



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

Gabriel Vieira de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPO DE SISTEMA DE
SHEAROGRAFIA COMPACTO E DE ELEVADA PRODUTIVIDADE**

Florianópolis
2023

Gabriel Vieira de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPO DE SISTEMA DE
SHEAROGRAFIA COMPACTO E DE ELEVADA PRODUTIVIDADE**

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

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

Coorientador: Prof. Daniel Pedro Willemann, Dott. Ing.

Florianópolis

2023

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

Oliveira, Gabriel Vieira de
Desenvolvimento e avaliação de protótipo de sistema de
shearografia compacto e de elevada produtividade / Gabriel
Vieira de Oliveira ; orientador, Armando Albertazzi
Gonçalves Junior, coorientador, Daniel Pedro Willemann,
2023.
102 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Shearografia. 3. Material
compósito. 4. Ensaio não destrutivo. 5. Desenvolvimento de
produto. I. Gonçalves Junior, Armando Albertazzi . II.
Willemann, Daniel Pedro . III. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

Gabriel Vieira de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPO DE SISTEMA DE
SHEAROGRAFIA COMPACTO E DE ELEVADA PRODUTIVIDADE**

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

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

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

Prof. Mauro Eduardo Benedet, Dr. Eng.
Universidade do Extremo Sul Catarinense

Sérgio 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.

Prof. Henrique Simas, Dr. Eng.
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

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

Florianópolis, 2023

Aos meus pais.

Ao desenvolvimento científico do Brasil.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus por possibilitar que eu aqui chegasse.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por oferecer ensino público e de qualidade em benefício da sociedade, e ao departamento de engenharia mecânica, por disponibilizar um corpo docente de excelência, que transmitiu o conhecimento necessário para a realização deste trabalho.

Ao CNPq, que através da concessão de bolsas aos pesquisadores, torna possível a execução deste e de tantos outros trabalhos de pesquisa no Brasil.

Ao meu orientador, Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, por ser um exemplo como profissional e como pessoa. Seus valiosos conselhos foram fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao meu coorientador, Prof. Daniel Pedro Willemann, por sua plena disponibilidade para auxiliar no desenvolvimento deste trabalho, contribuindo sempre com seus amplos conhecimentos e experiências.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Mauro Eduardo Benedet, Eng. Sérgio Damasceno Soares, e Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, pela disponibilidade em participar e contribuir para este trabalho.

Ao Instituto Senai de Inovação em Sistemas Embarcados (ISI-SE), por auxiliar no desenvolvimento deste trabalho, tanto no fornecimento de infraestrutura quanto nas contribuições dos meus colegas pesquisadores.

À BAWSF Inspeções e Engenharia por sua experiência em shearografia e por disponibilizar seu quadro técnico para contribuir com o desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos e membros do Laboratório de Metrologia e Automatização pela convivência e ajuda durante a execução deste trabalho.

Aos meus familiares, em especial meus pais, Jaques Douglas de Oliveira e Fabiana Vieira de Oliveira, por sempre permitirem e incentivarem a minha educação e o meu desenvolvimento, tanto pessoal quanto profissional.

E, por fim, a todos aqueles que passaram pela minha vida nesses anos e, de alguma forma, influenciaram este ciclo.

"The greatest enemy of knowledge is not ignorance; it is the illusion of knowledge."

Stephen Hawking

RESUMO

O desenvolvimento e a expansão da indústria de petróleo e gás têm gerado uma crescente demanda por infraestrutura de armazenamento e de transportes dutoviários. Essas estruturas metálicas comumente estão localizadas em ambientes hostis e expostas a agentes agressivos que geram danos na estrutura, podendo se manifestar na forma de corrosão, erosão ou trinca, e acarretam perda de espessura de parede e de rigidez estrutural, aumentando o risco de acidentes. A aplicação de materiais compósitos (MC) como revestimento para a prevenção da corrosão, e para o reparo de tubulações danificadas, tem se mostrado uma solução econômica e tecnicamente vantajosa. Entretanto, faz-se necessário avaliar a integridade desses revestimentos periodicamente, a fim de averiguar a existência de eventuais defeitos na estrutura, oriundos do processo de aplicação ou de fatores externos. A shearografia, uma técnica de ensaio não destrutivo baseada na interferometria, já se mostrou uma forma eficaz de inspeção de reparos compósitos, porém o aumento da demanda por inspeções gera a necessidade de otimização dos sistemas atuais, aumentando sua produtividade e eficiência. Além disso, muitos dos locais que necessitam de inspeção em campo encontram-se em espaços restritos, gerando dificuldades de posicionamento e fixação dos sistemas atuais de shearografia. Por isso, para auxiliar no desenvolvimento tecnológico dessa técnica, neste trabalho foi projetado, construído e avaliado um protótipo de um sistema compacto de shearografia que permite a realização de inspeções em tubulações revestidas com material compósito de forma simples e eficaz, sem interromper nem alterar a operação na planta. Com dimensões reduzidas e simples sistema de fixação, o protótipo desenvolvido apresenta grandes vantagens para a aplicação da shearografia em campo.

Palavras-chave: Shearografia, Material compósito, Ensaio não destrutivo, Desenvolvimento de produto.

ABSTRACT

The development and expansion of the oil and gas industry have generated a growing demand for storage and transportation infrastructure. These metallic structures are commonly located in hostile environments and exposed to aggressive agents that can cause structural damage, manifesting as corrosion, erosion, or cracking, leading to wall thickness and structural stiffness loss, increasing the risk of accidents. The application of composite materials as a coating to prevent corrosion, and repair damaged pipelines, has proven to be an economically and technically advantageous solution. However, it is necessary to periodically assess the integrity of these coatings to investigate the existence of any defects in the structure arising from the application process or external factors. Shearography, a non-destructive testing technique based on interferometry, has already proven to be an effective technique of inspecting composite repairs. However, the increasing demand for inspections requests the optimization of current systems, increasing productivity efficiency. Furthermore, many of the locations that require field inspection are in restricted spaces, creating difficulties in positioning and fixing current shearography systems. Thus, to assist in the technological development of this technique, this work designed, built and evaluated a prototype of a compact shearography system that allows for simple and effective inspections of pipelines coated with composite material, without interrupting or altering plant operation. With reduced dimensions and a simple fixing system, the developed prototype presents great advantages for the application of shearography in the field.

Keywords: Shearography, Composite materials, Non-destructive testing, Product design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Elementos principais de um material compósito [13].....	19
Figura 2 - Aplicação de revestimento de MC em tubulação <i>offshore</i> [8].....	21
Figura 3 - Ilustração de defeitos encontrados em materiais compósitos [6].	23
Figura 4 - Inspeção com sistema de ultrassom pulso-eco. Adaptado de [19]. Nesta figura, são mostrados o transdutor de ultrassom, a peça com defeito e o sinal na tela do dispositivo registrador.	25
Figura 5 - Inspeção com sistema de ultrassom por transparência. Adaptado de [19]. Nesta figura são mostrados o emissor e receptor de ultrassom, a peça com defeito e o sinal na tela do dispositivo registrador.	25
Figura 6 - Esquema de método de inspeção por radiografia de raios-X [21].....	27
Figura 7 - Princípio de formação de uma imagem tomográfica [22].	28
Figura 8 - Resultado de tomografia computadorizada [23].....	28
Figura 9 - Esquema do processo de inspeção termográfica [20].....	29
Figura 10 - Esquema de inspeção termográfica por transmissão e reflexão [20].....	30
Figura 11 - Formação do <i>speckle</i> [28].....	31
Figura 12 - Exemplo de padrão <i>speckle</i> [5].....	32
Figura 13 - Representação da formação do <i>speckle</i> : a) Objetivo no espaço; b) Subjetivo em um sistema óptico [6].	32
Figura 14 - Imagem com deslocamento lateral e zona de interferência [27].	34
Figura 15 - Interferômetro de Michelson adaptado [8].	35
Figura 16 - Deslocamento lateral utilizado prisma [24].....	35
Figura 17 – Mapas de diferença de fase com as franjas de shearografia para deslocamento lateral em x e em y. Adaptado de [27].....	36
Figura 18 - a) Campo de deslocamento da superfície; b) Gradiente do campo de deslocamentos da superfície $\partial w/\partial x$; c) Gradiente do campo de deslocamentos da superfície $\partial w/\partial y$. Adaptado de [6].	37
Figura 19 - Processo para obtenção do mapa das diferenças de fases, utilizando o algoritmo de quatro passos [5].	39
Figura 20 - Sistema de shearografia 4f [5].	39
Figura 21 - Simulação de franjas de frequência portadora paralelas e regularmente espaçadas [27].....	40

Figura 22 - Simulação de imagem de interferência com franjas portadoras em uma superfície com defeito [27].....	41
Figura 23 - Simulação da diferença dos mapas de fases, sem e com defeitos [27].....	42
Figura 24 - Sistema de shearografia One-Shot. Adaptado de [28].....	43
Figura 25 - Esquema ilustrativo do efeito do carregamento em shearografia [6].	44
Figura 26 - Esquema ilustrativo de aplicação de tração como carregamento sobre uma peça revestida com material compósito. Adaptado de [14].....	45
Figura 27 - Esquema ilustrativo da utilização de câmara de vácuo como módulo de carregamento sobre um revestimento de material compósito. Adaptado de [14].	45
Figura 28 - Esquema ilustrativo da aplicação de alto-falante como módulo de carregamento sobre uma peça revestida com material compósito. Exemplo de inspeção sem contato. Adaptado de [14].....	46
Figura 29 - Esquema ilustrativo da aplicação de carregamento térmico com a irradiação de uma lâmpada sobre um revestimento de material compósito. Adaptado de [14].	47
Figura 30 - Esquema ilustrativo da aplicação de carregamento térmico com a indução eletromagnética de uma bobina sobre um revestimento de material compósito.	48
Figura 31 - Inspeção de tubulação em ambiente de difícil acesso [34].....	49
Figura 32 - Sequência do processo de desenvolvimento de produtos do modelo PRODIP. Adaptado de [35].....	50
Figura 33 - Sistema de shearografia Steinbichler [36].	50
Figura 34 - Sistema de shearografia Dantec [37].	51
Figura 35 - Exemplo dos módulos de um sistema de shearografia atual. Adaptado de [38].	54
Figura 36 - Esboço da concepção gerada.	57
Figura 37 - Ilustração da corrente parasita (<i>Eddy currents</i>) induzida através da variação das linhas do campo magnético que são produzidas pela corrente alternada aplicada ao solenoide. Adaptado de [41].....	58
Figura 38 - Bobina de indução do fogão.	59
Figura 39 – Imagem termográfica da bobina de indução aquecendo um CP.....	60
Figura 40 - Estrutura de suporte e encapsulamento da bobina de indução.....	61
Figura 41 - Laser utilizado [44].....	61
Figura 42 - Sistema de iluminação laser. (1) Suporte da lente de expansão frontal; (2) Carcaça externa; (3) Excêntrico externo; (4) Excêntrico interno; (5) Suporte do conector laser; (6) Barra de fixação [5].....	62

Figura 43 - Câmera utilizada [45].....	63
Figura 44 - Configuração óptica do cabeçote de shearografia one-shot [6].....	64
Figura 45 - Montagem experimental do cabeçote one-shot.	64
Figura 46 - Teste preliminar do sistema em uma placa metálica revestida com MC.....	65
Figura 47 - Resultado da inspeção na placa revestida com MC.....	66
Figura 48 - Teste preliminar do sistema em um vaso de pressão revestido com MC. ...	67
Figura 49 - Resultado da inspeção no vaso de pressão revestido com MC.....	67
Figura 50 - Teste preliminar do sistema em um tubo metálico revestido com MC.	68
Figura 51- Resultado da inspeção no tubo metálico revestido com MC.	69
Figura 52 - CAD da montagem experimental dos testes dos princípios.	70
Figura 53 - Sistema de apoio em 3 pontos da estrutura sobre o CP.	71
Figura 54 - CAD da estrutura do módulo de fixação.	72
Figura 55 - Modelo 3D do sistema completo.	73
Figura 56 - Processo de impressão da estrutura do protótipo.....	74
Figura 57 - Estrutura do protótipo impressa.....	75
Figura 58 - Montagem experimental do protótipo.....	76
Figura 59 - Resultado da inspeção de shearografia do protótipo.	77
Figura 60 - Inspeção com sistema de shearografia de referência.....	78
Figura 61 - Resultado da inspeção com sistema de referência.....	78
Figura 62 - Protótipo em inspeção com fixação manual.	79
Figura 63 - Resultado não satisfatório da inspeção com fixação manual.....	80
Figura 64 - (a) Sistema de apoio por parafusos; (b) Novo sistema de apoio com bases magnéticas.	81
Figura 65 - Fixação do sistema no corpo de provas através de bases magnéticas.	82
Figura 66 - Resultado de inspeção de shearografia com fixação magnética.	82
Figura 67 - Tubulação em curva utilizada nos testes do sistema.....	84
Figura 68 - Protótipo em inspeção com fixação por elásticos.	84
Figura 69 - Resultado da inspeção na tubulação em curva.....	85
Figura 70 - Sistema com encapsulamento da região de teste.	86
Figura 71 - Resultado da inspeção do sistema com encapsulamento.....	86
Figura 72 - Sistema em configuração final de inspeção.....	87
Figura 73 - Resultado da inspeção na tubulação em curva com o sistema em configuração final, sob iluminação direta.....	88

Figura 74 - Sistema de shearografia utilizado como referência para a análise comparativa. 90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de defeitos em materiais compósitos [16].....	22
Tabela 2 - Requisitos de projeto.....	51
Tabela 3 - Matriz morfológica.....	54
Tabela 4 - Concepções geradas.	55
Tabela 5 - Matriz de decisão.....	56
Tabela 6 - Etapas de funcionamento.....	57
Tabela 7 - Estimativa comparativa da produtividade do sistema.	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD - Projeto assistido por computador (*Computer Aided Design*).

END - Ensaio Não Destrutivo.

LABMETRO - Laboratório de Metrologia e Automação.

P&G - Petróleo e Gás.

PRFC - Plástico Reforçado com Fibra de Carbono.

PRFV - Plástico Reforçado com Fibra de Vidro.

SHIC - Shearografia para Inspeção de Compósitos.

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina.

CP - Corpo de Provas.

MC - Material Compósito.

UTS - Unidade de Tratamento de Sinais.

ESPI - *Electronic Speckle Pattern Interferometry*.

DPSS - *Diode-Pumped Solid-State*.

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Comprimento de onda
ξ	Rugosidade
z_i	Distância entre íris e o plano imagem
z_o	Distância entre íris e o objeto
w	Deslocamento fora do plano
x, y, z	Direções cartesianas
a_0	Amplitude da onda
ω	Frequência angular
Φ	Ângulo de fase
I_f	Intensidade de fundo da imagem
I_m	Intensidade de modulação.
δ_x	Deslocamento lateral
δ_θ	Deslocamento angular
$\Delta\phi_p$	Fase das franjas portadoras
$\Delta\phi_w$	Fase dos defeitos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo Geral	16
1.2	Objetivos Específicos.....	16
1.3	Estrutura do trabalho	17
2	MATERIAIS COMPÓSITOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS ..	18
2.1	Materiais compósitos.....	18
2.2	Aplicações na indústria de petróleo e gás.....	20
2.3	Defeitos em materiais compósitos	21
3	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS APLICÁVEIS A MATERIAIS	
	COMPÓSITOS	24
3.1	Ultrassom.....	24
3.2	Radiografia.....	26
3.3	Tomografia computadorizada	27
3.4	Termografia infravermelha	29
4	SHEAROGRAFIA	31
4.1	Princípios fundamentais	31
4.1.1	Efeito <i>speckle</i>	31
4.1.2	Interferência	33
4.2	Geração de franjas e detecção de defeitos	33
4.3	Determinação de fase.....	37
4.3.1	Determinação de fase por métodos temporais	37
4.3.2	Determinação de fase por métodos espaciais	40
4.4	Formas de carregamento	43
4.4.1	Carregamento mecânico.....	44
4.4.2	Carregamento térmico	46
5	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PROPOSTO.....	49
5.1	Projeto informacional.....	50
5.2	Projeto conceitual	53
5.3	Projeto preliminar	58
5.3.1	Módulo de carregamento	58

5.3.2	Módulo de iluminação	61
5.3.3	Módulo de aquisição de imagens	63
5.3.4	Testes preliminares	65
5.3.5	Módulo de fixação	69
5.4	Projeto detalhado (Validação e Resultados)	73
5.4.1	Fabricação e testes do protótipo	74
5.4.2	Melhorias do sistema	80
5.4.3	Análise do ganho de produtividade do sistema	89
6	CONCLUSÕES.....	92
6.1	Análise geral do trabalho	92
6.2	Sugestões de trabalhos futuros	94
	REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a indústria de petróleo e gás (P&G) passou por um grande processo de expansão e desenvolvimento no Brasil, sendo que a descoberta de grandes reservas *offshore* do Pré-Sal acentuou ainda mais esse processo. Para acompanhar esse crescimento, toda a infraestrutura de transporte e armazenamento precisou ser expandida, sendo que atualmente a malha dutoviária do Brasil é superior a 45 mil quilômetros [1].

