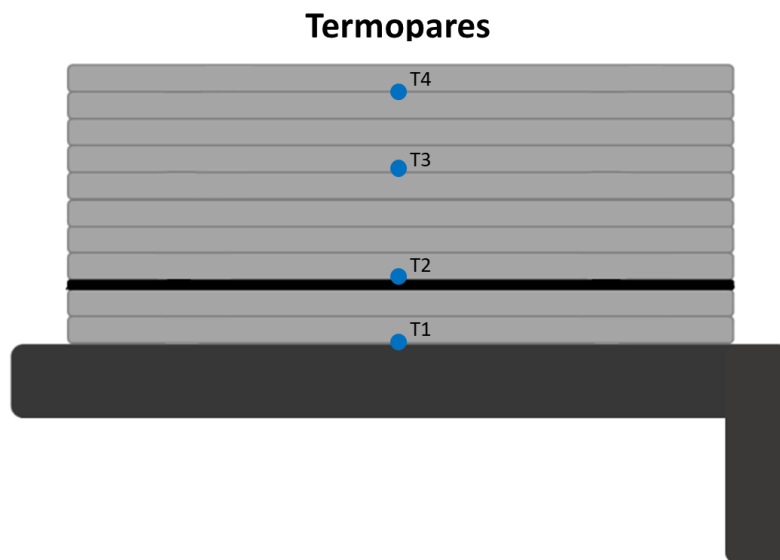


Figura 29 – Esquemático da média da coluna de termopares (união das colunas A e B).

As Tabelas 2 e 3 a seguir mostram a variação máxima de temperatura em cada repetição, a média e o desvio padrão nos experimentos. Os termopares T2 (Tabela 2) e T4 (

Tabela 3) foram os escolhidos por estarem localizados na camada de aquecimento e na camada mais externa do revestimento (doravante denominada de camada de interesse), respectivamente.

Tabela 2 - Maiores variações de temperatura em [°C] no termopar T2 situado na camada de aquecimento.

Experimento / Repetição	E1	E2	E3
Repetição 1 - R1	1,21	1,56	2,01
Repetição 2 - R2	1,31	1,65	1,81
Repetição 3 - R3	1,34	1,56	1,83
Média [°C]	1,29	1,59	1,88
Desvio padrão [°C]	0,068	0,052	0,110

Tabela 3 - Maiores variações de temperatura em [°C] no termopar T4 situado na camada de interesse.

Experimento / Repetição	E1	E2	E3
R1	0,33	0,42	0,52
R2	0,31	0,39	0,45
R3	0,34	0,39	0,43
Média [°C]	0,33	0,40	0,47
Desvio padrão [°C]	0,015	0,017	0,047

A Tabela 4 resume as maiores temperaturas obtidas em cada experimento para cada um dos termopares.

Tabela 4 – Variações máximas de temperaturas em [°C] atingidas em cada termopar.

Experimento	Termopar 1 (T1)	Termopar 2 (T2)	Termopar 3 (T3)	Termopar 4 (T4)
E1	0,95	1,29	0,43	0,33
E2	1,19	1,59	0,53	0,40
E3	1,40	1,88	0,66	0,47

A seguir, serão apresentados os gráficos das variações de temperaturas ao longo do tempo nos três experimentos analisados. As curvas de temperaturas foram plotadas para um

curto período para melhor visualização da evolução da temperatura próxima ao pico de cada termopar. Nota-se que, em todos os experimentos, não foi possível diferenciar o tempo de pico dos termopares T1 e T2 devido à grande proximidade entre esses dois pontos.

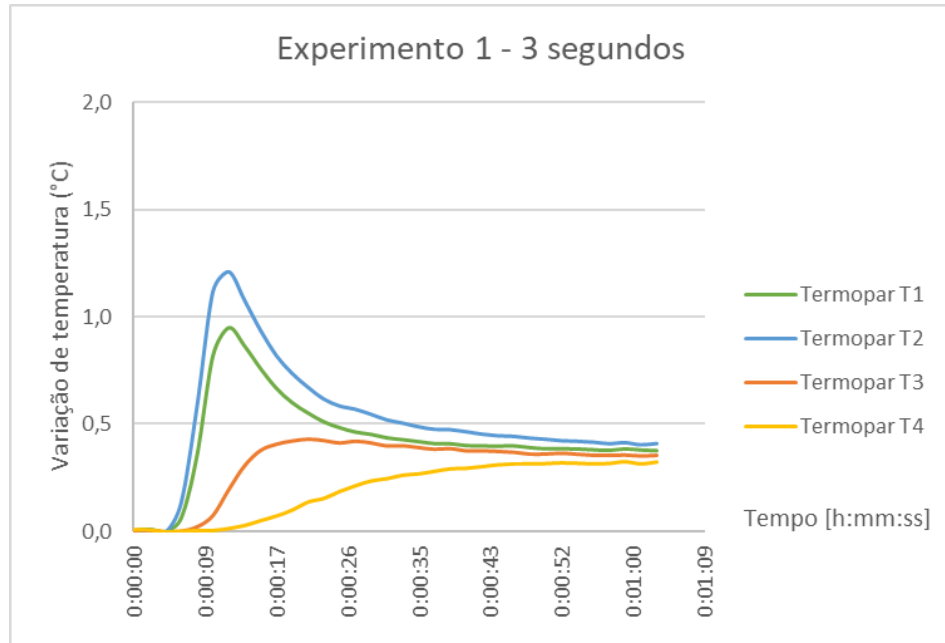


Figura 30 - Gráfico da variação de temperatura do experimento E1.

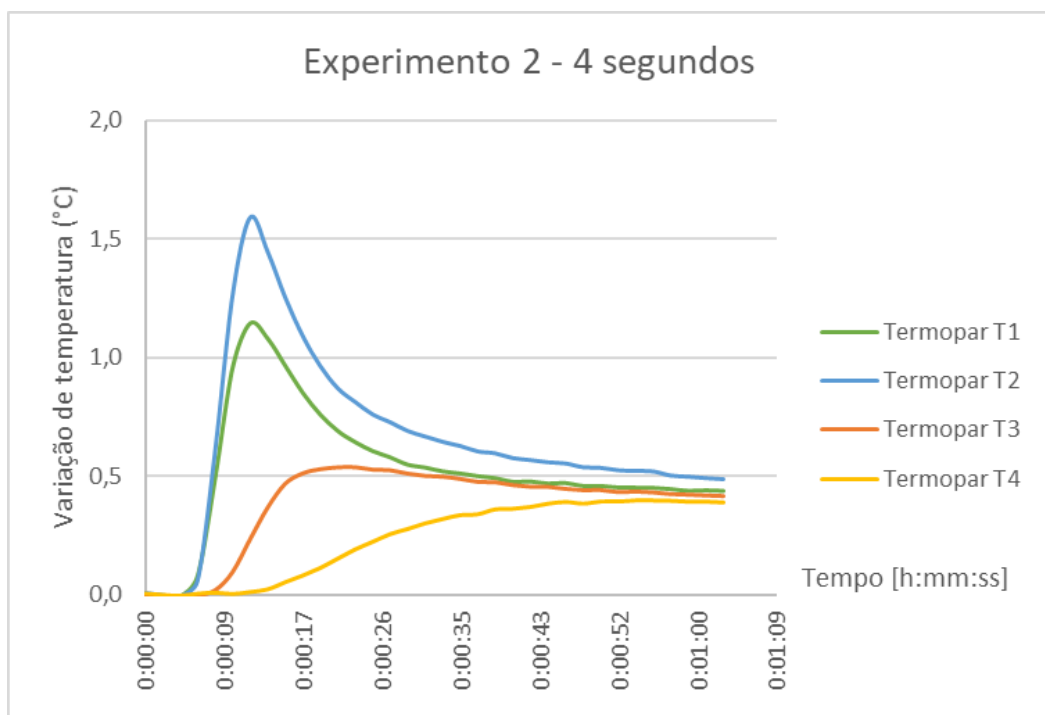


Figura 31 - Gráfico da variação de temperatura do experimento E2.

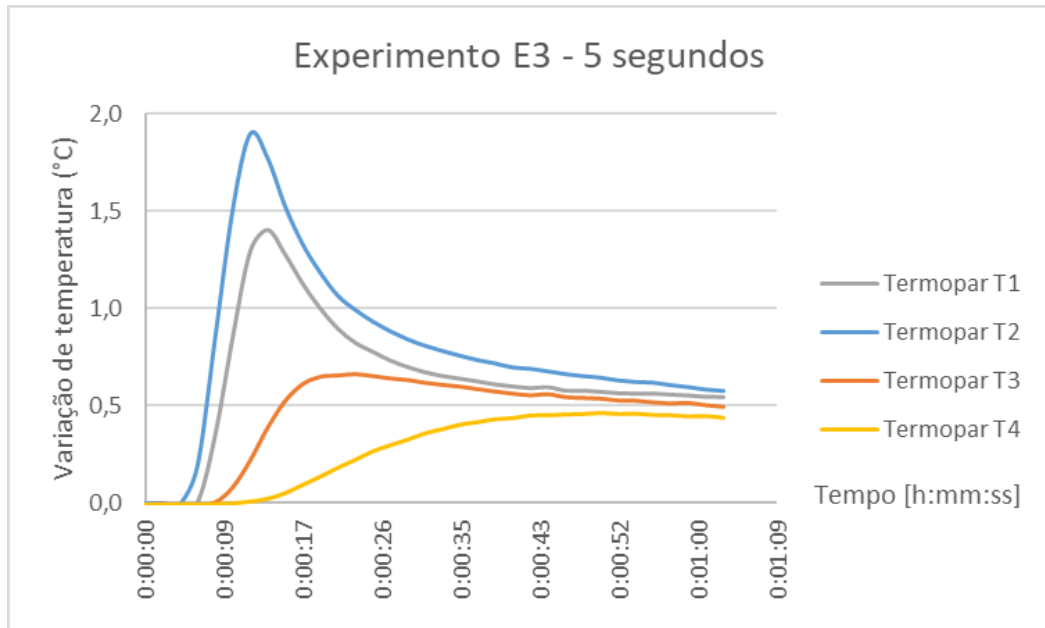


Figura 32 - Gráfico da variação de temperatura do experimento E3 com os valores máximos de variação de temperatura.

A partir dos dados obtidos nos experimentos, foi possível fazer uma estimativa da variação de temperatura para tempos mais longos de aquecimento aplicados a este material compósito. Desta maneira, obteve-se a equação da reta para as camadas de aquecimento (T2), de interesse (T4) e uma camada intermediária (T3) (Figura 33).

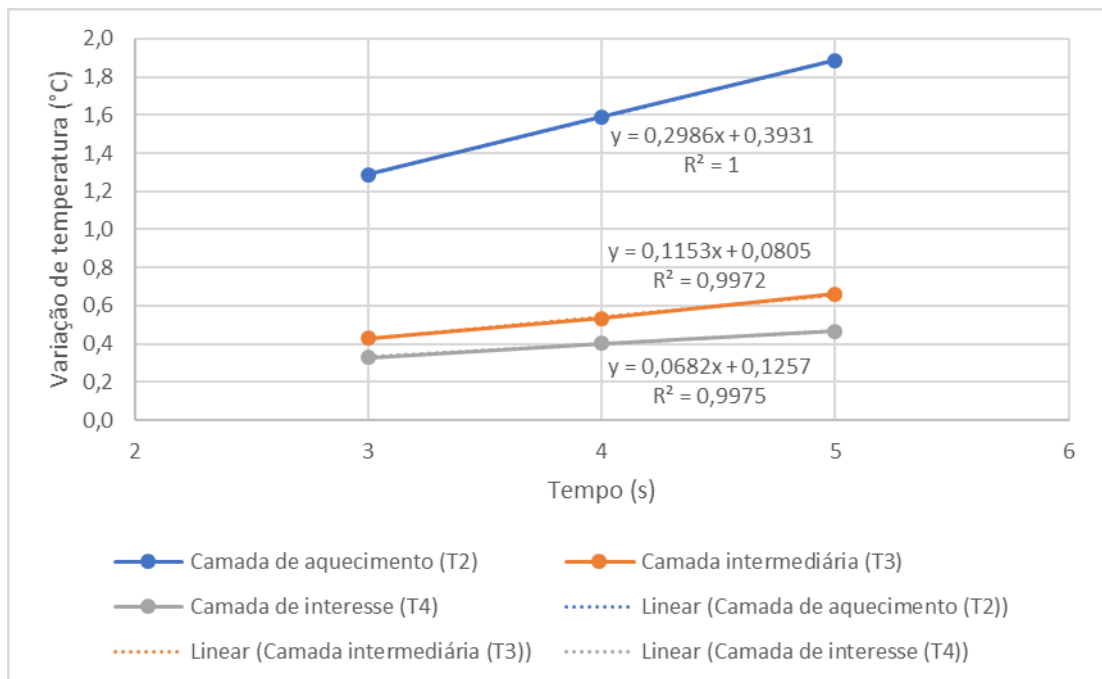


Figura 33 - Gráfico da equação da reta para os termopares T2 (camada de aquecimento), T3 (camada intermediária) e T4 (camada de interesse).