Por questões econômicas e ambientais, a segurança e confiabilidade das instalações são prioridade na indústria de P&G. Entretanto, apesar de todos os esforços em preservar as estruturas, elas tendem a se deteriorar com o tempo, principalmente as que estão expostas a ambientes agressivos e a agentes corrosivos, demandando elevados investimentos em manutenção [2][3][4].

A corrosão é, ainda hoje, um dos principais problemas enfrentados pela indústria, especialmente nas estruturas localizadas próximo à costa ou em estações *offshore*, devido à presença de água salina. Caso não tratada, a corrosão propaga-se pelos materiais metálicos, ocasionando defeitos como trincas e perda da espessura de parede, que podem evoluir e causar falhas operacionais, vazamentos, e até o colapso da estrutura [3][5].

Para combater a corrosão existem diversas técnicas, sendo que algumas apresentam custos mais elevados, como uso de ligas com maior teor de cromo ou de aço inoxidável, tornando-se, portanto, inadequadas para uso em larga escala. Nesse sentido, a utilização de materiais compósitos (MC), geralmente plásticos reforçados com fibra de vidro (PRFV) ou fibra de carbono (PRFC), tem crescido como uma alternativa para a aplicação de reparos em dutos metálicos, como uma opção eficiente para prevenção e contenção de falhas sem a necessidade de interromper a produção. Além disso, a aplicação de revestimentos de MC pode ser usada para restaurar as propriedades mecânicas originais de uma estrutura, ou ainda prorrogar a vida útil de tubulações degradadas ou danificadas pela corrosão [6][7].

Todavia, os reparos de MC podem apresentar defeitos internos ou na interface com o substrato metálico, como bolhas, descolamentos e delaminações, oriundos do processo de aplicação ou de agentes externos. Se não detectados, estes defeitos podem evoluir e comprometer a função do revestimento, aumentando a chance de falhas. Portanto, faz-se necessário realizar inspeções periódicas para avaliar a qualidade e integridade dos revestimentos compósitos [6][8].

Para tanto, são utilizadas técnicas de ensaios não destrutivos (ENDs), que são capazes de avaliar características da estrutura e detectar defeitos sem provocar a destruição ou danificação dos corpos de provas (CPs) e das estruturas em uso. Dentre as diferentes técnicas de ENDs, uma que se destaca é a Shearografia, que vem sendo objeto de estudo do Laboratório de Metrologia e Automatização da Universidade Federal de Santa Catarina (LABMETRO/UFSC) nos últimos anos.

A shearografia é uma técnica óptica baseada no princípio da interferometria laser, que vem apresentando bons resultados na detecção de defeitos em reparos compósitos nos trabalhos desenvolvidos no LABMETRO. Nesse sentido, a busca por desenvolver um sistema com menores dimensões e maior portabilidade e produtividade para inspeções em campo motivou o desenvolvimento dessa dissertação.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho visa avançar no desenvolvimento da técnica óptica de END shearografia aplicada a ambientes restritos, e de difícil acesso. O objetivo geral é facilitar a atividade de inspeção em dutos de aço revestidos com material compósito que se encontrem nestes ambientes. Está prevista a idealização, o projeto e a construção de um protótipo compacto, de elevada produtividade, e operável apenas por uma pessoa para realizar estas inspeções de shearografia.

1.2 Objetivos Específicos

Destacam-se como objetivos específicos deste trabalho:

- a) Viabilizar a operação do sistema de shearografia desenvolvido em ambientes restritos. Para atingir tal objetivo será avaliado o estado da arte das tecnologias de inspeção e realizadas adequações e otimizações nos módulos de inspeção por shearografia, fazendo com que eles operem neste ambiente. São eles: módulo de iluminação (laser), módulo de aquisição de imagem e módulo de carregamento.
- b) Viabilizar a inspeção com o sistema de shearografia desenvolvido por apenas uma pessoa. Para atingir este objetivo será projetada uma estrutura de integração e fixação do aparato de medição que integre os módulos de uma forma compacta, a fim de facilitar a locomoção e fixação junto ao corpo a ser inspecionado, permitindo a operação apenas por uma pessoa.

- c) Validar em laboratório o procedimento de inspeção com o sistema de shearografia desenvolvido.
- d) Avaliar o desempenho do sistema de shearografia desenvolvido quanto à praticidade, produtividade e qualidade das imagens obtidas.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos que fazem um apanhado geral sobre assuntos necessários para a completa compreensão do tema desenvolvido.

O capítulo 2 aborda os conceitos acerca dos materiais compósitos, como suas características e aplicações na indústria de P&G. No capítulo 3 são abordadas algumas das técnicas de ensaios não destrutivos aplicados a materiais compósitos. O capítulo 4 é dedicado à shearografia, técnica óptica de END utilizada nesse trabalho. O capítulo 5 mostra as fases de desenvolvimento do projeto, desde o planejamento até a validação do protótipo, e análise de seus respectivos resultados. Já o capítulo 6 é destinado às considerações finais e às sugestões para trabalhos futuros.

2 MATERIAIS COMPÓSITOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS

A utilização de materiais compósitos na indústria está em constante crescimento devido à sua versatilidade e ampla gama de aplicações. Esses materiais encontram aplicação em setores variados, incluindo aeronáutica, aeroespacial, automotiva, de energia e indústria petrolífera. Neste capítulo, apresentam-se aos materiais compósitos, com ênfase em seu uso na indústria de P&G.

2.1 Materiais compósitos

Os materiais compósitos são o resultado da combinação de dois ou mais materiais distintos em uma escala macroscópica, criando um novo material com propriedades únicas. Essa junção de materiais resulta em um conjunto de características que não poderiam ser alcançadas com nenhum dos componentes utilizados separadamente. Os compósitos são formados por dois elementos essenciais: o reforço e a matriz. A interface entre esses dois componentes desempenha um papel fundamental na determinação das propriedades e no desempenho global do material compósito.

As propriedades dos compósitos são influenciadas por diversos fatores, incluindo a geometria das fibras ou partículas de reforço, a distribuição, a orientação e a compatibilidade interfacial entre os componentes da mistura. É fundamental que haja uma afinidade entre os materiais combinados para que possam trabalhar de forma colaborativa e responder às demandas da aplicação. Deve-se notar que os compósitos são materiais heterogêneos e, na maioria dos casos, exibem um comportamento mecânico anisotrópico, o que significa que suas propriedades mecânicas variam em diferentes direções. Isso ocorre devido à influência da orientação e distribuição dos componentes de reforço no material compósito [9]. A Figura 1 representa a estrutura de um material compósito.

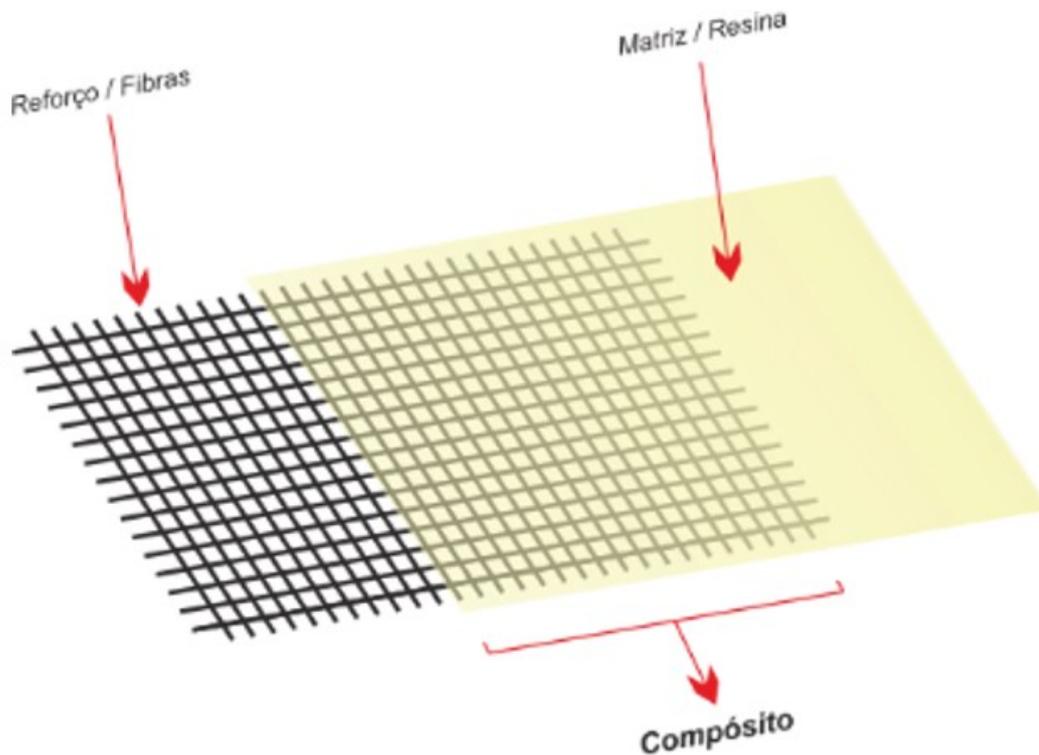


Figura 1 – Elementos principais de um material compósito [13].

O reforço, que constitui a fase dispersa do material, é o responsável por conferir ao compósito suas propriedades mecânicas principais. Essa fase de reforço pode assumir diferentes formas, sendo comum a presença de fibras ou partículas. Em compósitos de caráter estrutural, é frequente o uso de fibras de vidro (PRFV) ou de carbono (PRFC). As fibras podem ser classificadas como contínuas (longas) ou descontínuas (curtas). As fibras curtas, apesar de serem mais fáceis de processar, tendem a ter uma eficiência de reforço inferior. Além disso, dependendo da orientação das camadas, as fibras contínuas podem se dispor de forma unidirecional ou bidirecional [8][9].

A matriz tem a função de unir e manter a fase dispersa no lugar, transmitir cargas e proteger essa fase de reações químicas com o ambiente e danos mecânicos causados pelo manuseio. A matriz pode ser composta por materiais poliméricos, metálicos ou cerâmicos, e a escolha depende da aplicação final do material compósito. Além disso, a composição da matriz desempenha um papel determinante na definição da temperatura de serviço, no processo de fabricação e na durabilidade do compósito. Quando se trata da produção de reforços estruturais, as matrizes poliméricas são as mais comuns, enquanto as matrizes metálicas e cerâmicas são preferidas em aplicações que envolvem temperaturas elevadas (a partir de 200°C) [9][10].

Com a união dessas duas fases, tem-se um material com propriedades únicas, sendo possível alcançar novos campos de aplicação a partir de combinações que não são encontradas nos materiais não combinados. 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 [10]. Dessa forma, a utilização de materiais compósitos tem aumentado em diversos setores da indústria, em especial na área de P&G.

2.2 Aplicações na indústria de petróleo e gás

Na indústria de P&G, é comum que se encontrem ambientes hostis e agressores químicos, demandando um maior cuidado quanto à vulnerabilidade à corrosão, evitando futuras complicações e até possíveis acidentes. Para tanto, os revestimentos de material compósito são amplamente utilizados nesse meio, proporcionando reforço mecânico e proteção contra diversos tipos de corrosão, visto que apresentam elevada impermeabilidade [6].

A redução da espessura da parede em tubulações metálicas é um fenômeno que ocorre ao longo da vida útil destas estruturas, quando expostas a agentes agressores. Se essa redução atinge um nível significativo, resultando em defeitos que representam um risco para a operação, torna-se necessário reparar a tubulação afetada. A escolha do método de correção depende da gravidade do defeito e do potencial de risco que ele apresenta para o duto.

Em muitos casos, a solução para corrigir esses defeitos envolve a aplicação de um revestimento feito de material compósito na tubulação. Esse revestimento desempenha várias funções, incluindo a desaceleração do processo de corrosão e o reforço estrutural, resultando em um aumento significativo na vida útil da tubulação. A grande vantagem desse método é que ele permite que as operações de produção continuem sem a necessidade de interrupção imediata para a troca de toda ou parte da estrutura. Isso significa que os reparos podem ser realizados de forma mais eficiente, em um menor período de tempo e com custos operacionais reduzidos. Quando se trata de opções para esse tipo de aplicação, os materiais mais comuns são o PRFV e o PRFC, sendo o primeiro o mais utilizado, por seu menor custo [8]. Na Figura 2 temos um exemplo da aplicação de revestimento compósito em uma estrutura.



Figura 2 - Aplicação de revestimento de MC em tubulação *offshore* [8].

Além das vantagens previamente mencionadas, as estruturas feitas de materiais compósitos apresentam facilidade de manutenção e uma relação superior entre resistência e peso em comparação com materiais como o aço. Essa última vantagem, combinada com uma alta rigidez específica, é a base para o desempenho estrutural superior dos materiais compósitos. Outra grande vantagem da utilização de compósitos na indústria petrolífera é a não necessidade de interromper a produção para realizar manutenção. Isso ocorre porque as operações de manutenção com compósitos não requerem o uso de chamas ou arcos de solda, eliminando assim a necessidade de parar a produção durante esse processo [14].

2.3 Defeitos em materiais compósitos

O campo de materiais compósitos encontra-se em rápido desenvolvimento tecnológico, ampliando o potencial de desempenho destes materiais especialmente em aplicações estruturais. Com o constante desenvolvimento, tem-se fibras cada vez mais fortes e composições de resinas mais resistentes. Entretanto, durante o processo de

aplicação do material compósito podem ocorrer falhas de adesão entre as camadas que a compõem ou entre o revestimento compósito e o material de base. Tais defeitos comprometem as propriedades mecânicas das estruturas compostas e podem gerar caminhos pelos quais agentes corrosivos penetram e agem sobre o material metálico de base, de maneira não facilmente identificável por inspeção visual, podendo resultar em falhas catastróficas das estruturas [10] [14].

Os defeitos em revestimentos compostos podem ser divididos em dois tipos: os induzidos pelo processo de fabricação e aqueles originados pelo uso em serviço [15]. A Tabela 1 apresenta os tipos mais comuns de defeitos em materiais compostos aplicados em estruturas metálicas como revestimento de proteção anticorrosiva e reforço estrutural.

Tabela 1 - Classificação de defeitos em materiais compostos [16].

Classificação	Tipo	Causas típicas
Defeito induzido pelo processo de fabricação	Porosidade	Controle inadequado do processo de fabricação.
	Fibras desalinhadas, rugosas e onduladas	Pressão de cura não uniforme; falta de compatibilidade das propriedades térmicas dos materiais.
	Delaminação	Controle inadequado do processo de fabricação; excesso de catalisador; contaminação por materiais externos.
	Bolhas de ar (vazios)	Controle inadequado do processo de fabricação.
Defeito induzido pelo uso em serviço	Descolamento	Falta de compatibilidade entre materiais ou pressão excessiva.
	Trinca	Sobrecarga mecânica; impacto.
	Dano ao impacto	Sobrecarga mecânica.
	Inchaço	Absorção de umidade.

Na Figura 3 tem-se representado de forma esquemática alguns dos principais defeitos encontrados em reparos compostos.

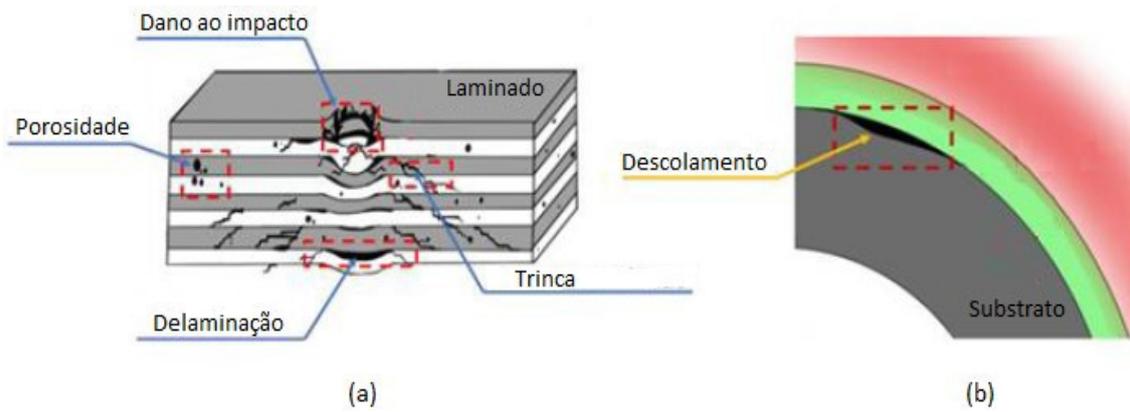


Figura 3 - Ilustração de defeitos encontrados em materiais compósitos [6].

Para assegurar a integridade do material compósito, é necessário inspecioná-lo periodicamente apontando o local de aparição e a severidade do defeito. Para isso, a forma mais usual de inspeção é através de ensaios não destrutivos (END) que indicarão a necessidade, ou não, da substituição ou reparo da peça ou do revestimento.

3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS APLICÁVEIS A MATERIAIS COMPÓSITOS

Os ensaios não destrutivos são procedimentos de inspeção que, quando aplicados a peças ou componentes, não causam danos nem interferem em sua capacidade de uso. A escolha do método de ensaio não destrutivo mais apropriado para uma aplicação específica depende de considerações técnicas e econômicas. Entre os fatores técnicos, encontram-se: tamanho, forma da superfície, sensibilidade requerida do método, tipo de defeito a ser analisado, necessidade de detalhamento e documentação do defeito. Como fatores econômicos, devem ser considerados: custos do equipamento de inspeção e da hora/homem, tempo necessário para realização da inspeção, portabilidade do equipamento, entre outros [17].

Este capítulo aborda, de forma resumida, alguns dos principais métodos de END utilizados na inspeção de materiais compósitos: ultrassom; radiografia; tomografia; e termografia. A shearografia, por ser a técnica de END utilizada no desenvolvimento deste trabalho, é abordada, em detalhes, no capítulo 4.

3.1 Ultrassom

O sistema de inspeção por ultrassom é constituído por um circuito que emite e recebe sinais ultrassônicos. Esse sistema avalia a propagação ou reflexão de ondas ultrassônicas através do material de interesse. O comportamento dessas ondas é influenciado pelas propriedades físicas do material, pela frequência utilizada e pela presença de descontinuidades ou heterogeneidades em sua estrutura interna. No contexto da inspeção de materiais compósitos, a frequência aplicada geralmente varia entre 1 e 50 MHz [18]. De acordo com as informações contidas no sinal, o inspetor pode obter informações a respeito do tamanho do defeito, bem como sua localização e orientação. A inspeção de materiais por ultrassom pode ser efetuada através de dois métodos ou técnicas: pulso-eco e transparência (também conhecido como transmissão).

No método pulso-eco somente um transdutor é responsável por emitir e receber as ondas ultrassônicas que se propagam no material, como mostrado na Figura 4. Portanto, o transdutor é acoplado somente em um lado do material, podendo ser verificada a profundidade da descontinuidade, suas dimensões e localização na peça [19].

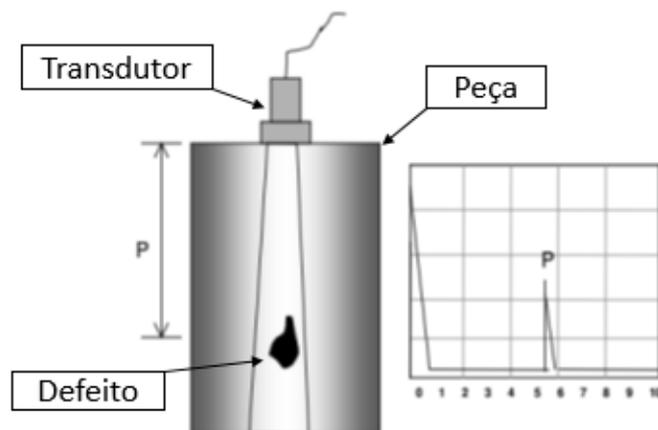


Figura 4 - Inspeção com sistema de ultrassom pulso-eco. Adaptado de [19]. Nesta figura, são mostrados o transdutor de ultrassom, a peça com defeito e o sinal na tela do dispositivo registrador.

No método de transparência, são utilizados dois transdutores separados, um transmitindo e outro recebendo as ondas ultrassônicas, como mostrado na Figura 5. Neste caso, é necessário acoplar os transdutores nos dois lados da peça, de forma que estes estejam perfeitamente alinhados. Neste tipo de inspeção, não é possível determinar a posição da descontinuidade, sua extensão, ou localização na peça, sendo somente um ensaio do tipo passa - não passa [19]. Uma desvantagem da aplicação de inspeções por ultrassom em compósitos está relacionada com a estrutura não homogênea destes materiais o que dificulta a propagação das ondas ultrassônicas e, conseqüentemente, a detecção de defeitos.

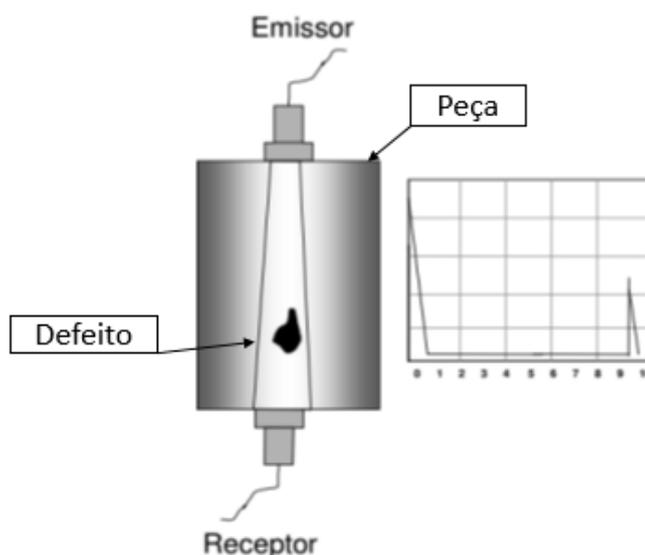


Figura 5 - Inspeção com sistema de ultrassom por transparência. Adaptado de [19]. Nesta figura são mostrados o emissor e receptor de ultrassom, a peça com defeito e o sinal na tela do dispositivo registrador.

3.2 Radiografia

O método de inspeção por radiografia é baseado na atenuação dos raios-X que atravessam o corpo inspecionado. Essa técnica é caracterizada pela emissão de radiação eletromagnética de baixo comprimento de onda (alta energia), tipicamente na faixa entre 0,01 e 10 nm, sendo capaz de identificar com muita precisão a presença de vazios e porosidades, tanto em peças com geometria regular, quanto complexas. Defeitos planares também podem ser determinados, caso eles estejam orientados paralelamente ao feixe de radiação [20].

A Figura 6 mostra uma esquematização geral do processo de inspeção radiográfica. A amostra, peça, componente ou corpo de prova é colocado entre a fonte de energia e um filme radiográfico. A energia radiográfica, então, projeta uma imagem sobre o filme, que é posteriormente revelado quimicamente de modo a se obter a imagem (o negativo). Os danos e defeitos podem ser evidenciados de diferentes formas na imagem, se o defeito for a inclusão de um material de maior densidade, ele aparecerá de forma mais escura, já que mais energia eletromagnética foi absorvida (atenuada) pelo material, diminuindo assim a parcela de energia que correspondentemente atinge e sensibiliza fonicamente o filme [20]. No caso da presença de vazios na estrutura, haverá menor atenuação e mais energia chegará do outro lado, tornando o defeito mais claro que a região íntegra na imagem. Vale ressaltar que o processo descrito acima é a radiografia convencional, que utiliza filme. Atualmente, existem processos mais modernos, como a radiografia digital, que utiliza sensores para capturar a imagem e enviá-la para um computador onde ocorre o processamento e análise de imagem.

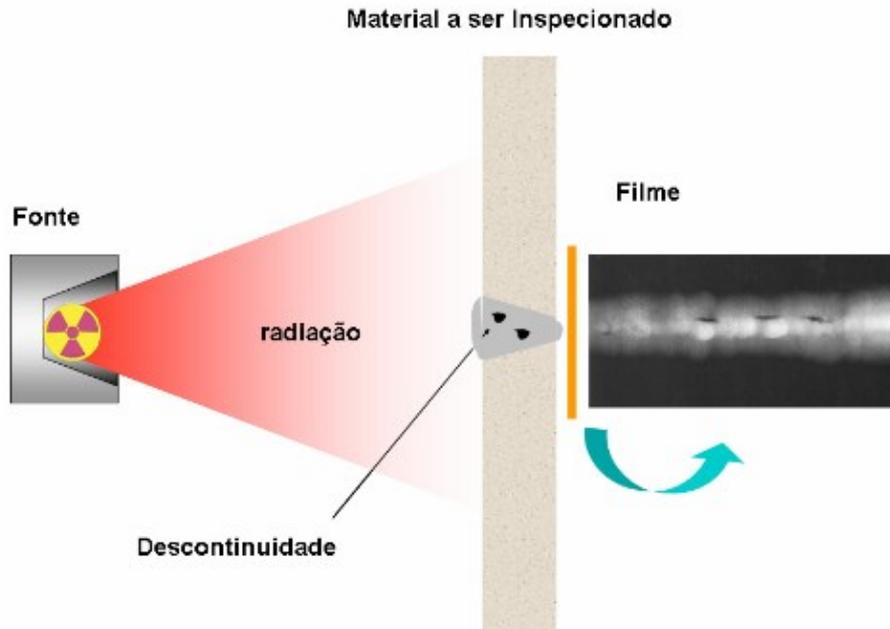


Figura 6 - Esquema de método de inspeção por radiografia de raios-X [21].

Uma das desvantagens desta técnica é que a inspeção é bidimensional, ou seja, é possível identificar o tamanho e distribuição lateral dos defeitos, mas não a sua profundidade. Além disso, em alguns casos é necessária a utilização de contrastes (líquidos rádio opacos) devido ao baixo coeficiente de atenuação radiográfica, que é uma função da densidade dos materiais [20]. Também é importante ressaltar que a utilização desta técnica demanda procedimentos rigorosos de segurança operacional, devido à radiação.

3.3 Tomografia computadorizada

A tomografia computadorizada é uma técnica que compartilha os mesmos princípios físicos da radiografia, porém, ela proporciona imagens tridimensionais (3D). Para realizar uma tomografia, é necessário capturar muitas imagens radiográficas de ângulos diversos e, por meio de um sistema computacional, criar uma representação tridimensional da peça, usando as diferentes projeções bidimensionais como base. A Figura 7 representa o princípio de formação de uma imagem tomográfica.

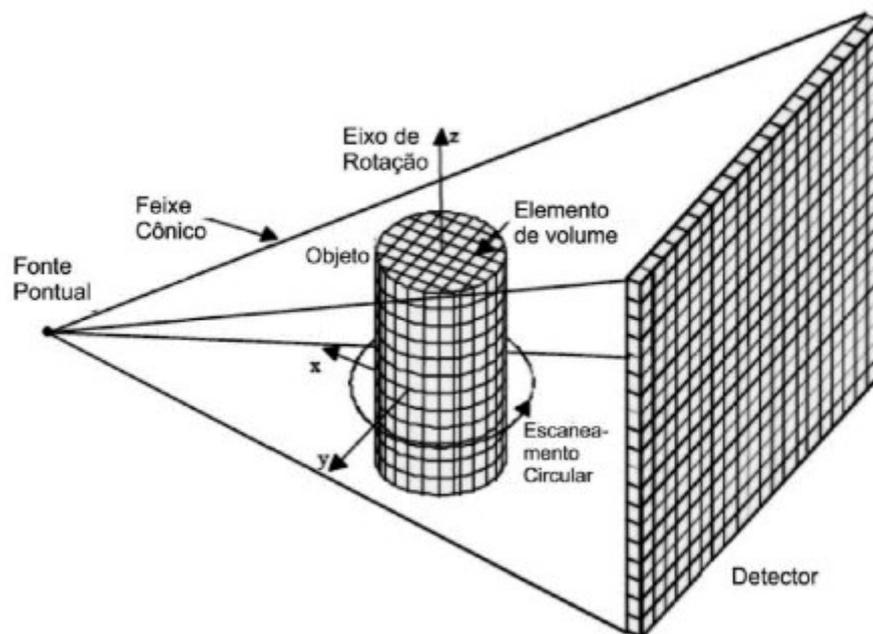


Figura 7 - Princípio de formação de uma imagem tomográfica [22].

A tomografia pode ser realizada com a movimentação do conjunto fonte-detector em torno de um objeto fixo. Ou, ainda, com a movimentação do objeto em relação ao conjunto fonte-detector [22]. A Figura 8 apresenta o resultado de uma tomografia computadorizada.

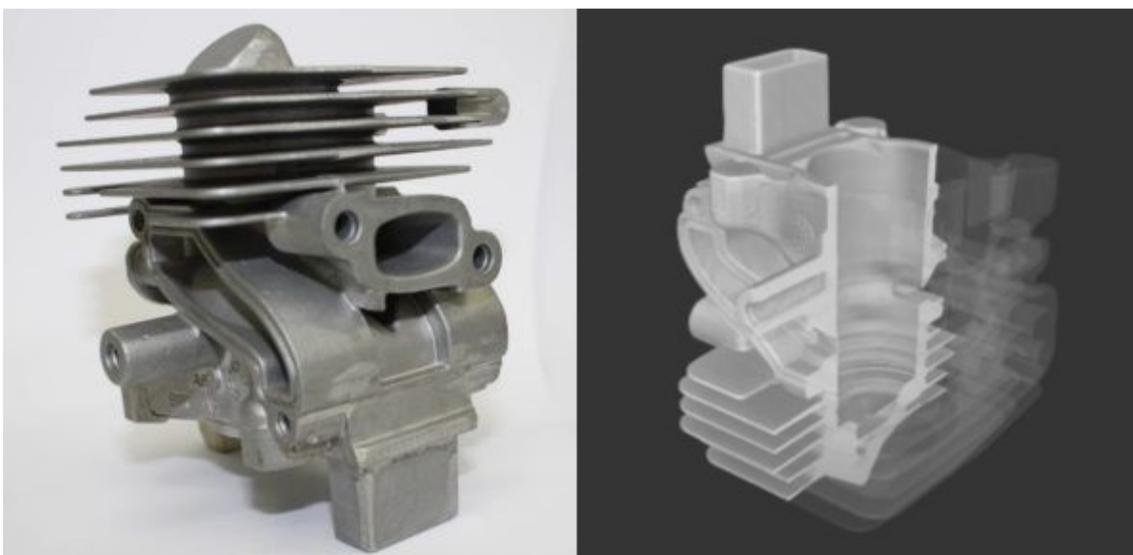


Figura 8 - Resultado de tomografia computadorizada [23].