A partir da estimativa realizada com base no Termopar T2 é possível prever o tempo máximo para a aplicação de corrente elétrica no CP a fim de evitar que a temperatura aplicada atinja o patamar da temperatura de transição vítrea (Tg) do material compósito. Caso a Tg seja atingida ou ultrapassada, tem-se a degradação das propriedades mecânicas do compósito, ou seja, o revestimento é danificado e seu objetivo e sua performance são afetados.

Já o termopar T4 representa a variação de temperatura mais externa deste CP, ou seja, em um caso real em campo, essa é a camada em que as inspeções com shearografia serão realizadas e que pode ser utilizada para inferir a temperatura interna do compósito durante o procedimento de inspeção. Portanto, essa é a camada considerada de interesse.

6.1 ESTIMATIVA DO TEMPO DE AQUECIMENTO

De acordo com a experiência de pesquisadores do Labmetro/UFSC ao desenvolverem as atividades de inspeção por shearografia, foi definido que a variação de temperatura da camada externa não deve ultrapassar 4°C. Já a Tg adotada para este tipo de revestimento é 70°C.

Com as equações, estimou-se a variação de temperatura dos três termopares ao longo do tempo, adotando-se uma temperatura ambiente (inicial) de 20°C, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Estimativas da variação de temperatura nas camadas em função do tempo considerando o modelo linear da Figura anterior.

Tempo (s)	$\Delta T2$ (°C)	$\Delta T3$ (°C)	$\Delta T4$ (°C)
3	1,3	0,4	0,3
4	1,6	0,5	0,4
5	1,9	0,7	0,5
10	3,4	1,2	0,8
50	15,3	5,8	3,5
57	17,4	6,7	4,0
100	30,3	11,6	6,9
120	36,2	13,9	8,3
140	42,2	16,2	9,7
160	48,2	18,5	11,0
166	50,0	19,2	11,4
170	51,2	19,7	11,7

Para a quantidade de camadas existentes neste revestimento, em 57 segundos de aquecimento a camada de interesse (termopar T4) atingiria a variação de temperatura estabelecida de 4°C (grifado em azul na Tabela 4). Portanto, 57 segundos seria o tempo máximo de aquecimento para realizar a inspeção por shearografia neste reparo, garantindo que não será ultrapassada a variação de 4°C necessária às inspeções com shearografia. Nota-se que, neste instante, a variação de temperatura na camada de aquecimento atinge uma variação de 17,4°C, permanecendo afastadas de sua Tg limite. Portanto, esse tempo de aquecimento atende às regras de inspeção adotadas em campo.

Em condições de laboratório, considerando uma temperatura inicial de 20°C, para atingir a variação máxima de Tg (50°C) seriam necessários 166 segundos de aquecimento (grifado em alaranjado na Tabela 4). No entanto, neste caso, a variação de temperatura da camada de interesse (T4) ultrapassaria seu limite de 4°C. Isso prejudicaria os resultados da inspeção, pois quanto mais energia a camada externa receber, mais ruídos as imagens de inspeção apresentarão devido ao número excessivo de franjas de interferência.

A partir destes resultados pode-se afirmar que a camada de excitação é capaz de fornecer energia suficiente para a inspeção com shearografia em um intervalo de tempo considerado curto. Esta característica é muito importante para que a técnica de inspeção possa ser aplicada em campo. É importante ressaltar que, em campo, as condições de temperatura podem variar.

6.2 ESTIMATIVA DA ESPESSURA

A partir da variação máxima de temperatura de 50°C na camada de aquecimento e de 11,4°C na camada de interesse, atingidas em um intervalo de 166s, é possível estimar a quantidade de camadas adicionais que levaria à variação de 4°C na camada externa do revestimento.

Para facilitar o entendimento, a Figura 34 apresenta as camadas numeradas e a Tabela 6 as respectivas temperaturas estimadas para cada camada conforme mostrou a

Tabela 5.

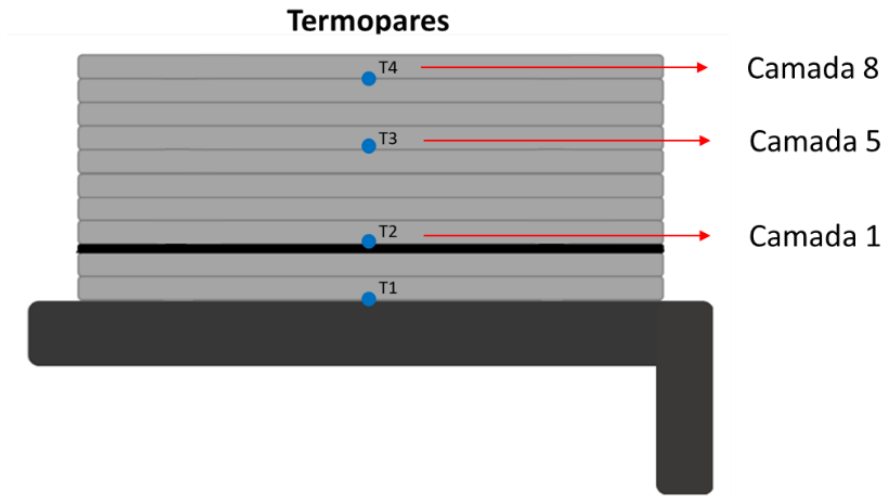


Figura 34 - Camadas utilizadas na estimativa da quantidade máxima de camadas.

Tabela 6 - Camadas e seus valores de variação de temperatura para estimar a quantidade máxima de camadas.

Camada	Temperatura (°C)
1	50,0
5	19,2
8	11,4

Conforme mostrado na Figura 35, através da linha de tendência exponencial conforme as temperaturas listadas na Tabela 6, chegou-se ao resultado de 12 camadas para que a temperatura externa atingida seja de 4°C. O modelo exponencial foi escolhido devido aos princípios da Lei de Resfriamento de Newton (LIENHARD IV e LIENHARD V, 2019). Conclui-se, portanto, que a camada de excitação seria capaz de fornecer energia suficiente para a inspeção de um reparo mais espesso, ou seja, com o total de 15 camadas (Figura 36). As estimativas estão sendo realizadas com os valores máximos, porém, dependendo das dimensões dos defeitos a serem encontrados, variações menores de temperatura (na faixa de 1 a 2°C) são comumente utilizadas, o que possibilita a inspeção de espessuras ainda maiores. Além disso, é importante destacar que o cálculo anterior é aproximado e precisa ser verificado experimentalmente para ser validado.

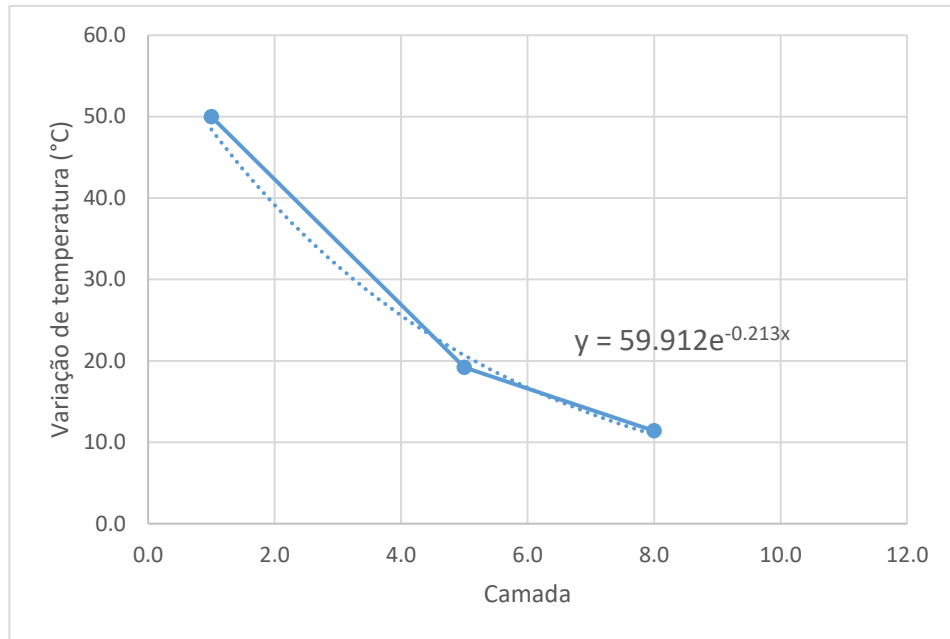


Figura 35 - Gráfico da variação de temperatura por camada.

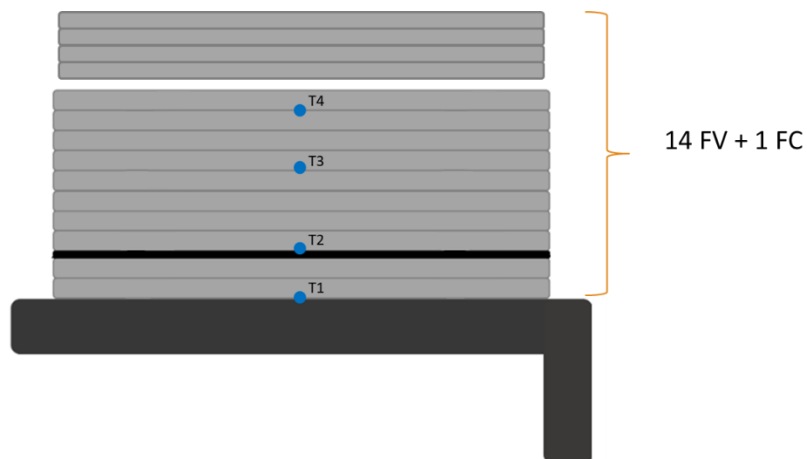


Figura 36 - Quantidade final de camadas ao atingir a Tg.

6.3 FLUXO DE CALOR

Adicionalmente, a fim de aprofundar as análises neste tipo de reparo, realizou-se o cálculo do fluxo térmico entre as camadas. Considerando-se temperaturas máximas atingidas nas camadas de aquecimento e de interesse e supondo-se um fluxo de calor unidirecional, estimou-se o fluxo de calor por condução (q'') através das camadas a partir da Equação 6.5.

$$q'' = \frac{k \cdot \Delta T}{\sum L} \quad (6.5)$$

onde k é a condutividade térmica do material, ΔT é a variação de temperatura do material analisado e L é a espessura do material.

Para esse cálculo, a espessura adotada foi de 5 mm. As características dos materiais estão mostradas na Tabela 7.

Tabela 7 - Características das fibras para o cálculo do fluxo térmico.