3.4 Termografia infravermelha

A termografia infravermelha é uma técnica que se baseia no mapeamento térmico de uma peça, para a localização de suas regiões com a presença de defeitos. Isto é possível porque a condutividade térmica dos materiais e sua densidade dependem fortemente do seu grau de integridade. Quando o material apresenta vazios, poros e delaminações em sua estrutura, sua condutividade térmica e densidade diminuem localmente e, correspondentemente, sua difusividade térmica é alterada. Isto afeta as suas características de transferência de calor no interior do material, alterando as taxas locais de fluxo de calor e causando os chamados gradientes térmicos, ou seja, as diferenças localizadas na temperatura da peça inspecionada [20], que são captadas por uma câmera termográfica, como ilustrado na Figura 9, gerando, assim, os chamados termogramas.

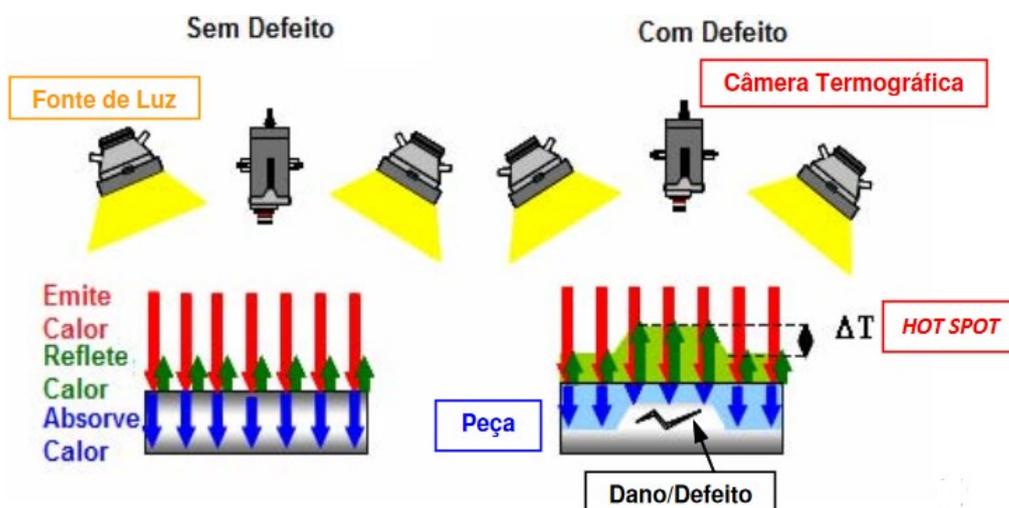


Figura 9 - Esquema do processo de inspeção termográfica [20].

A termografia infravermelha pode ser realizada de forma ativa, em que se aplica um método de carregamento térmico para induzir um fluxo de calor no material, ou de forma passiva, em que se mede as variações de intensidade radioativa de um corpo com temperatura acima ou abaixo da temperatura ambiente. A forma mais utilizada para inspeção de compósitos é a termografia infravermelha ativa, em que são utilizadas fontes de calor como lâmpadas de alta potência para induzir o fluxo térmico no material. Esta forma de inspeção pode ser realizada nos modos de reflexão ou transmissão, dependendo da posição do objeto em relação à fonte e à câmera, como mostrado na Figura 10.

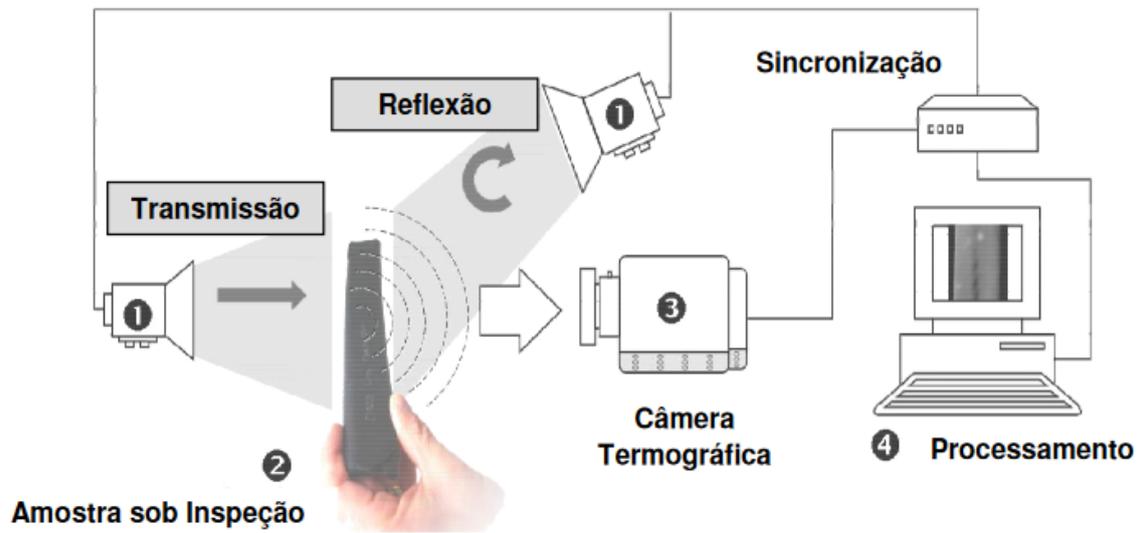


Figura 10 - Esquema de inspeção termográfica por transmissão e reflexão [20].

4 SHEAROGRAFIA

A shearografia é uma técnica de ensaio não destrutivo que se baseia no princípio da interferometria *speckle* [24]. Para isso, uma pequena deformação é induzida no material por um carregamento controlado, gerando um campo de deslocamentos na superfície. Medindo o gradiente deste deslocamento, a shearografia pode identificar defeitos em uma peça, estrutura ou revestimento [25][26].

4.1 Princípios fundamentais

4.1.1 Efeito *speckle*

Esse efeito é obtido quando se ilumina uma superfície com um laser de comprimento de onda ' λ ', inferior à rugosidade ' ξ ' da mesma. A imagem da região iluminada tem um aspecto granular com distribuição de intensidade aleatória formada por pequenos pontos claros e escuros que é causada pela reflexão difusa da luz coerente.

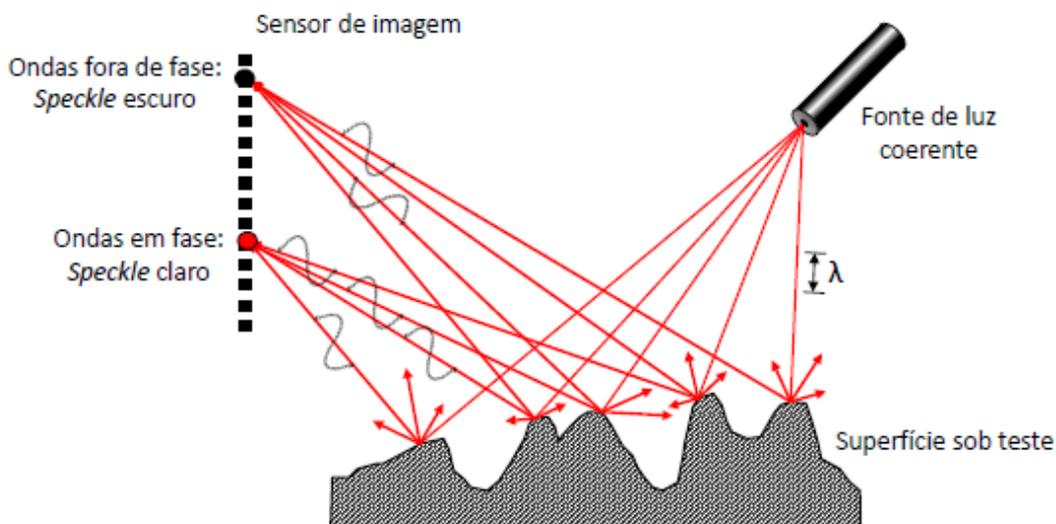


Figura 11 - Formação do *speckle* [28].

Como mostra a Figura 11, a luz emitida por uma fonte coerente (laser) se dispersa sobre a estrutura da superfície. Dessa maneira, as ondas refletidas atingem o sensor de imagem em diferentes fases, devido aos diferentes caminhos que percorrem. A interferência de cada onda contribui para a intensidade de cada pixel, formando então um padrão *speckle* ou granulado óptico. Portanto, as distribuições da fase e intensidade do granulado óptico estão diretamente relacionadas com o relevo da superfície da área iluminada, sendo que o padrão permanece temporalmente estável enquanto a superfície

medida estiver imóvel em relação ao ponto de observação [5]. Na Figura 12, apresenta-se um exemplo de padrão *speckle*.

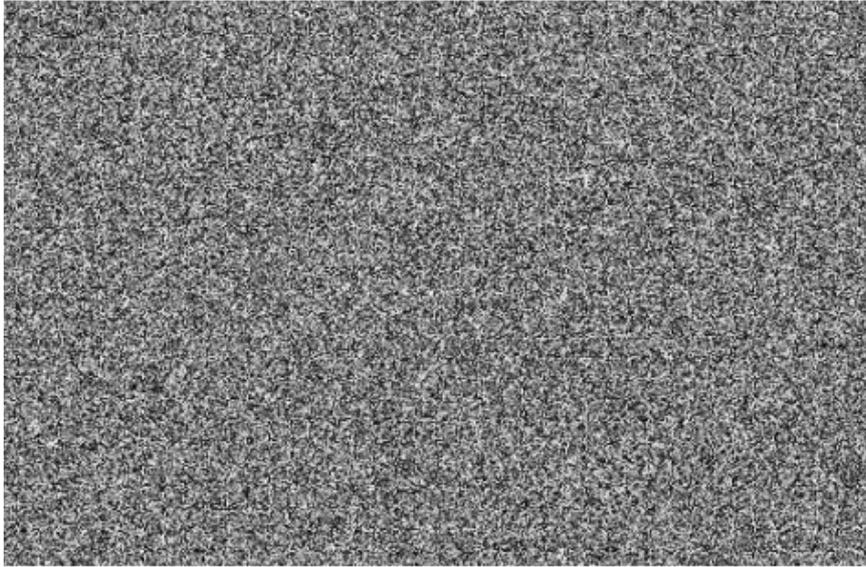


Figura 12 - Exemplo de padrão *speckle* [5].

A interferência livre resultante da reflexão aleatória da luz em qualquer ponto próximo no espaço gera o *speckle* objetivo (Figura 13 (a)). No entanto, a interferência que ocorre após a luz passar por um sistema óptico, como uma câmera ou o olho humano (Figura 13 (b)), forma o "*speckle*" subjetivo, que varia conforme o sistema óptico utilizado [5].

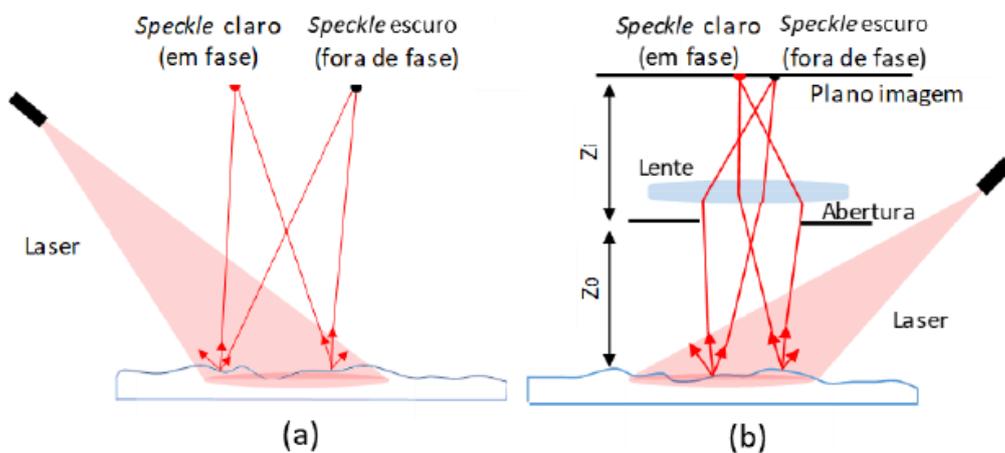


Figura 13 - Representação da formação do *speckle*: a) Objetivo no espaço; b) Subjetivo em um sistema óptico [6].

4.1.2 Interferência

A interferência é um fenômeno em que duas ou mais ondas coerentes se combinam, formando uma onda resultante de amplitude maior ou menor que de suas constituintes. As ondas eletromagnéticas, como a luz, podem ser descritas pela equação:

$$U = a_0 \cos(\omega t + \Phi), \quad (4.1)$$

Ou na forma complexa como:

$$U = a_0 e^{i(\omega t + \Phi)}, \quad (4.2)$$

Onde a_0 é a amplitude da onda, ω a frequência angular e Φ o ângulo de fase.

Como a frequência da luz é muito elevada, não pode ser percebida pelos sensores existentes. Sendo assim, é comum desprezar a parcela temporal, assumindo uma representação simplificada na forma da equação (4.3).

$$U = a_0 e^{i\Phi}. \quad (4.3)$$

Em meios lineares a soma de duas ondas U_1 e U_2 é simplesmente:

$$U = U_1 + U_2 = a_1 e^{i\Phi_1} + a_2 e^{i\Phi_2}. \quad (4.4)$$

No caso de ondas luminosas, o que se enxerga é a intensidade, que é descrita como:

$$I = (a_1^2 + a_2^2) + 2a_1 a_2 \cos(\Phi_2 - \Phi_1), \quad (4.5)$$

Também representada por:

$$I = I_f + I_m \cos\phi. \quad (4.6)$$

Onde I_f é a intensidade de fundo da imagem e I_m a intensidade de modulação.

Analisando a Equação (4.6), é possível verificar a distribuição de intensidade, por exemplo, de um padrão *speckle*, capturado por um sensor de uma câmera. Quando a diferença de fase em um ponto $(\Phi_2 - \Phi_1) = 2n\pi$, em que $n \in \mathbb{N}$, tem-se interferência construtiva, e a intensidade terá valor máximo (ponto claro). Da mesma forma, se $(\Phi_2 - \Phi_1) = 2n\pi + \pi$ com $n \in \mathbb{N}$, a interferência é destrutiva e a intensidade terá valor mínimo (ponto escuro).

4.2 Geração de franjas e detecção de defeitos

Dentro do campo da interferometria existem diferentes técnicas, algumas como ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) medem o campo de deslocamento da superfície. Já a shearografia mede o gradiente do campo de deslocamento no plano e fora do plano da superfície inspecionada, o que a torna mais robusta e adequada para uso em campo, pois elimina o deslocamento de corpo rígido [29].

Na shearografia, duas imagens lateralmente deslocadas da superfície iluminada pelo laser são sobrepostas de forma que a interferência se dá entre pontos afastados de uma distância conhecida. Tal deslocamento é conhecido na literatura internacional como *shear*, o que explica o nome dessa técnica interferométrica. Com esse deslocamento lateral, a imagem visualizada por uma câmera corresponde a uma imagem dupla da superfície iluminada com uma região sobreposta (zona de interferência), conforme representa a Figura 14.

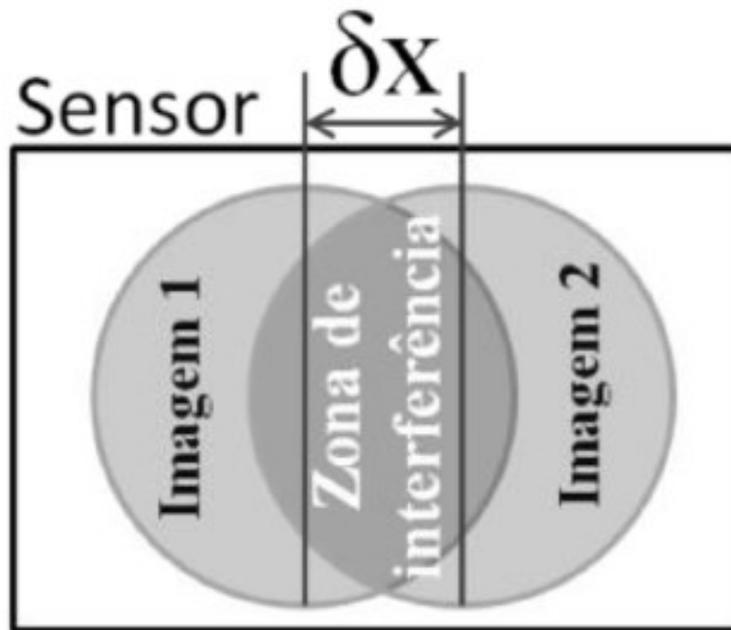


Figura 14 - Imagem com deslocamento lateral e zona de interferência [27].

Este deslocamento lateral, que cria a interferência na imagem, pode ser obtido de diferentes formas. Um sistema óptico comumente utilizado na shearografia consiste em um interferômetro de Michelson adaptado, como ilustrado na Figura 15. Esse aparato 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.

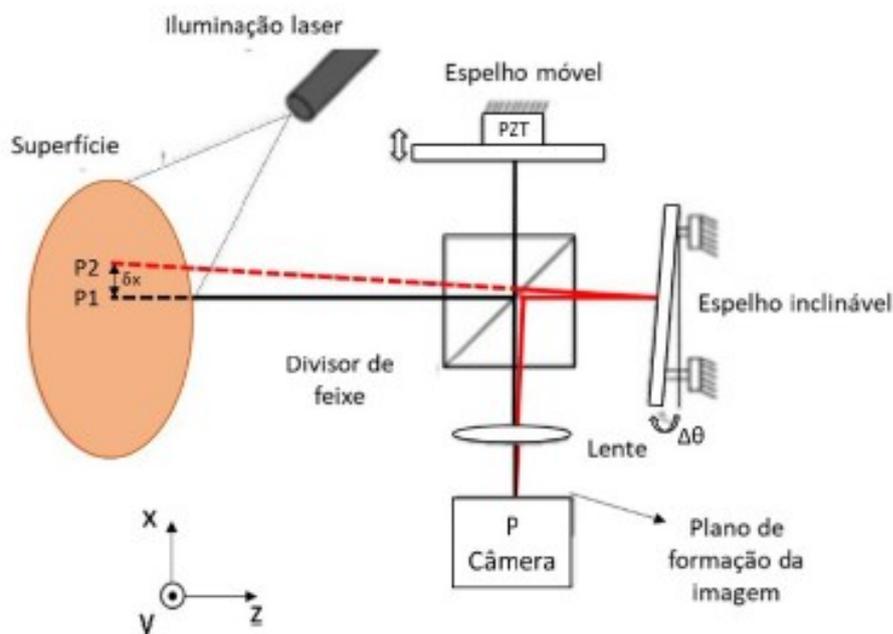


Figura 15 - Interferômetro de Michelson adaptado [8].

Outra forma de se realizar este deslocamento lateral consiste em posicionar um prisma em frente à lente do sistema óptico, como ilustrado na Figura 16

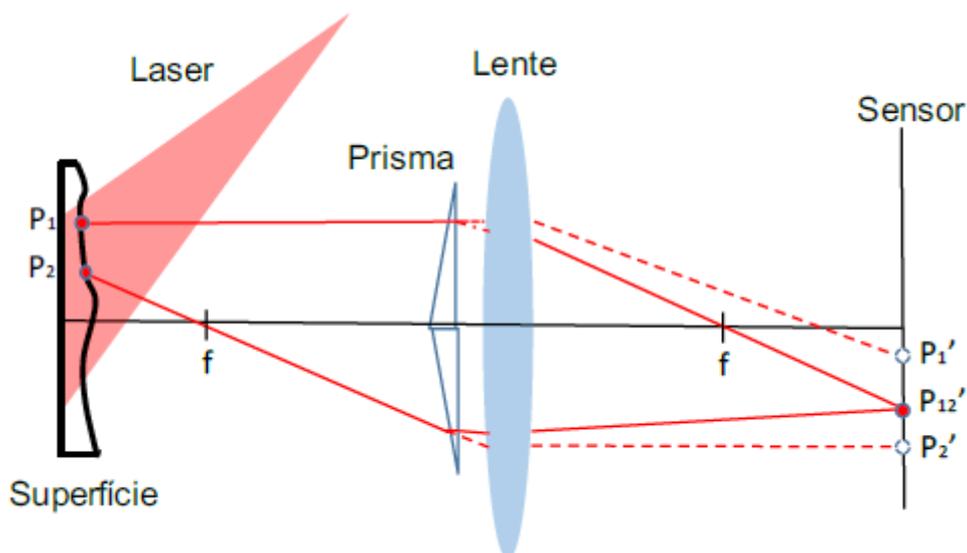


Figura 16 - Deslocamento lateral utilizado prisma [24].

Em ambos os casos, tem-se a sobreposição de dois pontos P_1 e P_2 , gerando o fenômeno de interferência. A interferência nesse ponto P_{12}' pode ser construtiva ou destrutiva, dependendo da diferença de fase entre os pontos, causada pela diferença dos caminhos ópticos percorridos.

Na shearografia, primeiramente captura-se uma imagem dupla da superfície em um estado de referência (estado inicial), então é aplicado uma forma de carregamento que irá deformar a superfície do corpo a ser analisado, gerando uma mudança de caminho óptico. Tal mudança de caminho óptico gera uma mudança de fase relativa entre cada par de pontos vizinhos afastados de distância igual à do deslocamento lateral que interferem entre si. Assim, a distribuição de fase do interferograma é ligeiramente alterada [24]. A imagem da fase medida após o carregamento é subtraída da imagem de referência (estado inicial), gerando o mapa de diferença de fase em que aparecem as franjas em “formato de borboleta”, características da técnica de shearografia. O formato das franjas típico para detecção de defeitos localizados em imagens de shearografia está representado na Figura 17 para duas direções de deslocamento lateral possíveis.

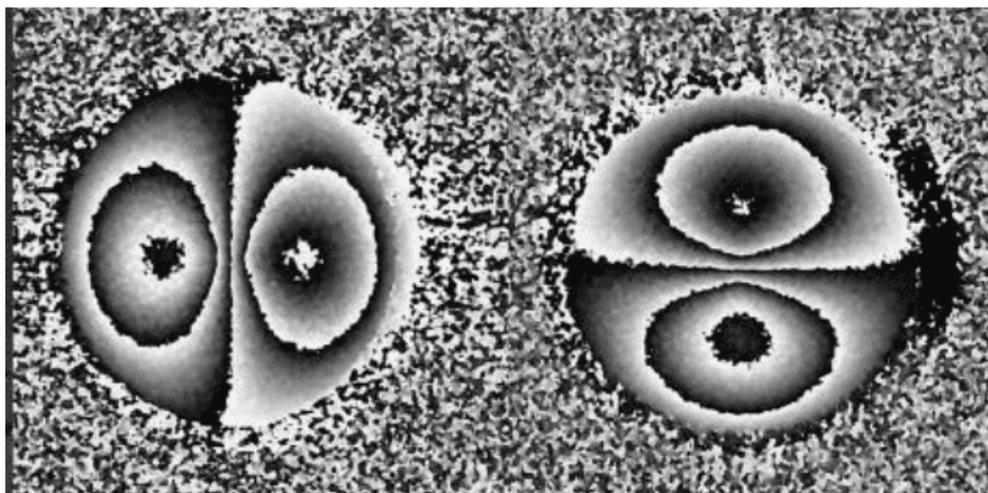


Figura 17 – Mapas de diferença de fase com as franjas de shearografia para deslocamento lateral em x e em y . Adaptado de [27].

Quando a direção de iluminação e de observação são perpendiculares à superfície que está sendo inspecionada, as franjas na shearografia representam o gradiente do campo de deslocamento da superfície, representado aproximadamente por $\partial w/\partial x$ e/ou $\partial w/\partial y$. Aqui, w denota o deslocamento fora do plano, enquanto x e y representam as direções dos deslocamentos laterais [5][6], como ilustrado na Figura 18.

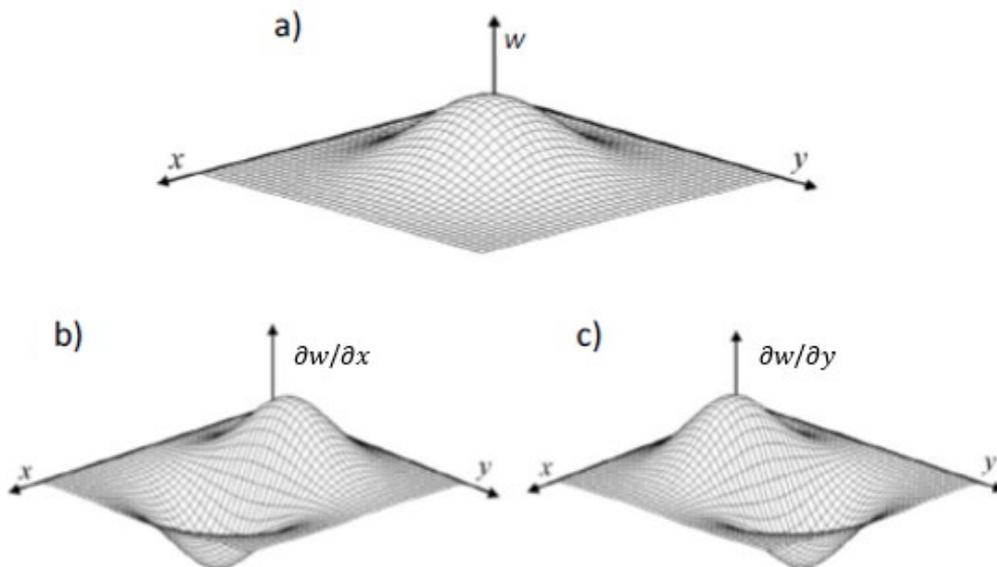


Figura 18 - a) Campo de deslocamento da superfície; b) Gradiente do campo de deslocamentos da superfície $\partial w/\partial x$; c) Gradiente do campo de deslocamentos da superfície $\partial w/\partial y$. Adaptado de [6].

A magnitude do deslocamento lateral influencia diretamente sobre a diferença de fase. Valores muito pequenos de δx e/ou δy podem tornar o sistema pouco sensível, resultando em uma baixa densidade de franjas. Já valores de deslocamento lateral muito elevados podem gerar densidades de franjas além do que pode ser detectado pelo sistema, além de torná-lo mais sensível a fatores externos, como vibração e temperatura. [6][27].

4.3 Determinação de fase

Utilizar diretamente a subtração dos mapas de intensidade para obtenção das franjas de shearografia resulta em uma resolução vertical relativamente baixa. Para contornar esse problema é introduzida a informação de fase, permitindo a eliminação de ambiguidades e a melhora da visibilidade e da incerteza com que é possível quantificar a medição [24]. Existem diferentes técnicas para obtenção da informação de fase, estas podem ser divididas em: métodos temporais e métodos espaciais.

4.3.1 Determinação de fase por métodos temporais

O método de deslocamento de fase temporal, ou medição temporal de fase, consiste em adquirir uma sequência de imagens ao longo do tempo defasadas de um incremento de fase $\Delta\phi$ conhecido e controlado, para determinação do valor de fase em

cada ponto da superfície medida. O atuador piezoelétrico (PZT) é, frequentemente, o dispositivo de deslocamento de fase mais utilizado [5], como ilustrado na Figura 15.

Vários algoritmos para determinar a fase, utilizando múltiplas imagens, estão disponíveis. O algoritmo de quatro-passos é um dos mais simples entre os empregados para calcular a fase do padrão de *speckles* da superfície estudada. Ele utiliza quatro imagens com fases deslocadas propositalmente em $\pi/2$ [5], onde suas intensidades são relativas a:

$$I(0) = I_f + I_m \cos \phi, \quad (4.7)$$

$$I(1) = I_f + I_m \cos (\phi + \pi/2), \quad (4.8)$$

$$I(2) = I_f + I_m \cos (\phi + \pi), \quad (4.9)$$

$$I(3) = I_f + I_m \cos (\phi + 3\pi/2). \quad (4.10)$$

Sendo ' I_f ' a intensidade de fundo, ' I_m ' a intensidade de modulação, e ϕ a fase. Rearranjando-se as equações, os valores da fase e da intensidade de modulação podem ser obtidos:

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{I(3) - I(1)}{I(0) - I(2)} \right]; \quad -\pi \leq \phi \leq \pi \quad (4.11)$$

$$I_m = \frac{\sqrt{[I(3) - I(1)]^2 + [I(0) - I(2)]^2}}{2} \quad (4.12)$$

Usando os sinais do numerador e denominador da equação (4.11) consegue-se determinar os valores de fase apenas no intervalo de $-\pi$ até π , isto é, o ângulo cônico correspondente ao primeiro ciclo de fase. A determinação do valor absoluto de fase, ou seja, o valor sem ambiguidades, é feita através de um algoritmo de remoção de salto de fase [47]. O conjunto de pontos ou pixels da imagem de fase resultante é conhecido como mapa de fase, que se apresenta de maneira aleatória, de modo que nenhum padrão visual seja perceptível [2]. Entretanto, com a subtração das imagens de dois mapas de fases, obtidos antes e depois de um carregamento, obtém-se um mapa de diferença de fases. A Figura 19 evidencia este processo para o método de quatro passos.

Esse método de medição de fase serviu de base para o desenvolvimento do sistema de shearografia conhecido como 4f, dentro do projeto SHIC (Shearografia para Inspeção de Compósitos) do LABMETRO/UFSC. A Figura 20 apresenta uma imagem desse sistema, em vista explodida. O sistema é formado pelos seguintes componentes: (1) Tubo metálico para suporte da lente objetiva, (2) Corpo principal, (3) Suporte para câmera, (4)

Suporte do conector elétrico do PZT, (5) Base de alinhamento para suporte do interferômetro com PZT e mecanismo para deslocamento lateral e (6) Tampa traseira.

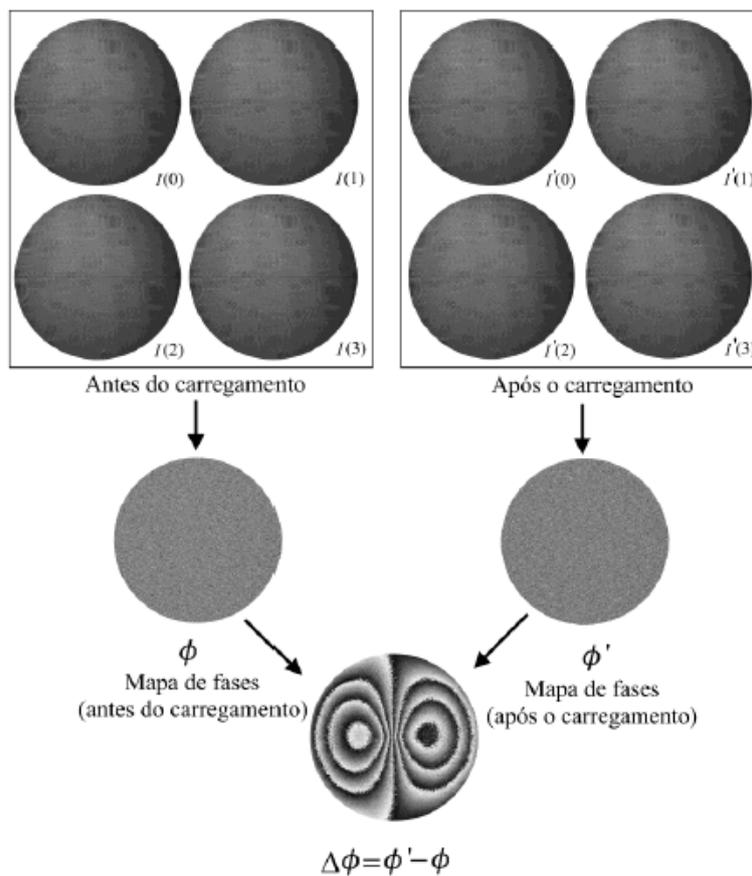


Figura 19 - Processo para obtenção do mapa das diferenças de fases, utilizando o algoritmo de quatro passos [5].