Material	Espessura (mm)	Condutividade térmica (W/(m.K))
Fibra de Vidro	0,40	1,3
Fibra de Carbono	0,26	10,5

Os resultados do cálculo do fluxo de calor nos três experimentos analisados estão mostrados na Tabela 8. Conforme esperado, quanto maior o tempo de aquecimento, maior será o fluxo de calor no material.

Tabela 8 - Fluxo térmico em cada experimento.

Experimento	Fluxo de calor (W/m²)
E1	514
E2	698
E3	830

Os dados experimentais obtidos foram, também, analisados com o objetivo de se determinar o melhor método de aquecimento do material para inspeções com shearografia.

6.4 AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DO AQUECIMENTO AO LONGO DA ESPESSURA

A partir dos dados obtidos experimentalmente, relacionou-se a transferência de energia entre as camadas e a energia empregada na excitação do material. Para isso, avaliou-se inicialmente a variação normalizada de temperatura (v) entre a camada de aquecimento e a camada de interesse, conforme mostra a Equação 6.6. A partir desta relação é possível avaliar as variações de temperatura independentemente da temperatura ambiente. Desse modo, diversos experimentos de aquecimento com diferentes fontes de excitação térmica podem ser comparados entre si mesmo que tenham sido realizados em diferentes temperaturas.

$$\nu = \frac{(\Delta T_{\text{aquecimento}} - \Delta T_{\text{interesse}})^2}{\Delta T_{\text{aquecimento}}} \quad (6.6)$$

Em outras palavras, quanto maior for a variação de temperatura na camada de aquecimento, maior é a energia empregada na excitação do material e quanto maior for a variação de temperatura na camada de interesse, mais energia terá chegado à camada de interesse.

Assim sendo, avaliou-se a penetração de energia através da relação entre o maior valor de temperatura da camada de aquecimento encontrado durante os experimentos e a variação ν . Essa relação, denominada Índice de Profundidade de Aquecimento - IPA (LEMOS, 2018), é obtida através da Equação 6.7.

$$IPA = \frac{\Delta T_{\text{máx}}}{\nu} \quad (6.7)$$

O IPA é um coeficiente adimensional e, em termos práticos, indica a quantidade de energia que atravessa o corpo de prova ao longo de sua profundidade durante o carregamento térmico. Portanto, quanto maior o IPA, maior é a transferência de energia de uma camada para outra. Esse índice tem grande aplicação prática pois, pode ser utilizado para comparar diferentes tipos e procedimentos de excitação térmica do material.

Para que a shearografia possa detectar defeitos no interior do compósito, é necessário que a energia de excitação chegue às camadas mais opostas do revestimento. A variação ν foi uma maneira encontrada para avaliar a energia no interior da estrutura pois, quando as temperaturas T2 (aquecimento) e T4 (interesse) estão mais próximas, os valores de ν são mais próximos de zero. Um valor de ν igual a zero significaria a igualdade de T2 e T4, e conseqüentemente, a melhor propagação da energia do interior do material. Porém, não basta apenas que as temperaturas T2 e T4 sejam próximas, pois isto também acontece quando a estrutura analisada está na temperatura ambiente. Torna-se então necessária outra condição para que a penetração de energia seja avaliada. Desta forma, a segunda condição imposta nesta análise, é que a temperatura T2 (aquecimento) seja mais alta que a temperatura ambiente, o que configura o carregamento do corpo de prova através do aquecimento.

Devido à posição da camada de aquecimento, neste trabalho, o IPA foi avaliado separadamente para as camadas de compósito acima da camada de excitação e para as camadas abaixo da camada de excitação, conforme mostra a Figura 37.

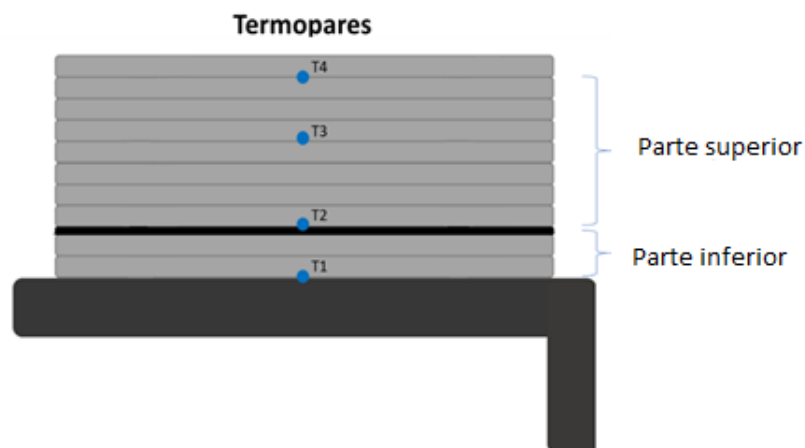


Figura 37 - Intervalos para o cálculo do IPA.

Considerando a variação máxima de temperatura em cada experimento (Tabela 4) foram obtidos os seguintes resultados para o cálculo do IPA em cada intervalo.

Tabela 9 - Resultados do cálculo do IPA.

Experimento	IPA da	IPA da
	Parte Inferior	Parte Superior
E1	21,7	1,9
E2	12,8	1,8
E3	14,9	1,7

Nota-se que os valores de IPA obtidos para a Parte Inferior são maiores que os da Parte Superior. Considerando a proximidade do termopar T1 à camada de aquecimento em comparação ao termopar T4, os resultados estão condizentes com o esperado.

No entanto, a Parte Superior é a de maior interesse. Observa-se que os resultados obtidos para o IPA nos três experimentos são muito próximos, principalmente por conta da proximidade dos tempos de aquecimento. Com esses valores, não é possível distinguir qual tempo de aquecimento seria mais adequado para a aplicação da shearografia.

Ao longo do trabalho, percebeu-se que a análise entre diferentes excitações em diferentes materiais deve levar em conta também o intervalo de tempo entre os picos de máxima temperatura das camadas de excitação e de interesse. Assim, inseriu-se a variável tempo na equação do IPA, como mostrado na equação 6.8:

$$IPA_t = \frac{\Delta T_{m\acute{a}x}}{v \cdot \Delta t} \quad (6.8)$$

onde Δt é o intervalo de tempo decorrido entre os picos de máxima temperatura na camada de excitação e na camada de interesse e IPA_t significa IPA temporal.

A partir das Figuras 30, 31 e 32 foi possível verificar que o tempo que o termopar T1 leva para atingir sua variação máxima é praticamente o mesmo que o do termopar da camada de aquecimento (T2) devido à proximidade entre eles. Por outro lado, a camada de interesse (T4) atinge sua temperatura máxima apenas após alguns segundos. Portanto, apenas a parte superior será considerada nos cálculos, cujos resultados estão mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados do cálculo do IPA temporal.

Experimento	Δt (s)	IPA T2 - T4
E1	48	0,039
E2	42	0,042
E3	38	0,046

Nota-se que, apesar de os valores de IPA_t ainda serem muito próximos, o intervalo de tempo para que a camada de interesse atinja sua temperatura máxima diminui com o aumento do tempo de aquecimento em função da difusividade térmica do material. Portanto, pode-se considerar que quanto maior o valor do IPA_t (temporal), mais energia é transferida entre as camadas em menos tempo. Neste caso, o experimento E3 foi o mais eficiente.

6.5 COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS DE EXCITAÇÃO TÉRMICA

Em um trabalho anterior realizado pela mesma autora (LEMOS, 2018), realizou-se experimentos de aquecimento com uma lâmpada halógena e uma infravermelha. O corpo de prova utilizado no experimento é mostrado na Figura 38 e seu revestimento foi realizado com o mesmo material compósito utilizado na parte superior do CP descrito nas seções anteriores. Para o experimento com ambas as lâmpadas, o aquecimento foi realizado pela camada externa, do mesmo modo como mostrado nas Figuras 20 e 22. Foi aplicado o aquecimento contínuo durante 5 segundos, da mesma forma que no experimento E3 deste trabalho. Portanto, essas três formas de excitação podem ser comparadas.

As linhas pontilhadas representam as faixas de fibra de carbono inseridas no revestimento, e:

- a) Seis furos circulares passantes de 5, 6, 10, 20, 40 e 50 mm de diâmetro;
- b) Três furos circulares passantes de 25 mm de diâmetro;
- c) Um furo quadrado passante de $(100 \times 100) \text{ mm}^2$;
- d) Um rasgo em forma de I com dimensões de $(155 \times 150) \text{ mm}^2$ e 5 mm de largura;
- e) Três rasgos de $(100 \times 2) \text{ mm}^2$ [comprimento x largura];
- f) Delaminação de $(100 \times 100) \text{ mm}^2$, aplicada diretamente no substrato metálico;
- g) Delaminação de $(100 \times 100) \text{ mm}^2$, aplicada na terceira camada de compósito;
- h) Tamponamento com chapa de metal de $(100 \times 100) \text{ mm}^2$, aplicada diretamente no substrato sobre um dos furos passantes de 25 mm.

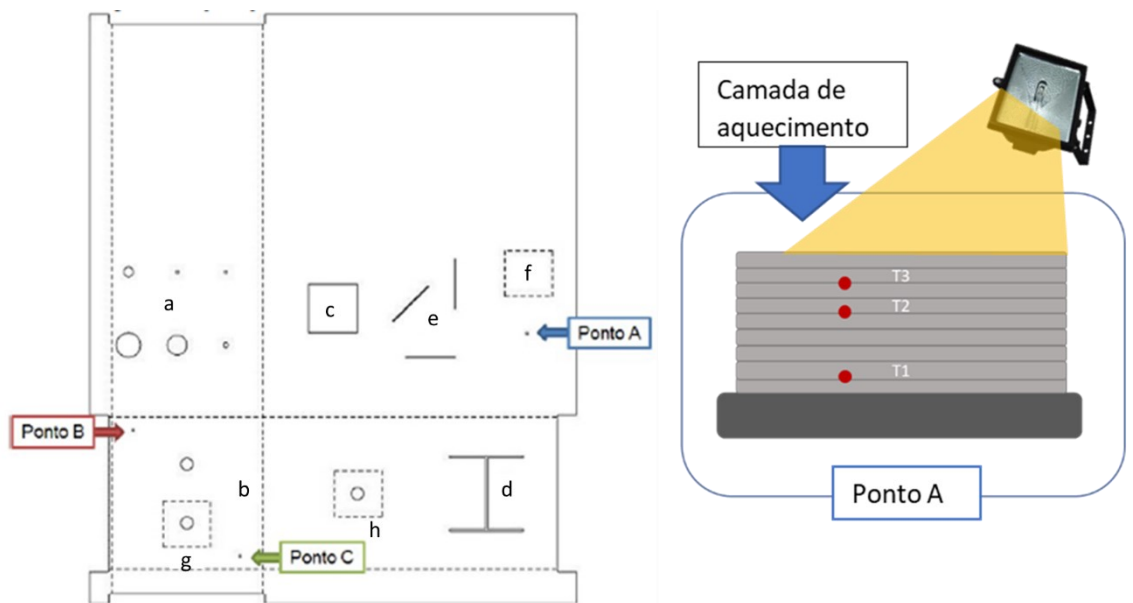


Figura 38 - Corpo de prova e revestimento utilizado em teste anterior.

Nesta análise, foram avaliados os dados referentes à variação máxima de temperatura nas camadas de aquecimento e de interesse, como mostrado nas Figuras 39, 40 e 41.