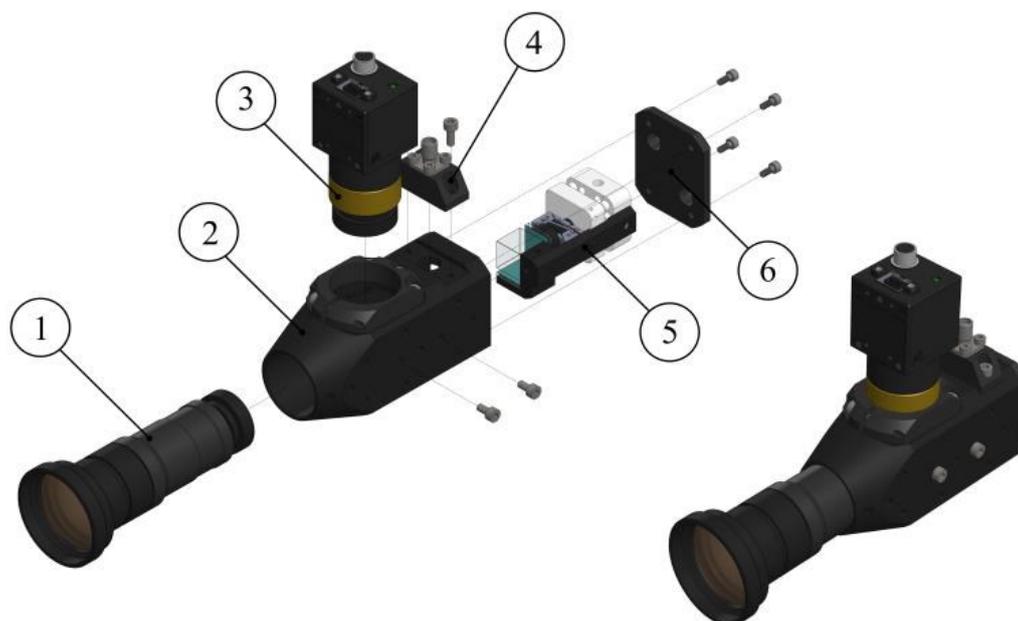


Figura 20 - Sistema de shearografia 4f [5].

Este sistema é largamente utilizado e apresenta bons resultados em inspeções. Entretanto, para o seu correto funcionamento, a distribuição de fase da imagem deve permanecer constante durante o tempo em que ocorrem as sucessivas aquisições de imagem. Isso gera duas limitações principais: baixa taxa de aquisição, devido aos múltiplos passos do algoritmo para obtenção do mapa de fase e sensibilidade a instabilidades provocadas por fatores externos, como vibração, pois qualquer mudança de estado entre os passos do algoritmo aumenta a incerteza na determinação da fase [24]. Para enfrentar essas limitações, foram desenvolvidos outros métodos que necessitam de apenas uma imagem para criação dos mapas de fase, os métodos espaciais.

4.3.2 Determinação de fase por métodos espaciais

Os métodos espaciais para determinação de fase, utilizam-se dos artifícios de inserção de franjas portadoras no interferograma e da aplicação da transformada de Fourier para extrair a informação de fase a partir de uma única imagem [24][30]. As franjas portadoras, ilustradas na Figura 21, são caracterizadas por uma grande quantidade de franjas com direção preferencial e espaçamento relativamente uniforme, cuja frequência espacial é representada por f_0 , e a intensidade é definida pela equação abaixo, sendo $\Delta\phi_p$ a fase das portadoras. Vale ressaltar que todas as quantidades nas equações (4.13) a (4.15) são funções das coordenadas (x, y) da imagem, que foram aqui omitidas para manter as equações mais compactas.

$$I_0 = I_f + I_m \cos(\Delta\phi_p), \quad (4.13)$$

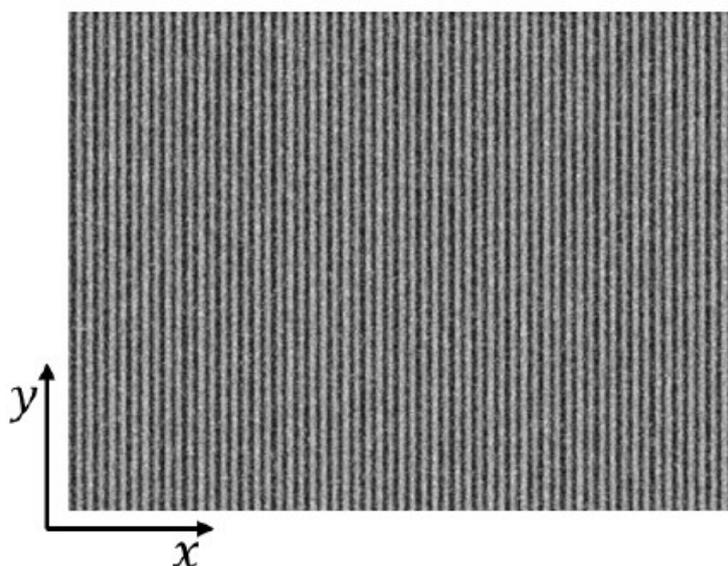


Figura 21 - Simulação de franjas de frequência portadora paralelas e regularmente espaçadas [27].

Se uma variação de fase irregular for inserida na imagem, representando a presença de um defeito, o padrão sofre alterações, principalmente nas regiões que contém as irregularidades, conforme ilustrado na Figura 22. A equação que representa essa variação causada pelo defeito passa a ser:

$$I_c = I_f + I_m \cos(\Delta\Phi), \quad (4.14)$$

Em que $\Delta\Phi$ é a soma da fase das franjas portadoras $\Delta\phi_p$ com a fase induzida pelo defeito $\Delta\phi_w$, sendo que:

$$\Delta\phi_w = \Delta\Phi - \Delta\phi_p, \quad (4.15)$$

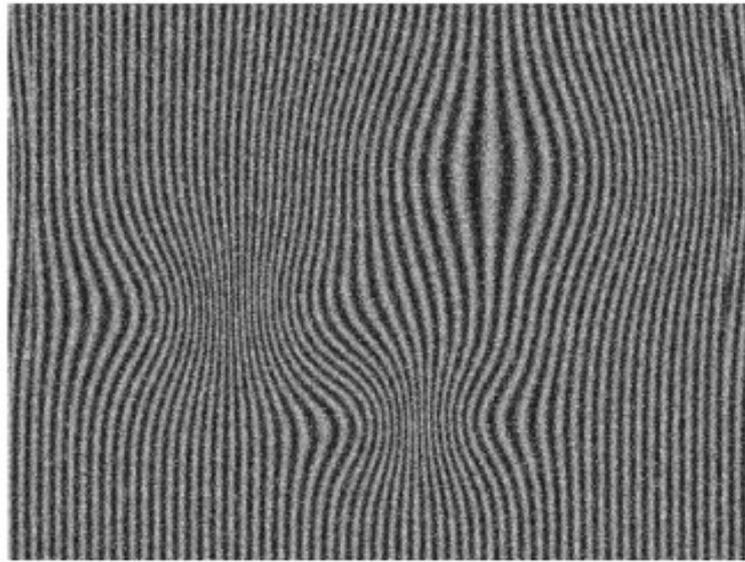


Figura 22 - Simulação de imagem de interferência com franjas portadoras em uma superfície com defeito [27].

Observando a equação 4.14, percebe-se que um termo é independente da fase, e o outro é dependente do cosseno da fase. Para obter os valores da fase, é necessário fazer um processamento no plano de Fourier, desenvolvido por Takeda [46] e, considerando que as variações das frequências são pequenas em relação a frequência portadora, utiliza-se um filtro passa-banda para selecionar a região em torno da frequência portadora no espectro de Fourier. Depois, aplica-se a transformada inversa de Fourier e, finalmente, obtém-se os valores de fase da imagem $\Delta\Phi$ e das franjas portadoras $\Delta\phi_p$, e através da equação 4.15, tem-se a informação $\Delta\phi_w$ de fase dos defeitos. A Figura 23 ilustra esse procedimento, mostrando os mapas de fase resultantes e a diferença entre eles.

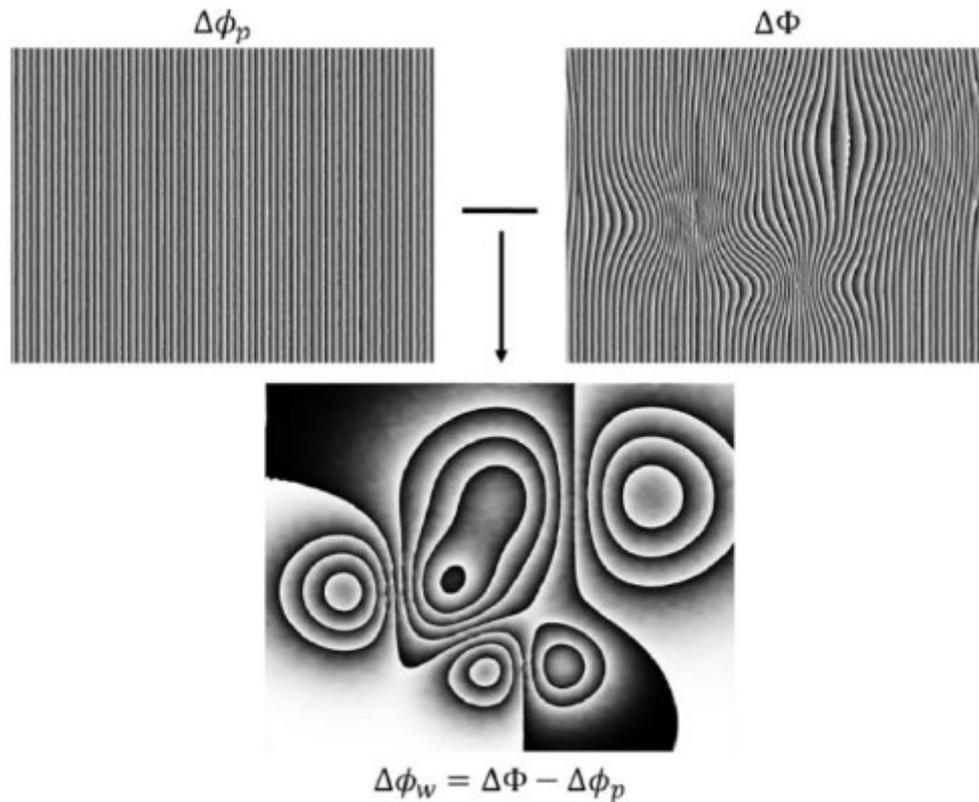


Figura 23 - Simulação da diferença dos mapas de fases, sem e com defeitos [27].

Essa técnica de medição serviu de base para o desenvolvimento do sistema de shearografia instantânea multidirecional, aqui referido como ‘one-shot’, desenvolvido por Barrera [27] no âmbito do projeto SHIC, que foi nomeado dessa forma justamente por necessitar apenas de uma imagem antes e uma depois do carregamento para realizar a inspeção por shearografia. A Figura 24 apresenta uma imagem deste sistema, em vista explodida. O sistema é formado pelos seguintes componentes: (1) Lente objetiva, (2) Corpo principal, (3) Tampa superior, (4) Máscara com tripla abertura, (5) Suporte para câmera e (6) Prisma para deslocamento lateral em três direções simultâneas.

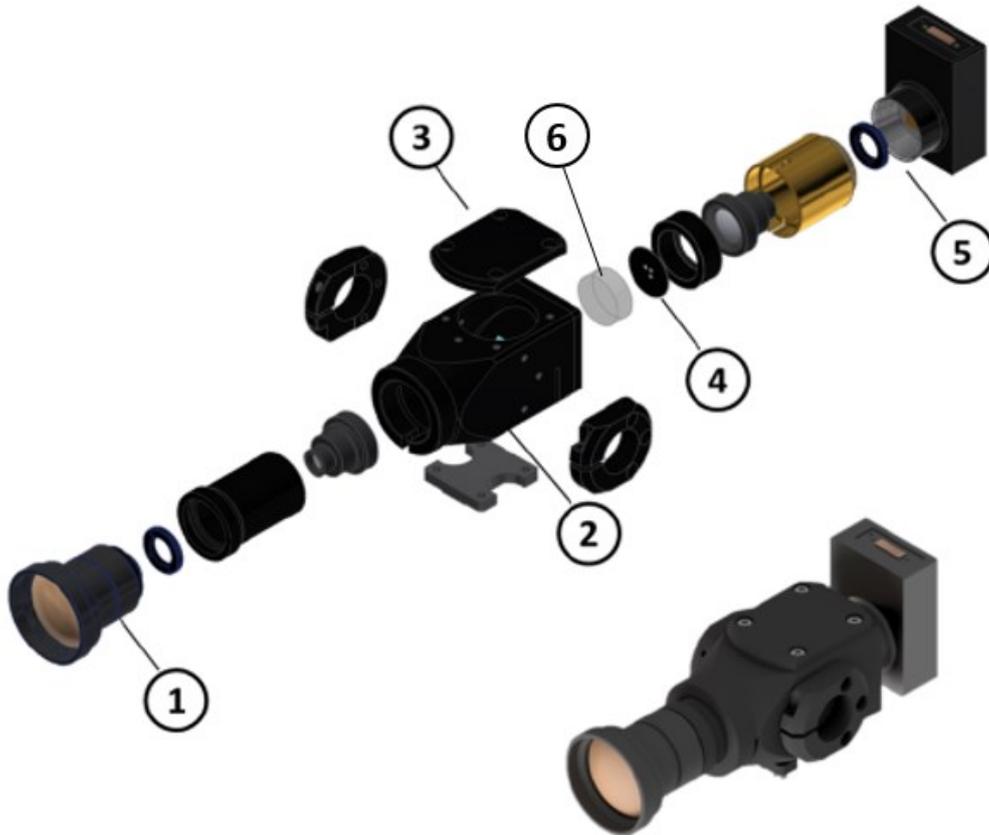


Figura 24 - Sistema de shearografia One-Shot. Adaptado de [28].

O sistema desenvolvido tem apresentado bons resultados para aplicações industriais devido a sua robustez, simplicidade e elevada produtividade, por não necessitar de múltiplas imagens defasadas no tempo. Entretanto, o sistema tem apresentado limitações quanto a intensidade da iluminação utilizada, devido ao fato de a máscara de tripla abertura (4), responsável pela geração das franjas portadoras, restringir a intensidade de luz que chega no sensor da câmera. Nesse caso, recomenda-se a utilização de uma fonte laser com potência mais elevada, comparativamente aos outros sistemas de shearografia, ou a redução da iluminação externa (luz natural) para obtenção de imagens de boa qualidade.

4.4 Formas de carregamento

Como citado anteriormente, a inspeção por shearografia mede o deslocamento relativo entre pontos da superfície analisada. Este deslocamento é induzido pela aplicação de um método de carregamento. Quando um objeto, que possui defeitos internos, é submetido a um carregamento externo, uma perturbação na distribuição de tensões é criada em torno dos defeitos, produzindo anomalias no deslocamento desta superfície.

Estas anomalias se evidenciam como um padrão de franjas no interferograma [31], conforme mostrado na Figura 25.

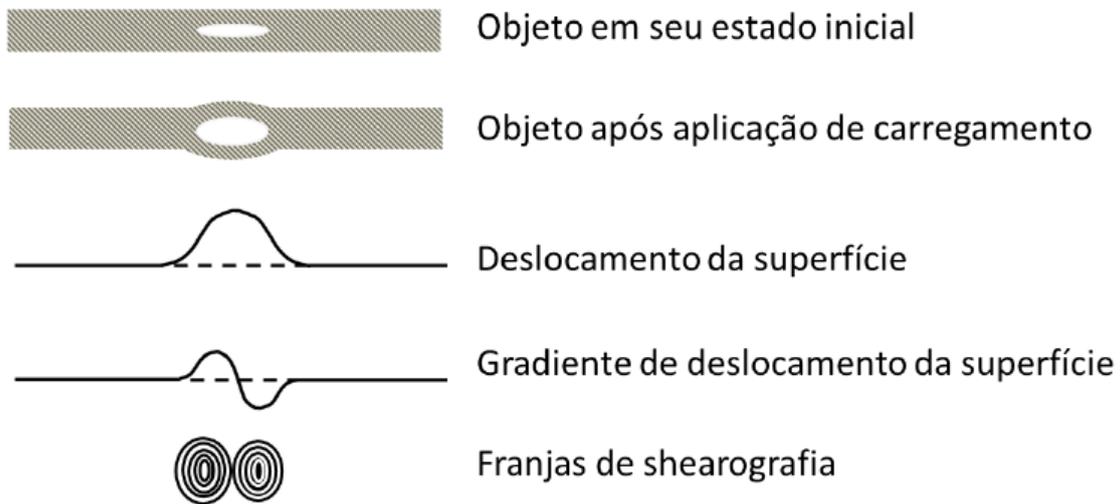


Figura 25 - Esquema ilustrativo do efeito do carregamento em shearografia [6].

A seguir, são descritos os tipos de carregamento utilizados em conjunto com a técnica da shearografia.

4.4.1 Carregamento mecânico

Quando submetidos ao carregamento mecânico, os materiais compósitos tendem a produzir um campo de deformações relativamente uniforme, entretanto a presença de defeitos internos na peça produz descontinuidades neste campo de deformações.

Existem diversas técnicas que podem ser utilizadas para introduzir esforços mecânicos em estruturas, como: tração, flexão, torção, vácuo e variação da pressão interna (mais comum em vasos de pressão e tubulações). A escolha da melhor técnica de carregamento depende das propriedades do material compósito, das características do corpo de prova a ser testado e das restrições do ambiente ou processo a que o componente inspecionado está sujeito. As Figura 26 e Figura 27 mostram, esquematicamente, a aplicação de carregamento mecânico por tração e vácuo, respectivamente.

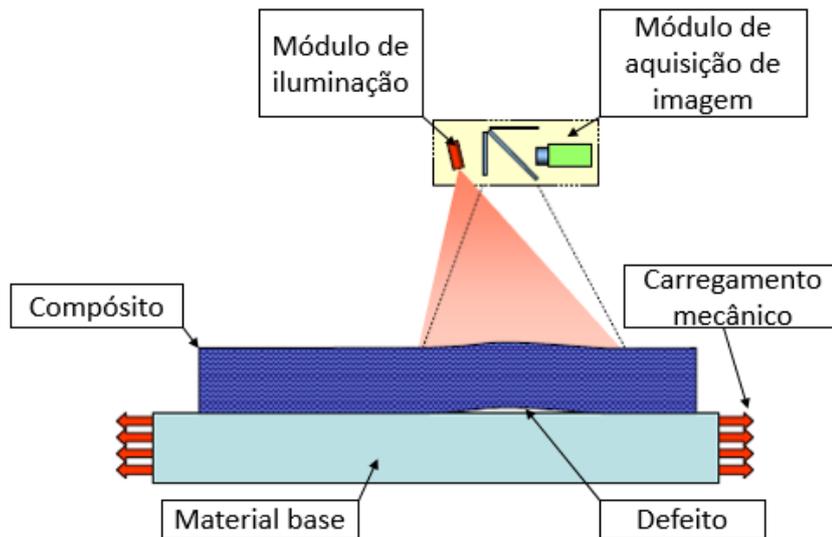


Figura 26 - Esquema ilustrativo de aplicação de tração como carregamento sobre uma peça revestida com material compósito. Adaptado de [14].

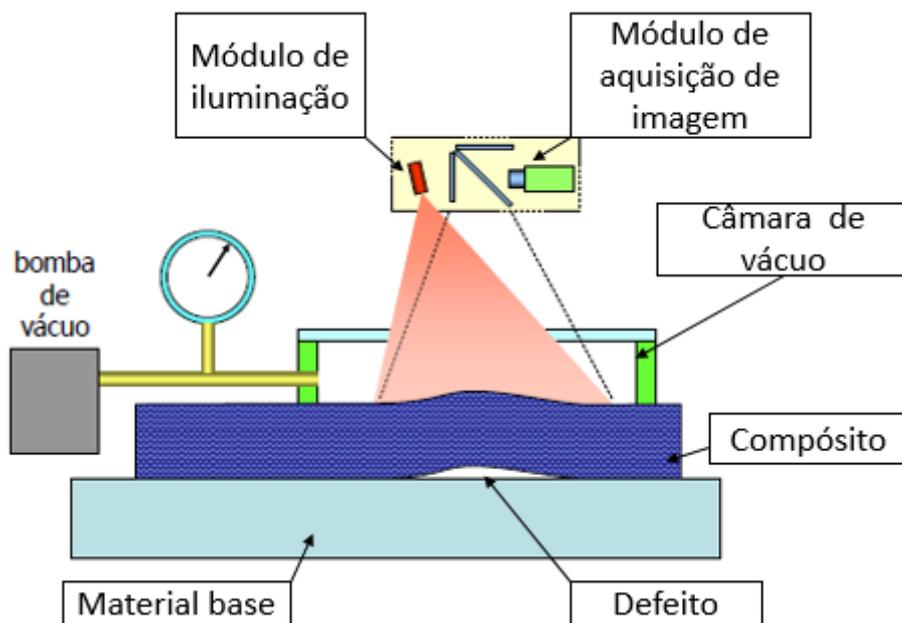


Figura 27 - Esquema ilustrativo da utilização de câmara de vácuo como módulo de carregamento sobre um revestimento de material compósito. Adaptado de [14].

Também é possível evidenciar defeitos através da aplicação de vibrações mecânicas no objeto. O carregamento vibracional é um carregamento mecânico que possui natureza dinâmica, diferentemente dos outros tipos de carregamentos mecânicos. Esta técnica baseia-se no fato de que os defeitos alteram localmente a rigidez do material, alterando a frequência de ressonância da área defeituosa. Ao atingir a frequência de

ressonância, a região onde está o defeito vibra com uma amplitude maior que as outras áreas do objeto, produzindo o padrão de franjas que revela a localização do defeito. Ao fazer uma varredura de frequências no material, diferentes modos de ressonância são obtidos e os defeitos são evidenciados [31] [32]. Para este tipo de carregamento, utilizam-se atuadores piezelétricos ou alto-falantes, como apresentado na Figura 28. No caso de alto-falantes, pode-se realizar inspeções de shearografia totalmente sem contato com a estrutura investigada.

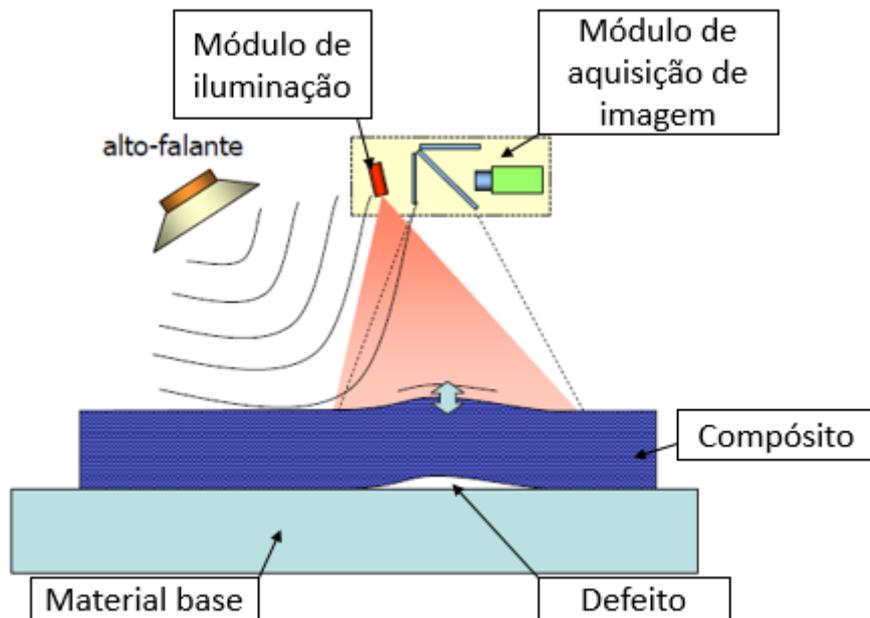


Figura 28 - Esquema ilustrativo da aplicação de alto-falante como módulo de carregamento sobre uma peça revestida com material composto. Exemplo de inspeção sem contato. Adaptado de [14].

4.4.2 Carregamento térmico

O material composto tende a se expandir por dilatação térmica quando exposto a uma fonte de calor. Na ausência de defeitos, a dilatação do material se apresenta como um campo de deformações relativamente homogêneo. Já na presença de defeitos no material, devido à concentração de calor nestes pontos, surgem discontinuidades no campo de deformações causadas pelo deslocamento não homogêneo da superfície. Esse efeito é ainda mais intenso quando há falhas de adesão entre um revestimento de material composto e o substrato metálico onde deveria estar aderido. Portanto, são as discontinuidades geradas no padrão de franjas que permitem localizar o defeito [6] [31].

A transferência de calor pode ser realizada por: irradiação térmica de uma lâmpada, condução de uma manta térmica, convecção através de um fluxo de um fluido ou indução eletromagnética. A Figura 29 ilustra um exemplo de aplicação de carregamento térmico para a shearografia.

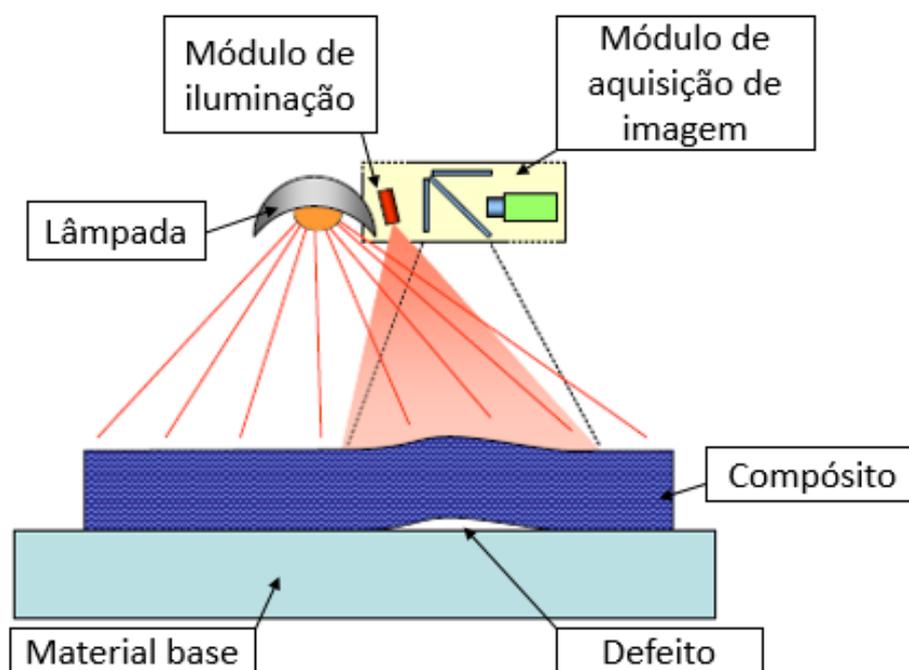


Figura 29 - Esquema ilustrativo da aplicação de carregamento térmico com a irradiação de uma lâmpada sobre um revestimento de material compósito. Adaptado de [14].

O aquecimento necessário para detecção do defeito através do sistema de shearografia depende de diversos fatores, como as propriedades do material, profundidade, tamanho e tipo do defeito. Variações de temperatura provocadas pelo carregamento térmico na ordem de 2°C a 5°C são usualmente utilizadas para a obtenção de franjas [6] [31].

Nos casos em que um revestimento de material compósito é aplicado sobre substratos metálicos, é também possível a utilização do método de carregamento por indução eletromagnética para inspeções com shearografia, que difere das outras formas de carregamento térmico pela forma como o calor é transferido para o corpo de prova. Nos métodos tradicionais, como por irradiação de uma lâmpada, o calor é aplicado sobre a superfície externa do revestimento compósito e se propaga ao interior do objeto por condução. Entretanto, este método pode apresentar dificuldades na identificação de defeitos mais profundos por shearografia, devido à baixa condutividade térmica dos

compósitos, que dificulta a deformação das camadas mais internas. Já o carregamento térmico por indução eletromagnética possui como vantagem o fato de que a transferência de calor ocorre na superfície do material metálico de base, próximo à interface com revestimento compósito. Assim, as deformações induzidas nas camadas internas são propagadas até a superfície externa do compósito, permitindo a identificação tanto de defeitos profundos quanto superficiais, em inspeções por shearografia. A Figura 30 ilustra um exemplo de aplicação de carregamento térmico por indução para a shearografia.

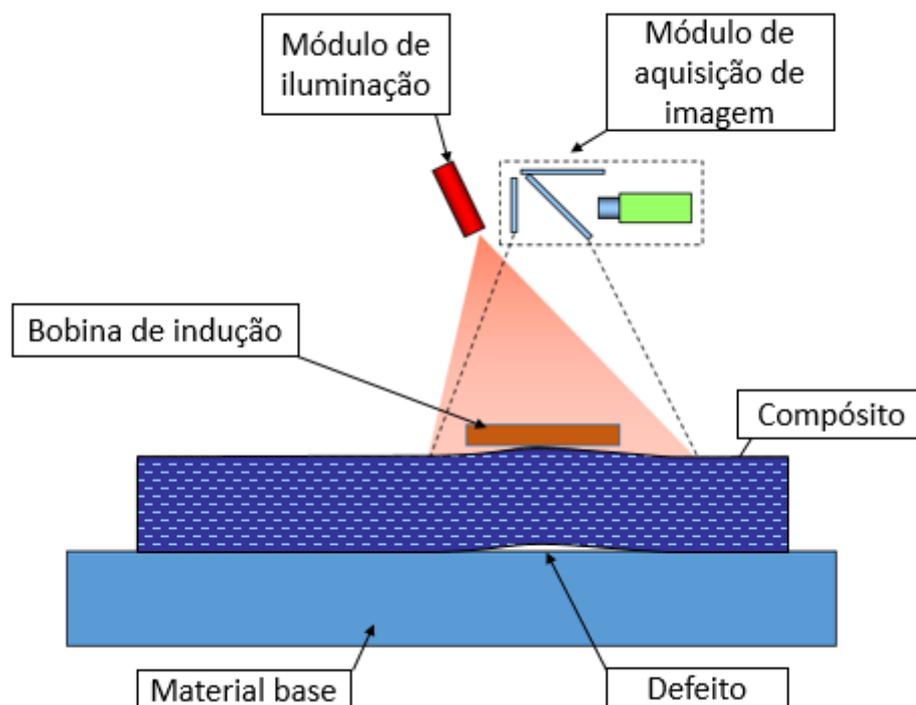


Figura 30 - Esquema ilustrativo da aplicação de carregamento térmico com a indução eletromagnética de uma bobina sobre um revestimento de material compósito.

A indução eletromagnética é uma técnica que está sendo estudada recentemente no LABMETRO/UFSC para aplicações em shearografia, apresentando resultados promissores na detecção de defeitos em revestimentos de materiais compósitos aplicados em estruturas metálicas.