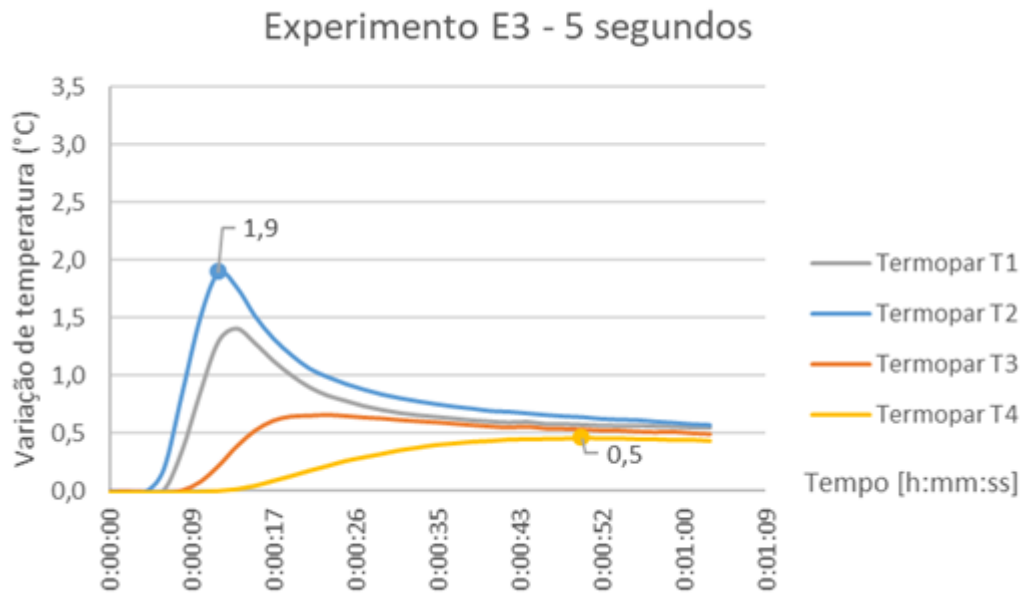


Figura 39 - Valores utilizados para o cálculo do IPA temporal no teste com autoexcitável.

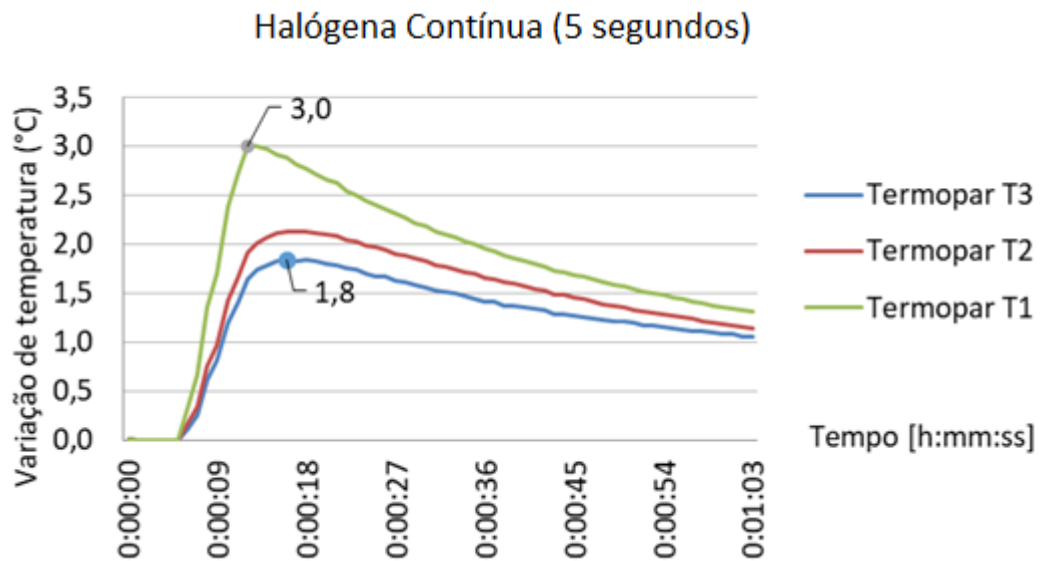


Figura 40 - Valores utilizados para o cálculo do IPA temporal no teste com lâmpada halógena.

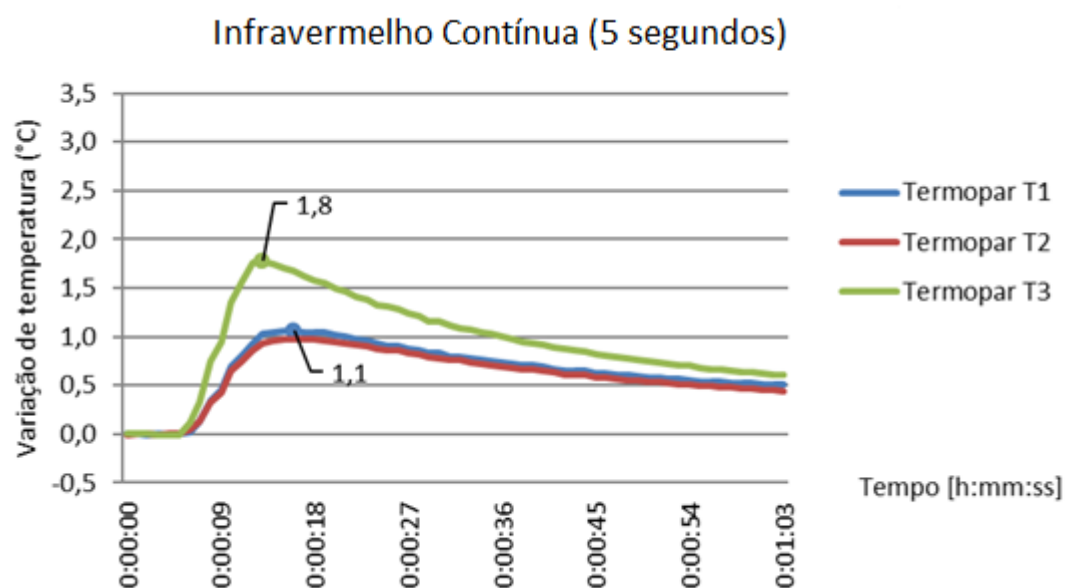


Figura 41 - Valores utilizados para o cálculo do IPA temporal no teste com lâmpada infravermelha.

Na Tabela 11 têm-se os valores referentes ao cálculo do IPA obtido para os três métodos de excitação deste trabalho para um tempo de aquecimento contínuo de 5 segundos. Na Tabela 12 são apresentados os valores do IPA temporal para os mesmos experimentos.

Tabela 11 - Resultados apresentados para o cálculo do IPA nos três métodos de excitação térmica.

Carregamento	IPA
Autoexcitável	1,7
Halógena	6,7
Infravermelha	6,0

Tabela 12 - Resultado dos cálculos do IPA temporal.

Carregamento	Δt (s)	IPA_t
Autoexcitável	38	0,05
Halógena	3	2,2
Infravermelha	4	1,5

Comparando os valores de IPA temporal em todos os casos, observa-se que o autoexcitável apresenta o menor valor entre eles.

Ao analisar os gráficos das figuras anteriores, nota-se que o teste com autoexcitável levou mais tempo para atingir a variação de temperatura máxima. O intervalo de tempo entre os pontos de temperatura máxima nas camadas de excitação e de interesse deve ser o menor possível. Este intervalo de tempo tem influência direta sobre as inspeções, pois é importante que as inspeções com shearografia sejam realizadas com boa qualidade de imagem e no menor tempo possível a fim de aumentar a produtividade da técnica em campo.

No caso do autoexcitável, uma explicação para este longo intervalo de tempo pode ser a proximidade da fibra de carbono à chapa metálica. Como a chapa de metal possui alta condutividade térmica, admite-se a hipótese de que a maior fração de energia presente no revestimento está sendo drenada por esse material. Dessa forma, a disposição das camadas pode estar influenciando de forma significativa os resultados dessa metodologia.

Tanto na análise do IPA padrão quanto do IPA temporal, o método mais eficiente do ponto de vista térmico para excitar o material na inspeção com shearografia é a lâmpada halógena. No entanto, deve-se lembrar que, ao aquecer um corpo de prova com uma lâmpada, o calor emitido por ela estará concentrado em uma área menor da superfície do CP. O contrário acontece com o autoexcitável, já que se considera que o calor é gerado de forma mais distribuída ao longo de toda a área do CP. Portanto, é importante um bom planejamento para que toda a área seja igualmente excitada no caso do carregamento externo com lâmpadas.

7 MODELAGEM NUMÉRICA DO CORPO DE PROVA

Neste trabalho, a modelagem em elementos finitos do corpo de prova foi feita com o objetivo de comparar a diferença no aquecimento do revestimento ao utilizar diferentes malhas de fibra de carbono. O software utilizado para a modelagem foi o ANSYS AIM. O modelo da chapa metálica foi o mesmo utilizado no CP real. A espessura da chapa é de 5mm. A Figura 42 apresenta o modelo e suas dimensões.

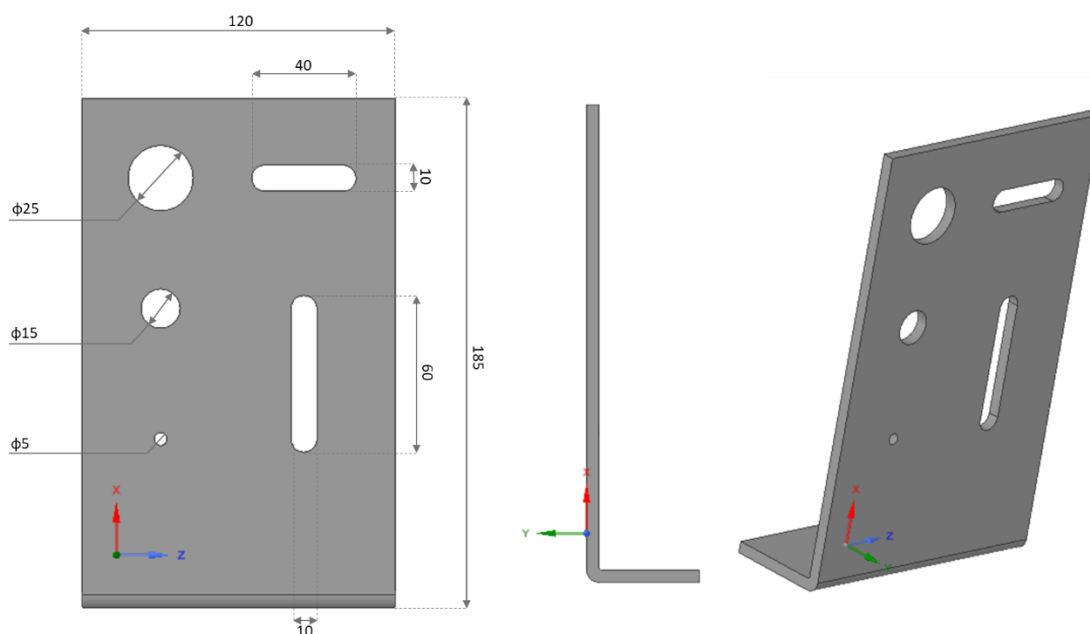


Figura 42 – Modelo 3D da chapa metálica criado no ANSYS AIM. Dimensões em milímetros.

A malha possui cerca de 21.254 nós, 6.352 elementos e o tipo de elemento utilizado é tetraédrico. A quantidade de elementos e nós foi determinada automaticamente para uma malha padrão através do software utilizado. O número de nós e elementos pode variar com o refino da malha de elementos finitos. Quanto mais refinada a malha, maior é o número de nós resultantes.

Como já mencionado, o material compósito utilizado nos revestimentos da chapa metálica é aplicado de forma manual, o que não garante uma distribuição perfeitamente uniforme de fibra e resina. Isso faz com que a espessura do revestimento apresente variações. Teoricamente, a espessura da fibra de vidro é de 0,40 mm e da fibra de carbono 0,26 mm. No entanto, para fins de simulação, a espessura da fibra de vidro foi adotada como 0,44 mm a fim de se considerar a camada da resina e chegar o mais próximo da espessura total obtida no CP real.

Os dados dos materiais utilizados nesta simulação estão resumidos na Tabela 13 e foram gerados automaticamente através da lista de materiais do ANSYS.

Tabela 13 - Valores adotados para as propriedades dos materiais.

Propriedade	Fibra de vidro	Fibra de carbono
Calor específico [J/(kg.K)]	835	794,96
Densidade [g/cm ³]	1,97	1,54
Condutividade térmica [W/(m.K)]	1,31	10,46
Coefficiente de expansão térmica [K ⁻¹]	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,2 \times 10^{-6}$
Resistividade elétrica [$\Omega \cdot \text{cm}$]	10^{14}	$7,5 \times 10^{-4}$
Condutividade elétrica [$\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$]	0	$1,3 \times 10^3$

No CP real, os filamentos da fibra de carbono foram divididos em conjuntos para que fosse possível a sua conexão em um circuito elétrico. Na simulação, foram adicionados diversos blocos longos para simular os conjuntos de filamentos e tentar chegar o mais próximo possível da situação real. A fibra de vidro e a resina foram simulados como um único bloco para facilitar a modelagem do CP. Os conjuntos de filamentos foram dispostos conforme a Figura 43 para a fibra bidirecional e Figura 44 para a unidirecional.

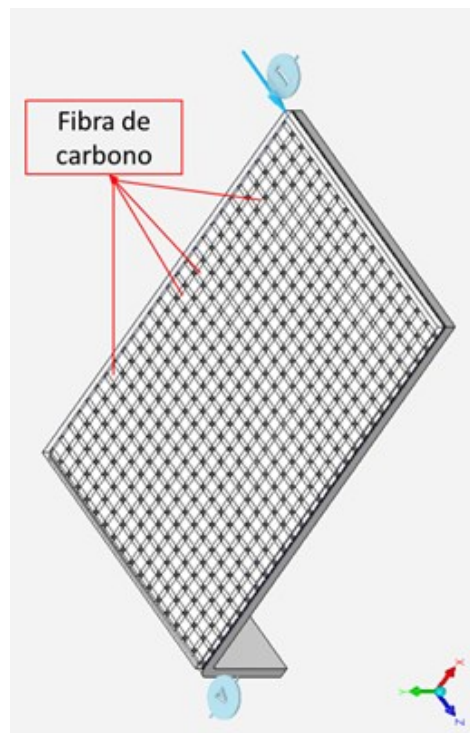


Figura 43 - Modelagem da fibra de carbono bidirecional no CP.

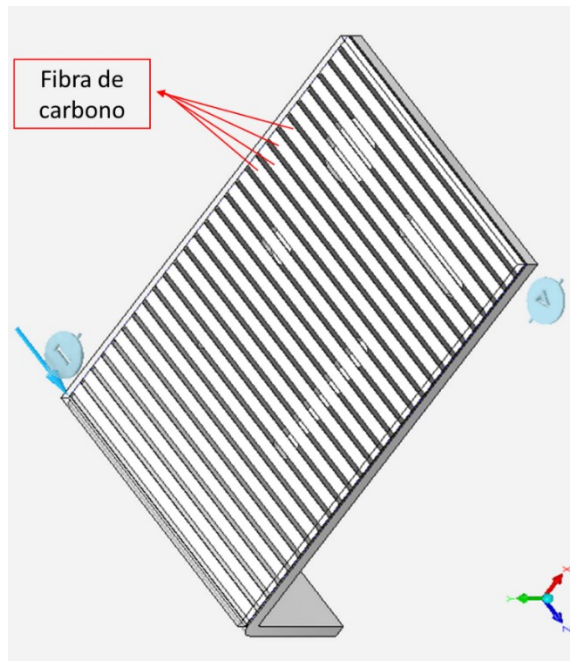


Figura 44 - Modelagem da fibra de carbono unidirecional (em branco) no CP.

Nas Figuras 43 e 44 também pode ser visualizado o circuito elétrico criado, representado por “I” e “V”. A corrente elétrica é aplicada em cada bloco de fibra de carbono (apenas as dispostas na horizontal, no caso da Figura 43) de forma a montar um circuito mais próximo às ligações elétricas realizadas no CP real. Em ambos os casos, o valor da corrente utilizada foi de 10 A e a temperatura inicial foi 22°C.

A Figura 45 apresenta a vista lateral de uma parte do CP modelado no ANSYS AIM. Nessa imagem é possível identificar as camadas de fibra de vidro e resina (modeladas como um único bloco), a chapa metálica e as fibras de carbono dispostas separadamente para simular seus filamentos.

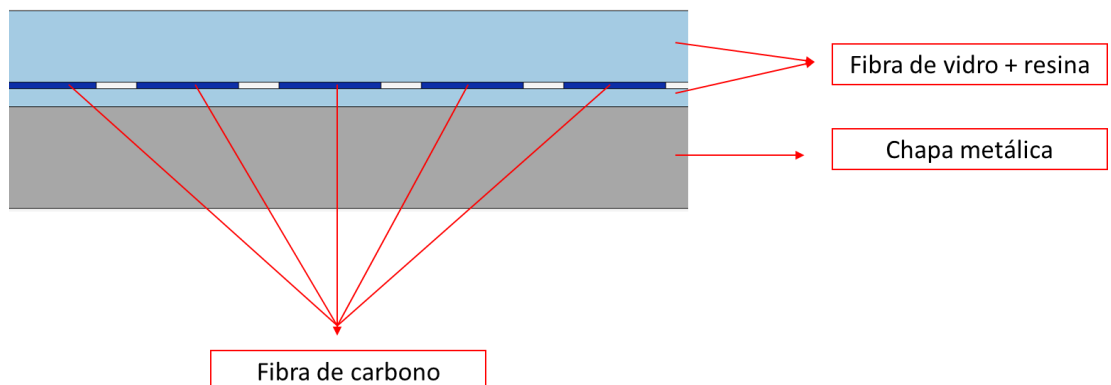


Figura 45 - Vista lateral de parte do CP modelado para identificação das camadas.

A Figura 46(a) mostra a vista frontal do CP modelado, ou seja, a camada de interesse do revestimento compósito. Nota-se concentrações de energia mais evidentes nas posições dos defeitos pré-fabricados na chapa metálica, principalmente na vista traseira do CP (Figura 46(b)). O defeito circular evidenciado na imagem abaixo apresenta uma variação de temperatura de aproximadamente $2,32^{\circ}\text{C}$ ao longo da espessura e $1,63^{\circ}\text{C}$ considerando a camada externa e a temperatura ambiente, o que é suficiente para sua detecção por meio da shearografia.

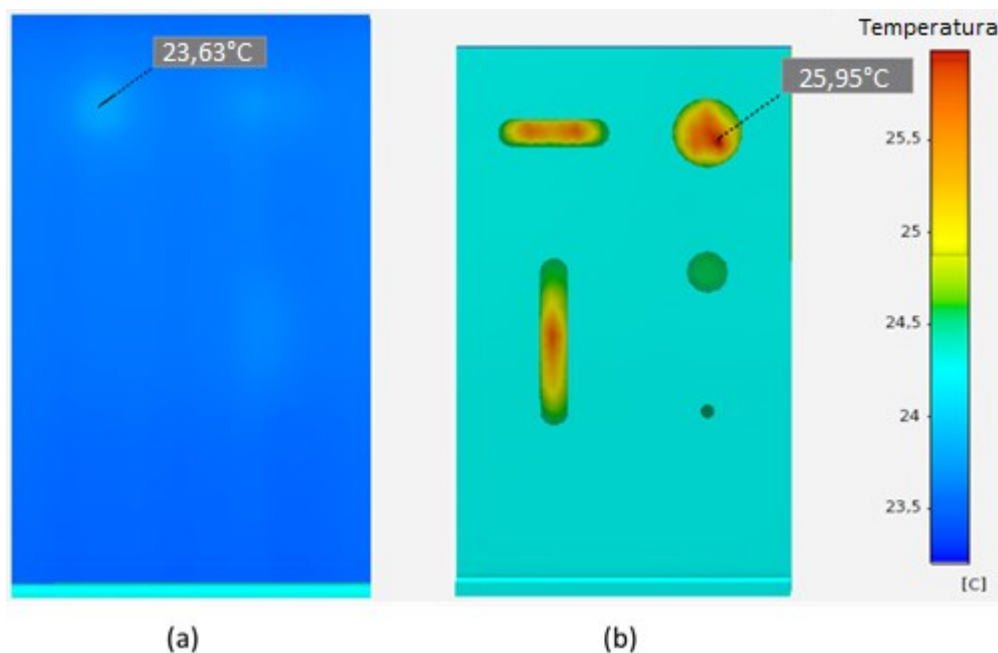


Figura 46 - Vista (a) frontal e (b) traseira do CP com trama bidirecional.

No caso do CP com trama unidirecional, a variação de temperatura apresentada foi muito maior. Conforme mostrado na Figura 47, a variação de temperatura no mesmo defeito evidenciado anteriormente chega a aproximadamente 5°C entre camadas e $3,63^{\circ}\text{C}$ em relação à temperatura ambiente, ultrapassando o limite máximo definido em campo. Grandes variações nas temperaturas podem prejudicar a visualização dos defeitos através da técnica shearografia, já que gera imagens com muitas franjas e/ou muito ruído. No entanto, o resultado é muito interessante, pois significa que a corrente pode ser diminuída para que a inspeção com shearografia possa ser realizada sem problemas.

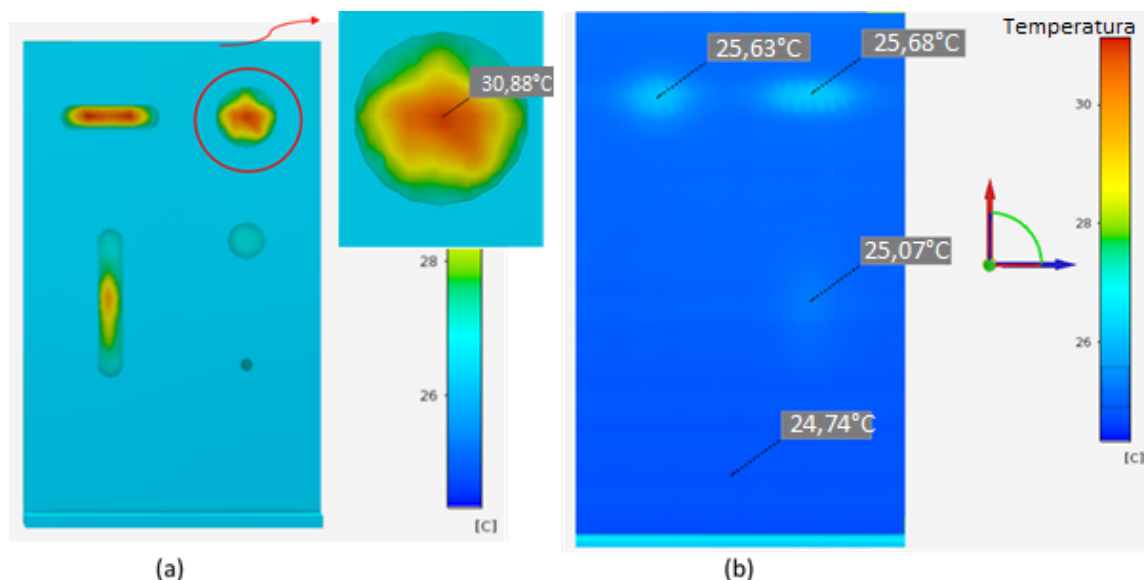


Figura 47 - Vista (a) traseira e (b) frontal do CP com trama unidirecional.

As simulações realizadas comprovam que a presença de defeitos nos compósitos gera pontos de concentração de calor, o que resulta em maior deformação na região dos defeitos e maior probabilidade de detecção durante a inspeção.

A Tabela 14 apresenta os resultados do cálculo do IPA para cada uma das tramas utilizadas. As temperaturas adotadas foram arredondadas para fins de simplificação do cálculo.

Tabela 14 - Resultados do IPA para cada tipo de malha utilizada.

	T camada de interesse [°C]	T camada de aquecimento [°C]	v^2	IPA
Malha unidirecional	24	30	1,20	25
Malha bidirecional	23	25	0,16	156

A trama bidirecional apresentou um valor de IPA 6 vezes maior que o da trama unidirecional. Apesar de as variações de temperaturas apresentadas pelo CP constituído por trama bidirecional serem menos significativas, essa configuração gera melhor distribuição térmica ao longo do revestimento.

Para complementar a ideia da distribuição de calor ao longo do material, a Figura 48 e a Figura 49 apresentam os vetores do fluxo de calor. Nota-se o aumento da intensidade desses

vetores nas localidades onde há a presença de defeitos em ambos os casos, conforme esperado. Assim como nas imagens anteriores, onde os defeitos com menores dimensões não sofreram tanta influência da variação de temperatura, observa-se que o fluxo de calor não é tão evidente nestas regiões. Note que a trama bidirecional tem um melhor resultado na distribuição do fluxo de calor para o maior defeito circular e, portanto, uma melhor distribuição do gradiente de deformações daquela região.

Na Figura 48 pode-se comprovar o aumento da intensidade desses vetores em virtude do alinhamento da fibra com a forma geométrica do defeito. Nota-se que o defeito tipo rasgo, quando na mesma direção da fibra de carbono (horizontal), apresenta maior fluxo de calor em comparação ao rasgo vertical. Isso acontece devido à direção de propagação da corrente elétrica no material e a forma como a energia é dissipada na região do defeito. Note que a passagem das fibras perpendicularmente ao defeito alongado tem influência direta sobre a concentração de calor na região do defeito (vertical).

Já na Figura 49, nota-se que o fluxo de calor é uniforme em todas as direções dos defeitos, já que as tramas estão conectadas entre si e a corrente se propaga nas direções horizontal e vertical. Isso pode ser mais bem visualizado no maior defeito circular. Em uma inspeção com shearografia, esse tipo de distribuição de calor gera uma imagem mais próxima ao formato do defeito. Em outros termos, com a trama bidirecional, o formato do defeito a partir da imagem de deformações será mais próximo do real, enquanto que com a trama unidirecional os erros de dimensionamento tendem a ser maiores. A incerteza no dimensionamento dos defeitos pode, em algumas aplicações, ser da ordem de milímetros e deve ser avaliada para cada caso. Certamente, para incertezas menores, o tipo de aquecimento influenciará no dimensionamento.

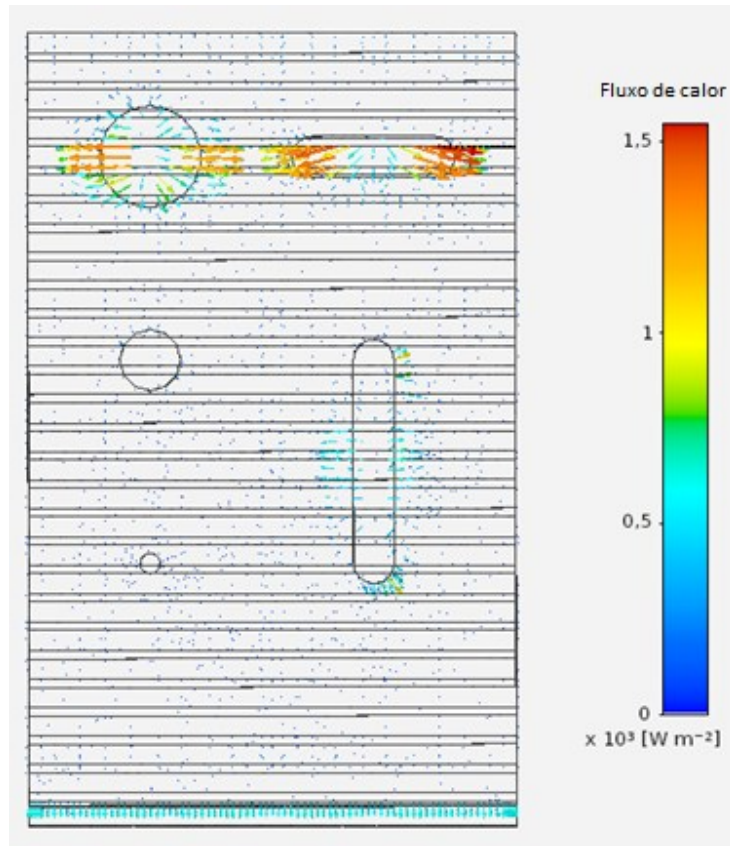


Figura 48 - Fluxo de calor no CP com trama unidirecional.

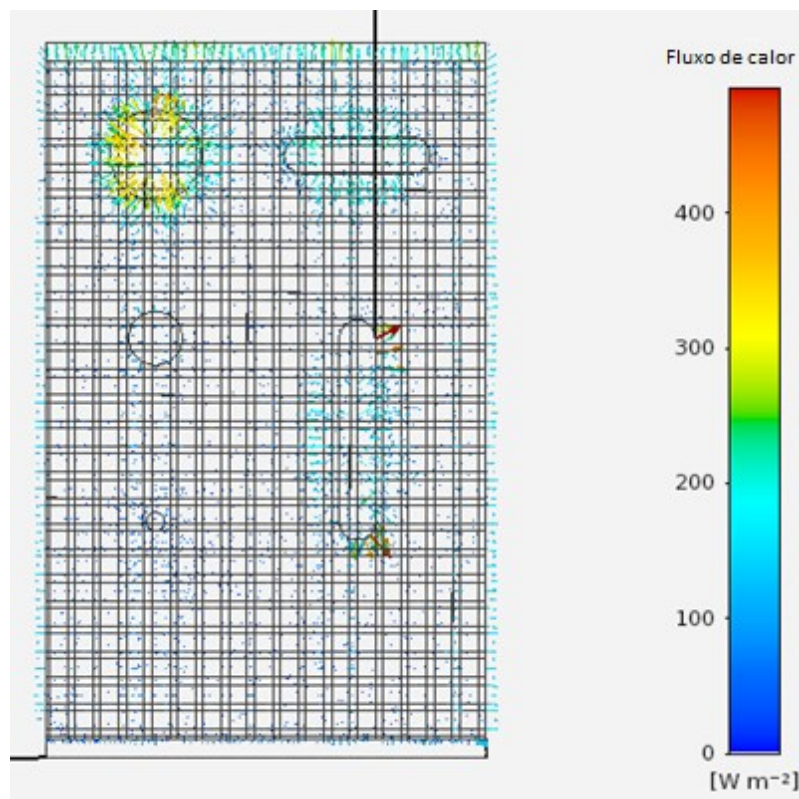


Figura 49 - Fluxo de calor no CP com trama bidirecional.

8 ANÁLISE EXPERIMENTAL COM SHEAROGRAFIA

Para a análise experimental com shearografia, uma bancada foi montada de acordo com a Figura 50, onde pode ser vista a disposição dos componentes do sistema de inspeção e do corpo de prova utilizado. Em (1) é apresentado o corpo de prova, em (2) a câmera, em (3) o interferômetro e em (4) tem-se o laser.

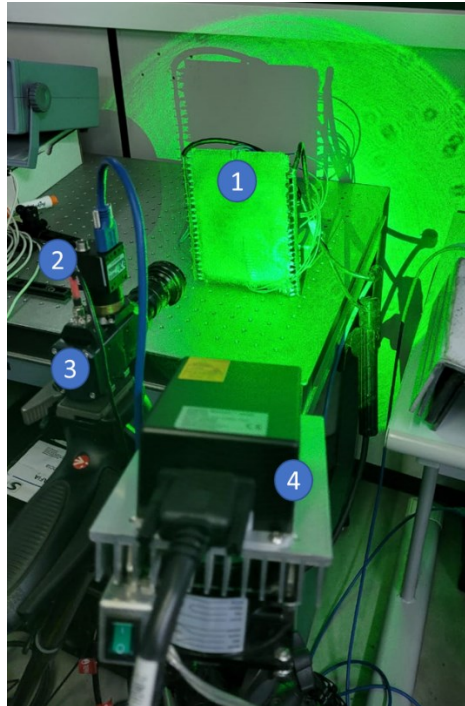


Figura 50 - Montagem da bancada de ensaios, sendo (1) o corpo de prova, (2) a câmera, (3) o interferômetro e (4) o laser.

Durante os testes de shearografia, foram adquiridas imagens com dois tipos de deslocamento lateral: vertical (SV) e horizontal (SH). As siglas SV e SH significam “Shear Horizontal” e “Shear Vertical” respectivamente, onde a palavra “*shear*” significa “deslocamento lateral”. O deslocamento lateral aplicado foi de 10 mm em ambas as direções. Durante o ensaio, a corrente de excitação do corpo de prova foi mantida em 10A (Figura 51) durante o tempo de aquecimento pré-estipulado para cada experimento.



Figura 51 - Indicação da corrente elétrica utilizada nos ensaios.

Esta bateria de experimentos foi realizada inicialmente com os tempos já utilizados anteriormente de 3, 4 e 5 segundos. Adicionalmente, foi realizado teste com 10 segundos de aquecimento.

Para o procedimento da inspeção com shearografia, primeiramente o corpo de prova foi aquecido pelo tempo pré-determinado para cada experimento e a imagem de referência foi obtida no momento que o CP atingiu sua maior temperatura. Em seguida, diferentes mapas de fase foram adquiridos durante o resfriamento do CP para a obtenção do mapa de diferença de fases com o resultado de cada experimento. A seguir, serão mostrados os melhores mapas obtidos durante os experimentos.

O experimento com tempo de aquecimento de 3 segundos é o que menos apresenta defeitos detectados. Neste caso, é possível visualizar apenas o defeito circular de 25mm (seta vermelha) e a região por onde passam os fios dos termopares instalados no interior do CP (seta azul) na Figura 52. Os defeitos de laminação causados pela introdução dos fios no interior do reparo são facilmente percebidos pela shearografia.

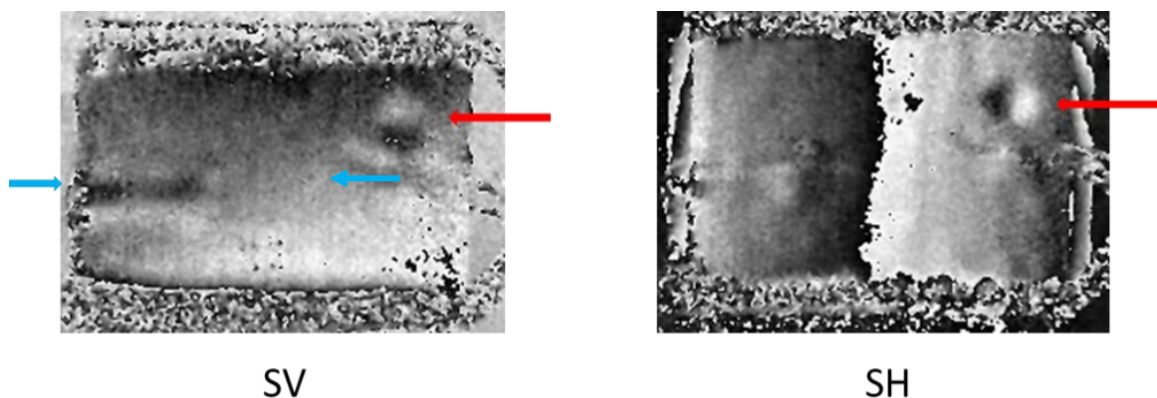


Figura 52 - Mapas de diferença de fase obtidos para o aquecimento de 3 segundos nas direções de sensibilidade Vertical (esquerda) e Horizontal (direita).

Aos 4 segundos de aquecimento, cujos resultados são mostrados na Figura 53, nota-se uma pequena alteração no mapa de diferença de fase. Além dos defeitos mencionados anteriormente, no deslocamento vertical (SV) já é possível perceber leve presença do defeito circular de 15mm de diâmetro (mostrado no *shear* horizontal - SH).

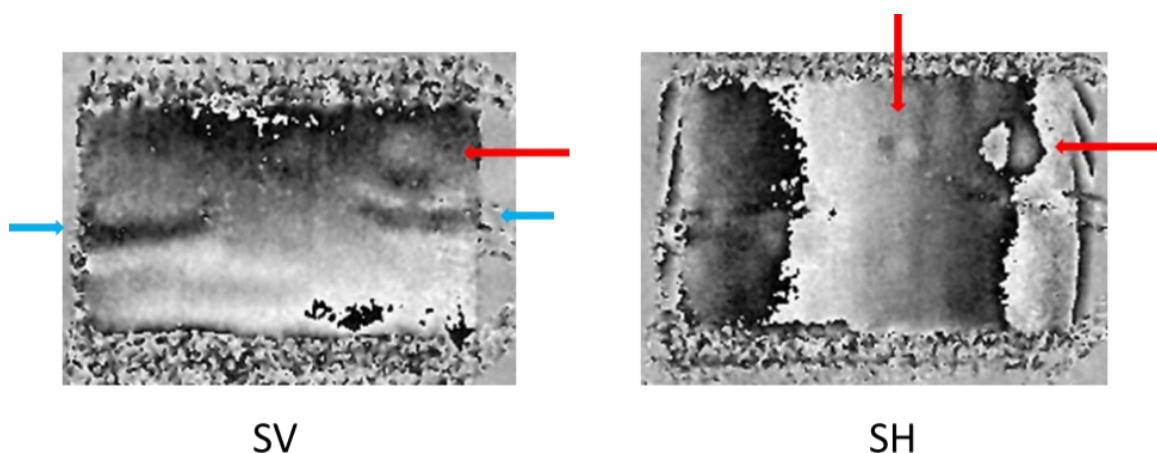


Figura 53 - Mapas de diferença de fase obtido para o aquecimento de 4 segundos nas direções de sensibilidade Vertical (esquerda) e Horizontal (direita).

No experimento com 5 segundos de aquecimento, conforme Figura 54, devido ao aumento de energia térmica aplicada, nota-se a presença mais marcante dos defeitos circulares de 25 e 15 milímetros e termopares nos deslocamentos vertical e horizontal. Note que, no mapa de deslocamento vertical, um dos defeitos alongados começa a ser evidenciado (elipse). Já no mapa horizontal, o defeito alongado não aparece, pois a direção de sensibilidade horizontal coincide com o maior eixo deste defeito. Isto acontece porque, no caso da inspeção de defeitos alongados como rasgos e trincas, a direção de maior sensibilidade para a shearografia é sempre aquela perpendicular ao maior eixo do defeito. Assim sendo, a SV é a direção de sensibilidade

perpendicular ao defeito alongado e, portanto, é a direção capaz de evidenciar o defeito alongado com maior clareza.

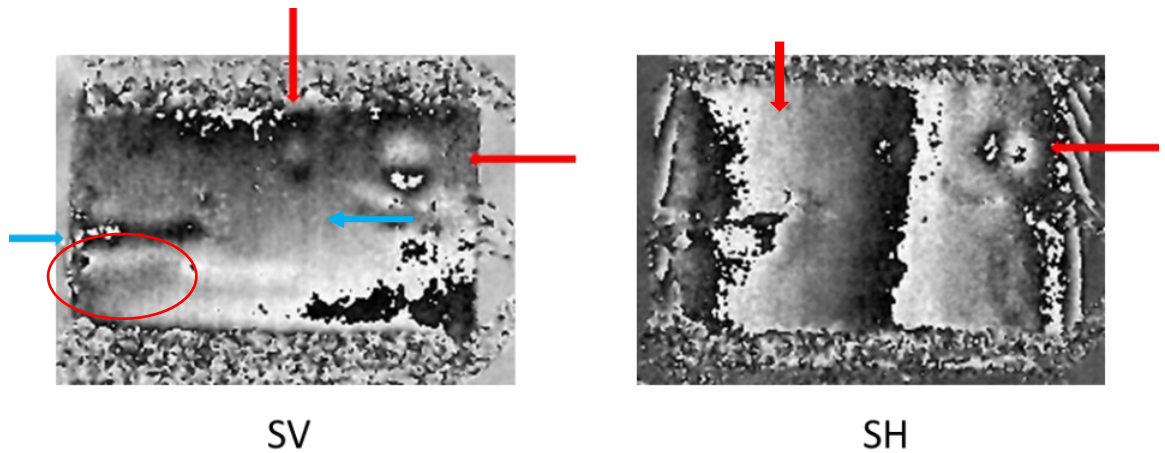


Figura 54 - Mapa de diferença de fase obtido para o aquecimento de 5 segundos.

A partir das imagens apresentadas, nota-se que ambas as direções e deslocamento apresentam bons níveis de contraste de franjas na imagem. Pode-se afirmar que quanto melhor o contraste, melhor é a detecção dos defeitos. A realização de ensaios com deslocamentos laterais em diferentes direções é uma técnica bastante aplicada nas inspeções em campo. Este procedimento é importante para a comprovação das falhas encontradas pelo inspetor, tendo em vista que certas formas de defeito têm sensibilidades dependentes do deslocamento lateral aplicado, como no caso das trincas e defeitos alongados mencionados anteriormente.

Adicionalmente, realizou-se um ensaio com tempo de aquecimento de 10 segundos. O objetivo de se aplicar tempos maiores de aquecimento para a inspeção com shearografia é verificar uma possível melhora na visualização dos defeitos. A Figura 55 mostra os mapas de shearografia para o tempo de aquecimento de 10 segundos. Apesar do tempo de aquecimento ter sido dobrado em relação ao último ensaio realizado, nota-se que não houve aumento do número de franjas nas regiões dos defeitos encontrados anteriormente.

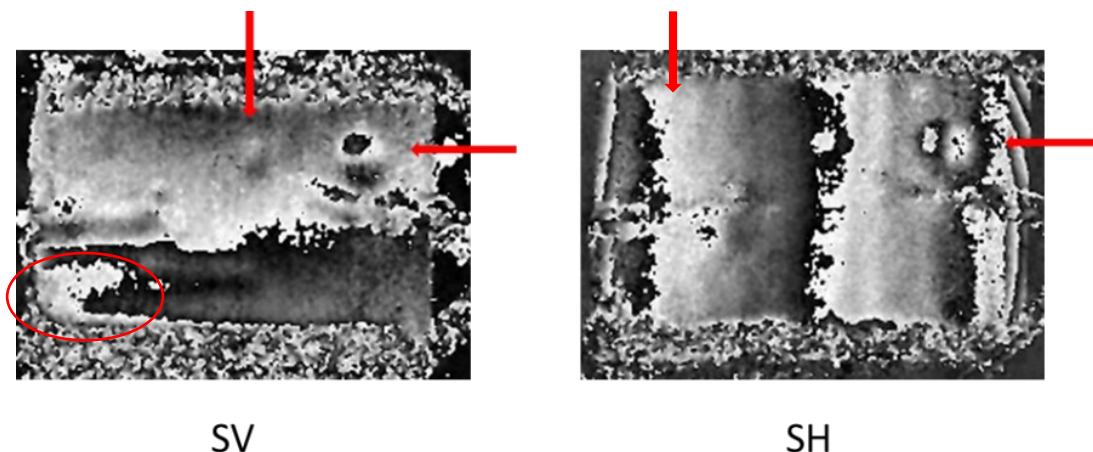


Figura 55 - Mapa de diferença de fase obtido para o aquecimento de 10 segundos.

Presume-se que, devido a perdas nas conexões elétricas realizadas manualmente entre os fios de alimentação e cada um dos feixes de fibra de carbono, a energia não esteja sendo transmitida de forma eficiente para o interior do reparo. A partir da Figura 56 pode-se notar o acúmulo de energia nas regiões onde estão dispostas as conexões elétricas.

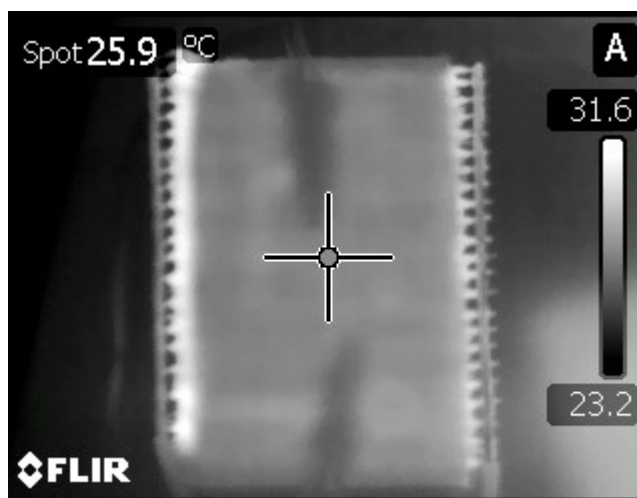


Figura 56 - Imagem termográfica do CP durante o Experimento 3.

O defeito circular de 5 mm e o defeito alongado de 40 mm de comprimento não foram detectados em nenhum dos experimentos. Para a detecção de defeitos menores, deve-se incrementar a relação pixel/mm (resolução) do sistema por meio da aproximação do módulo de visão à área inspecionada. Além disso, pode-se realizar testes comparativos, neste mesmo corpo de prova, utilizando outros métodos de carregamento térmico, como os métodos com lâmpada halógena e infravermelha, mencionados anteriormente neste trabalho. No entanto, os resultados obtidos nos ensaios com shearografia foram condizentes com a simulação da trama bidirecional

apresentada na seção anterior. Alguns testes não puderam ser realizados em função das severas restrições de deslocamento causadas pela Pandemia de COVID-19.

9 CONCLUSÕES

Visto que o tipo de carregamento utilizado nas inspeções com shearografia é determinante para o sucesso da técnica, este trabalho analisou diferentes tipos de carregamento térmico que podem ser utilizados em análises shearográficas: aplicação de corrente elétrica (reparo autoexcitável) e o uso de lâmpadas (halógena e infravermelha).

Um corpo de prova metálico e revestido com material compósito foi projetado e fabricado para os testes. No interior do corpo de prova foram inseridos diversos termopares com o objetivo de se analisar o fluxo de calor no interior do material.

Diferentes testes de aquecimento foram realizados no reparo autoexcitável e, após a normalização dos dados com base na temperatura ambiente, os resultados da análise com os termopares demonstram que a corrente e o tempo de aquecimento utilizados satisfazem as condições necessárias para provocar pequenas deformações na superfície do material inspecionado para que os defeitos possam ser detectados com shearografia, mantendo-se a característica não destrutiva do ensaio.

Com atenção voltada ao controle da temperatura de Transição Vítea (T_g) do compósito, estimou-se que o tempo de aquecimento poderia variar consideravelmente, chegando a até 166 segundos. Com base nos experimentos realizados, foi possível estimar diferentes tempos de aquecimento para diferentes espessuras de reparo compósito, de acordo com a variação de 4°C necessária às inspeções com shearografia.

A importância dessa análise está nas considerações a serem realizadas para o planejamento de inspeções em campo. Nessa situação, o operador terá como informações a temperatura externa (camada de interesse) e a T_g , o que levará à estimativa do tempo de aquecimento do material. Dessa forma, pode-se planejar diferentes abordagens para um procedimento de inspeção em campo.

Através do Índice de Profundidade de Aquecimento (IPA), os resultados mostraram que o uso das lâmpadas para o aquecimento do material apresentou uma melhor distribuição do calor ao longo da espessura do revestimento. A variação de tempo entre os picos de temperatura referentes aos termopares posicionados na camada de aquecimento e na camada de interesse no teste com autoexcitável foi 12,7 vezes maior que o tempo obtido no teste com lâmpada halógena, o qual apresentou o maior IPA temporal dentre os métodos analisados. Isso significa que o uso de lâmpada halógena neste caso foi mais rápido e eficiente para os experimentos realizados.

Apesar de não ser possível observar todos os defeitos presentes no CP, alguns defeitos ficaram bastante evidentes devido ao número de franjas visualizadas durante as análises com shearografia, como indicados pelas setas nas imagens. A fim de visualizar os menores defeitos, pode-se alterar a disposição das camadas ao construir o corpo de prova, levando-se a camada de aquecimento para uma posição mais afastada da chapa metálica e aumentar a relação pixel/mm do sistema. Ao aumentar a relação pixel/mm, aumenta-se a resolução da imagem e defeitos menores podem ser detectados.

Além disso, o revestimento autoexcitável pode ser construído com fibras de carbono dispostas de maneira bidirecional ou unidirecional. Ambos os materiais foram analisados através de uma simulação no software ANSYS AIM. O resultado mostrou que as fibras unidirecionais atingem maiores temperaturas, enquanto a distribuição de calor nas regiões com defeitos é mais uniforme ao utilizar a malha bidirecional. A partir da análise do IPA nas duas simulações, notou-se que a trama bidirecional apresentou um valor 6 vezes maior que a da unidirecional. Nesse sentido, a trama bidirecional mostrou-se mais eficiente para a distribuição de calor uniforme no revestimento. No entanto, cada construção tem seus pontos positivos e negativos, e seria importante realizar o teste prático com termopares e shearografia para avaliar a resposta do método.

De modo geral, os resultados alcançados foram satisfatórios, permitindo identificar claramente a presença de defeitos. As considerações iniciais dispostas na seção 5 foram atendidas, ou seja, as imagens obtidas através do revestimento autoexcitável possuem boa qualidade. As imagens obtidas são similares às imagens com carregamento por pressão por conta da estabilidade das franjas. A partir das diferentes metodologias abordadas tem-se um maior embasamento para a continuação dos estudos e otimização da shearografia na inspeção de estrutura reparadas com material compósito no setor do Petróleo e Gás.

Como sugestões para trabalhos futuros, cabe citar:

1. Testar a shearografia com outros métodos de carregamento térmico (lâmpadas, indução etc.) para comparar com os resultados obtidos com o autoexcitável;
2. Melhorar as conexões elétricas entre a fonte de corrente e a camada de excitação;
3. Avaliar a influência da posição da fibra de carbono no revestimento autoexcitável com relação à detectabilidade do defeito e recalcular o IPA;
4. Construir e testar comparativamente corpo de prova com fibra de carbono unidirecional;

5. Inserir mais de uma camada de excitação a fim de estudar a melhor transferência de calor e auxiliar na estimativa da profundidade dos defeitos detectados;
6. Otimizar a simulação térmica, podendo abordar também a deformação do material de acordo com a variação do tempo de aplicação da corrente elétrica;
7. Aplicar o aquecimento de forma modulada (pulsada ou harmônica) para comparação com o carregamento contínuo.

REFERÊNCIAS

- ABENDI. **Guia Abendi de END & Inspeção**. 2019.
- AGARWAL, B. D.; Broutman, L. J.; Chandrashekhara, K. **Analysis and Performance of Fiber Composites**. 3rd ed. Wiley, 2006.
- AHMED, T. J. *et al.* **Heat emitting layers for enhancing NDE of composite structures**. *Composites: Part A*, v. 39 (2008), p. 1025–1036.
- ALBERTAZZI, A. G. *et al.* **Detecção de Falhas de Adesão entre Mantas Poliméricas e Dutos usando Interferometria de Deslocamento Lateral**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 24, 2006, São Paulo. Anais... São Paulo, 2006.
- ALBERTAZZI, A.; WILLEMANN, D. P.; MENICONI, L. C. M. **Um sistema prático para identificação e localização de defeitos em revestimentos de materiais compósitos utilizando shearografia**. In: Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos - 186, 2007, Salvador. Anais... Salvador, 2007.
- AMARAL, N. C. C. **O método radiográfico e sua aplicação na indústria naval**. 2010. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Tecnologia em Construção Naval, Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 2563-70**: Specification for Classifying Visual Defects In Glass-Reinforced Laminates And Parts Made Therefrom, 1977.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 2563-94**: Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts, 2005.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **PCC-2**: Repair of Pressure Equipment and Piping, 2015.
- ASNT. **Nondestructive Testing Overview**. 3 ed. v. 10. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 15921**: Indústrias de petróleo e gás natural — Tubulação de compósito — Plástico reforçado com fibras de vidro (PRFV), Rio de Janeiro, 2011.
- BORTOLI, T. J. **Método Híbrido Usando Shearografia Para Determinar Raios de Furos Passantes em Tubos Metálicos Sob Reparos de Materiais Compósitos**. 2019. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CARVALHO, A. A. *et al.* **Inspeção submarina: perspectivas e avanços**. *Rev. Tecnol*, v. 30, n. 2, p. 198-209, Fortaleza, 2009.
- CERTI. Disponível em: < <https://certi.org.br/blog/tomografia-industrial/>>. Acesso em: 10 nov 2021.
- CHAWLA, K. K. **Composite Materials: Science and Engineering**. 3rd ed. Springer, 2013.
- CHIEN, A. *et al.* **Electrical conductivity and Joule heating of polyacrylonitrile/carbono nanotube composite fibers**. *Polymer*, v. 55, p. 6896-6905. 2014.

- CHUNG, D. D. L. **Thermal analysis of carbon fiber polymer-matrix composites by electrical resistance measurement.** *Thermochimica Acta*, v. 364, p. 121-132. 2000.
- COSTA, F. M. **Construção, reparo, conservação, manutenção e navegação em embarcações.** Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas: São Paulo, 2012.
- DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials.** 2 ed. New York: Oxford University Press, 2006.
- FRANCIS, D. **Non-destructive evaluation (NDE) of composites: introduction to shearography.** *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*, pp. 56–83. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013.
- FRANCIS, D.; TATAM, R.P.; GROVES, R.M. **Shearography technology and applications: A review.** *Measurement science and technology*, v. 21 (10), 2010.
- GAVISK, J. K. **Optical Metrology.** 3 ed. England: John Wiley & Sons, 2002.
- GAY, D.; HOA, V.S.; TSAI, W.S. **Composite materials, design e Applications.** London: CRC PRESS, 2003.
- GOODMAN, J. W. **Some fundamental properties of speckle.** *Journal of The Optical Society of America*, p. 1145-1150, 1976.
- HECHT, E. **Optics.** 4th ed. Pearson Education, 2008.
- HELERBROCK, R. **"Efeito Joule";** Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilestola.uol.com.br/fisica/efeito-joule.htm>. Acesso em 27 de outubro de 2021.
- HUNG, Y.Y.; HO, H.P. Shearography: An optical measurement technique and applications. *Materials Science and Engineering. A Review Journal*, n.49, p. 61–87, 2005.
- JONES, R. M. **Mechanics of composite Materials.** Philadelphia: Taylor & Francis, 1999.
- LEMOES, R. P. **Análise da aplicação de carregamento térmico na inspeção por shearografia em corpo de prova metálico revestido por material compósito.** 2018. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade do Estado de Santa Catarina, Balneário Camboriú, 2018.
- LIENHARD, J. H., IV; LIENHARD, J. H., V (2019). **A Heat Transfer Textbook.** 5 ed. Mineola, NY: Dover Publications, p. 419–420.
- LU, S. *et al.* **Joule heating: A significant factor in electrocaloric effect.** *Ceramics International*, v. 45 (2019), p. 16992–16998.
- MALACARA, D. **Optical Shop Testing.** 3 ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2007.
- MALDAGUE, X. **Introduction to NDT by Active Infrared Thermography.** *Materials Evaluation*, v. 60 (9), 2002.
- MALLICK, P.K. **Fiber Reinforced Composites Introducing: Materials, Manufacturing, and Design.** 3. ed. Michigan: CRC Press, 2007.
- MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia.** São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2011.

NARDELLI, V. C. **Melhoria do Desempenho Metrológico da Tomografia Computadorizada por Raios X por Meio da Seleção Sistemática dos Parâmetros de Configuração**. 2012. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

NEWMAN, J. **Shearography Testing of Composites**. Norristown: Laser Technology Inc, 2018.

NOGUEIRA, J. U. **Desenvolvimento de Compósitos Autoexcitáveis para Inspeção por Shearografia**. Relatório de Estágio Obrigatório. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

PAES, A. S. **Proposta de procedimento para estimativa do tamanho de defeitos em tubos de aço perfurados e revestidos com materiais compósitos utilizando shearografia**. 2013. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

PETROBRAS. **N-2727**: Norma Interna Petrobras, Acesso Público. – Manutenção de Gasodutos e Oleodutos Submarinos, Rio de Janeiro, 2005.

REDDY, J.N. **Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis**. 2nd ed. CRC Press, 1997.

REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. **Compósitos Estruturais: Tecnologia e Prática**. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2011.

RIZZO, C. M. **Inspection of aged ships and offshore structures**. In: PAIK, J. K.; MELCHERS, R. E. Condition Assessment of Aged Ships and Offshore Structures. Gênova: Woodhead Publishing, 2010. cap. 13.

RIZZO, C. M. **Maintenance of aged ships and offshore structures**. In: PAIK, J. K.; MELCHERS, R. E. Condition Assessment of Aged Ships and Offshore Structures. Gênova: Woodhead Publishing, 2010. cap. 15.

Rust Engenharia. Disponível em: <<http://www.rust.com.br/galeria/petroleo-gas>>. Acesso em: 10 set 2020.

SCHÖNTAG, J.; WILLEMANN, D. P.; ALBERTAZZI, A. **Depth Assessment of Defects in Composite Plates Combining Shearography and Vibration Excitation**. Speckle 2010: Optical Metrology, v. 7387, n. 1Z, p.1-9, 2010.

SOUZA, J. P. F. M. **Inspeção de defeitos em revestimentos de materiais compósitos aplicados em tanques metálicos utilizando shearografia**. 2012. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SOUZA, R. M. D. **Sistemas de shearografia para inspeção de grandes áreas verticais revestidas por materiais compósitos**. 2015. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SPEM. Disponível em: <<http://www.speminspecoes.com.br/ultrassom-em-vasos-sob-pressao.php>>. Acesso em: 29 out 2021.

STARTEC. Disponível em: < <http://www.endstartec.com.br/raio-x-industrial>>. Acesso em: 29 out 2021.

STAUB, D. F. **Caracterização de Defeitos por Excitação Dinâmica e Shearografia com Iluminação Pulsada**. 2018. 281 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

STEINCHEN, W.; YANG, L. **Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry**. SPIE Press, Bellingham, 2003.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2004.

VAUGHAN, M.P. **Optics**. Cork, Irlanda, 2014.

VIOTTI, M. R.; ALBERTAZZI JR., A. G. **Robust Speckle Metrology**. Bellingham: SPIE, 2014.

VONDER. Disponível em:
<https://www.vonder.com.br/produto/inversor_para_solda_com_eletrodo_e_tig_com_display_digital_bivolt_riv_136_vonder/23955>. Acesso em: 10 nov 2021.

WILLEMANN, D. P. *et al.* **Deteção de defeitos em juntas adesivadas de tubos compósitos com shearografia, termografia e ultra-som**. CONAEND & IEV - 071, 2008, São Paulo. Anais... São Paulo, 2008.

WILLEMANN, D. P. **Desenvolvimento de uma Roseta Óptica para medição de tensões e deformações utilizando Holografia Eletrônica**. 117 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2002.

WORKMAN, G. L.; MOORE, P. O. **Non-destructive testing handbook: Non-destructive testing overview**. 3rd ed. v. 10. American Society for Nondestructive Testing, 2012.

ZHANWEI LIU *et al.* **NDT capability of digital shearography for different materials**. Optics and Lasers in Engineering, v. 49 (12), p. 1462-1469, 2011.