5 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PROPOSTO

Conforme detalhado nos objetivos deste trabalho, o protótipo do sistema proposto foi desenvolvido para ser um sistema de shearografia compacto e de uso prático, que facilite a aplicação desta técnica na inspeção de tubos que se encontrem em campo e em ambientes restritos, com limitações de acesso e volume de trabalho, permitindo a operação por uma única pessoa. Na Figura 31 tem-se um exemplo da aplicação dos sistemas atuais de shearografia, desenvolvidos no LABMETRO/UFSC, neste tipo de ambiente.



Figura 31 - Inspeção de tubulação em ambiente de difícil acesso [34].

Para uma maior eficiência e eficácia no desenvolvimento do trabalho, foi utilizado o processo de desenvolvimento de produto conhecido como PRODIP [35], que é dividido em diferentes etapas de projeto, conforme ilustrado na Figura 32. Cada uma dessas etapas será desenvolvida a seguir.

É importante ressaltar que esta metodologia de projeto foi utilizada com objetivo de facilitar e organizar o desenvolvimento do trabalho e que os seus produtos estão sujeitos à validação experimental e a possíveis modificações, de acordo com o desempenho apresentado nos testes em laboratório.

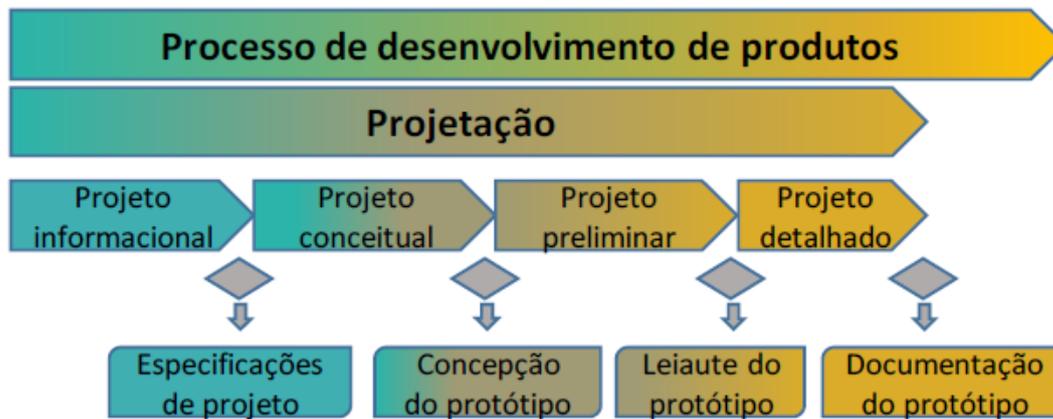


Figura 32 - Sequência do processo de desenvolvimento de produtos do modelo PRODIP. Adaptado de [35].

5.1 Projeto informacional

A etapa de projeto informacional, às vezes chamada de engenharia de sistema, visa criar a ideia do protótipo de sistema proposto. O principal resultado desta fase é a elaboração das especificações do projeto. O primeiro passo desse processo consiste em realizar a pesquisa bibliográfica, apresentada no capítulo anterior, e a pesquisa de mercado. Na pesquisa de mercado buscou-se por sistemas de shearografia compactos e de simples aplicação, os dois principais modelos encontrados foram os sistemas da Steinbichler [36] e da Dantec [37], mostrados nas Figura 33 e Figura 34.



Figura 33 - Sistema de shearografia Steinbichler [36].

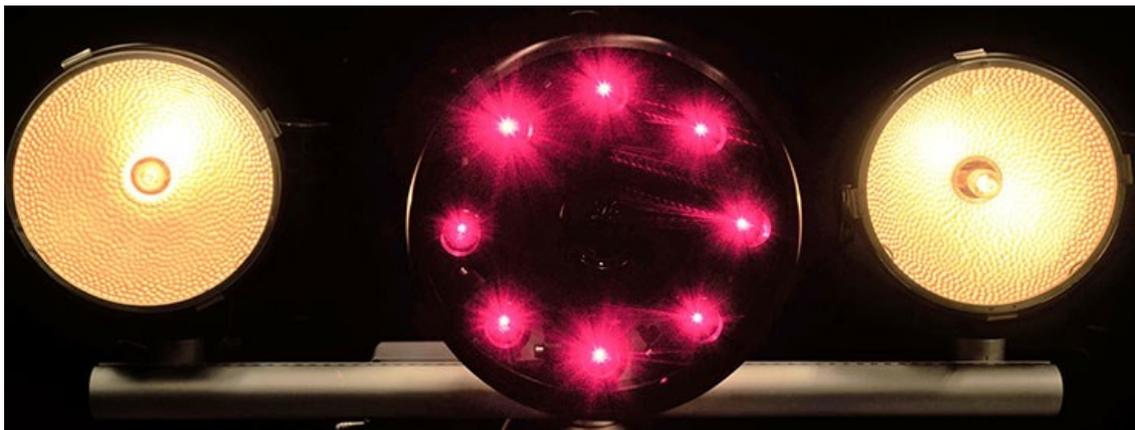


Figura 34 - Sistema de shearografia Dantec [37].

Com base nesta pesquisa e no conhecimento prévio da técnica de shearografia, foram listadas as características que o sistema como um todo deve ter para satisfazer as necessidades do projeto. Essas foram definidas como requisitos de projeto, e estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Requisitos de projeto.

	Requisitos de Projeto
1	Dimensões compactas
2	Portabilidade
3	Custo acessível
4	Transparência ao processo produtivo
5	Elevada produtividade
6	Robustez
7	Inovação
8	Operação por apenas uma pessoa

O sistema desenvolvido deve satisfazer os objetivos principais do projeto, isto é, ser um sistema compacto de shearografia. Para isso, um requisito essencial para o projeto deve ser a questão das dimensões compactas, para facilitar a usabilidade do equipamento em campo. Nesse mesmo sentido, é importante que o sistema desenvolvido seja portátil, pois, muitas vezes, as inspeções de shearografia são realizadas em ambientes remotos e até em plataformas *offshore*, o que demanda equipamentos leves, e de fácil transporte.

Os equipamentos utilizados em ensaios não destrutivos geralmente apresentam custos elevados, por seu alto nível tecnológico. Portanto, um diferencial do sistema

proposto consiste em projetá-lo tendo o baixo custo como requisito, pensando que o protótipo desenvolvido nesta dissertação possa ser, posteriormente, transformado em um produto e inserido no mercado. Também na questão financeira, foi definido como requisito de projeto a transparência ao processo produtivo. Isso se deve ao fato que, na indústria de petróleo e gás, as estruturas são projetadas para operação contínua e que eventuais interrupções no processo produtivo podem gerar prejuízos na ordem de milhões de reais. Logo, o sistema proposto deve ser capaz de realizar inspeções de shearografia sem provocar suspensões ou alterações na produção da planta.

Ainda nesse sentido, os contratos de inspeção por ensaios não destrutivos na indústria de P&G normalmente especificam grandes áreas (na ordem de dezenas de metros quadrados) que devem ser inspecionadas em curtos intervalos temporais, demandando, assim, equipamentos com elevada produtividade. Além disso, nas inspeções realizadas em campo, é comum a exposição do sistema a vibrações e a intempéries que podem dificultar e até inviabilizar a execução dos ensaios. Por isso, é necessário que o sistema desenvolvido seja robusto o suficiente para operar nestas condições.

Os elevados valores da indústria de P&G a tornam um ambiente altamente dinâmico e de elevada competitividade, portanto qualquer equipamento que almeje ser aplicado e prosperar nessa indústria deve apresentar diferenciais e ser inovador em relação à concorrência. O requisito de inovação também vai ao encontro dos objetivos dos programas de pós-graduação, que visam elevar o estado da arte das técnicas estudadas. Ainda considerando as condições de aplicações reais na indústria, foi definida como requisito de projeto a capacidade de operação por apenas uma pessoa, pois a capacitação de operadores e o seu transporte e acomodação nas plataformas *offshore* representam custos elevados na realização das inspeções, que podem ser minimizados no caso de o sistema desenvolvido necessitar de apenas um operador.

Nesta etapa do desenvolvimento, além dos requisitos de projeto, também foram definidos, em conjunto com os orientadores do trabalho, os requisitos de operação, que definem os aspectos da operação que devem ser atendidos pelo sistema proposto. A seguir estão listados os requisitos:

- Área de inspeção: Entre (50 x 50) mm² e (100 x 100) mm²;
- Corpos de prova: Tubos metálicos revestidos com MC com diâmetro de até 152,4 mm (6 polegadas);
- Ambiente de operação: Testes em laboratório e aplicações em campo.

O conjunto dos requisitos de projeto e dos requisitos de operação serve de orientação para o desenvolvimento do trabalho e devem ser considerados e revisitados ao longo das próximas etapas de desenvolvimento. Tendo concluído o levantamento destes requisitos para protótipo de um sistema compacto e de elevada produtividade de shearografia, dá-se prosseguimento para a próxima etapa do projeto.

5.2 Projeto conceitual

O projeto conceitual tem como objetivo encontrar os princípios de solução que satisfaçam as premissas de projeto. Estes princípios constituem-se em um conjunto de sistemas técnicos os quais, quando tem suas funções somadas, resultam na concepção do sistema final. Esta é uma fase criativa no processo de desenvolvimento de produtos, na qual são usados métodos de criatividade para gerar os princípios de solução anteriormente citados. O primeiro passo é a definição da função global do equipamento e desdobrá-la em funções elementares, que estão listadas abaixo:

- Função global: Realizar inspeções de shearografia;
- Funções elementares:
 - Carregar a estrutura;
 - Iluminar;
 - Adquirir imagens;
 - Fixar o equipamento na estrutura.

Como descrito nos objetivos do trabalho, a função principal do sistema desenvolvido é realizar inspeções de shearografia. Para concluir essa tarefa, faz-se necessário atender algumas etapas. Conforme descrito no capítulo 4, para realizar uma inspeção de shearografia, é preciso obter uma imagem antes de um carregamento e uma depois do carregamento, assim o sistema deve possuir uma forma de excitar a estrutura a ser analisada.

Por ser uma técnica de END que se baseia no princípio da interferometria *speckle*, a shearografia necessita de uma fonte de luz coerente para ser executada e de um sistema para formação e aquisição das imagens. Portanto, tais funções devem ser atendidas pelo sistema desenvolvido.

Por fim, também é preciso que exista uma estrutura para suportar todos esses subsistemas e fixá-los juntos ao corpo de provas a ser analisado, garantindo rigidez e

estabilidade para a realização da inspeção. Na Figura 35, tem-se um exemplo de uma inspeção de shearografia realizada em laboratório, na qual estão evidenciados os seus módulos.

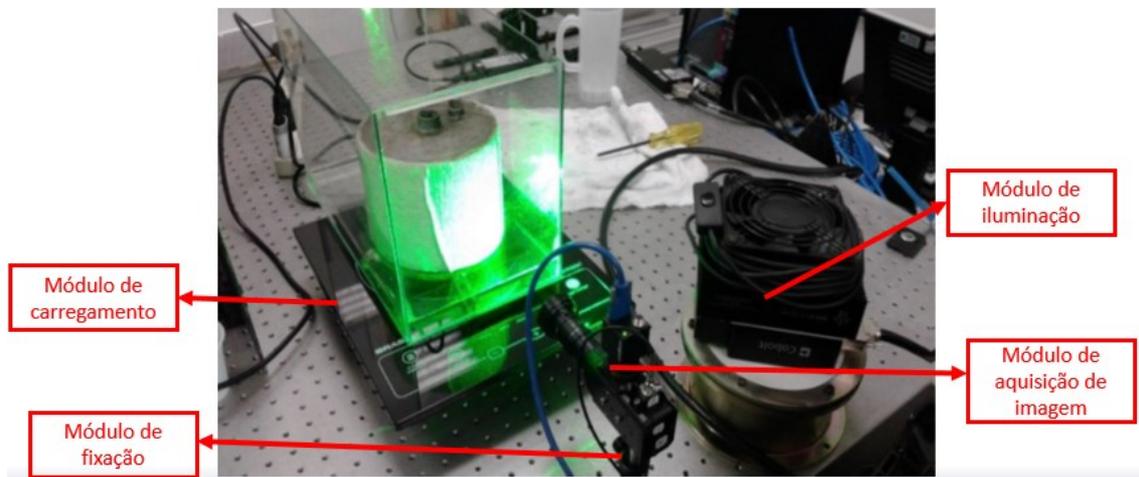


Figura 35 - Exemplo dos módulos de um sistema de shearografia atual. Adaptado de [38].

Com a definição das funções elementares, foram propostos diferentes princípios de solução para cada uma delas. Estes princípios estão listados na Tabela 3, que é conhecida como matriz morfológica [35].

Tabela 3 - Matriz morfológica.

Função global	Funções elementares	1	2	3
Realizar inspeções de shearografia	Carregar a estrutura	Indução eletromagnética	Irradiação	Carregamento mecânico
	Iluminar	Laser baixa potência (diodos)	Laser alta potência (DPSS)	
	Adquirir imagem	Cabeçote N4f	Cabeçote One-shot	
	Fixar o equipamento	Elástico de amarração	Fixação manual	Fixação magnética

Com todos os princípios de solução listados na matriz morfológica, foram geradas três possíveis concepções inéditas (C1, C2, C3) para o sistema que estão listadas na Tabela 4. A geração destas concepções tem por objetivo facilitar a posterior etapa de

avaliação e escolha da melhor solução. Esta ferramenta é especialmente útil para sistemas que possuem muitas funções elementares, ou que tenham muitos princípios de solução propostos para cada função. Dessa forma, em vez de uma avaliação individual de cada uma das possibilidades de combinações dos princípios, define-se um número de concepções e serem geradas e, para cada uma delas, combina-se os princípios que tenham maior probabilidade de funcionamento em conjunto.

Tabela 4 - Concepções geradas.

	Carregar a estrutura	Iluminar	Adquirir imagem	Fixar o equipamento
C1	Irradiação	Laser alta potência (DPSS)	Cabeçote One-shot	Elástico de amarração
C2	Indução eletromagnética	Laser baixa potência (diodos)	Cabeçote One-shot	Fixação manual
C3	Carregamento mecânico	Laser baixa potência (diodos)	Cabeçote N4f	Fixação magnética

Cada um dos princípios de solução apresentados para as funções elementares possui vantagens e desvantagens. Os diferentes sistemas de carregamento foram abordados no item 4.4 e os sistemas de aquisição de imagem foram detalhados no item 4.3.

Sobre os sistemas de iluminação, um laser do tipo DPSS (*Diode-Pumped Solid-State*) possui uma elevada intensidade de iluminação, mas apresenta um custo elevado. Já o laser diodo possui uma potência comparativamente menor, mas um custo mais baixo. Na questão dos sistemas de fixação, a fixação manual (segurando diretamente o equipamento) tem a vantagem de ser a mais rápida, enquanto a fixação magnética oferece maior rigidez, e os elásticos de amarração apresentam-se como solução intermediária.

Para facilitar a escolha da melhor concepção, foi utilizada uma matriz que relaciona os requisitos de projeto, atribuindo um grau de importância a cada um, com as diferentes concepções geradas. Uma concepção é adotada como referência e as demais são comparadas a ela. Para cada um dos requisitos de projeto, é avaliado se a concepção é melhor, pior ou igual à referência, multiplicando essa vantagem ou desvantagem pelo peso do requisito analisado. Por fim, os valores são somados e obtém-se a concepção que melhor atende aos requisitos de projeto. Esse método é conhecido como matriz de decisão

e está detalhado na Tabela 5, os valores apresentados foram definidos em conjunto com os orientadores do trabalho e com a equipe de projeto do laboratório.

Tabela 5 - Matriz de decisão.

Requisitos de Projeto	Peso	C1	C2	C3
Dimensões compactas	2	R e f e r ê n c i a	1	-1
Portabilidade	2		1	0
Custo acessível	1		0	0
Transparência ao processo produtivo	2		0	-1
Elevada produtividade	2		1	-1
Robustez	2		-1	1
Inovação	2		1	0
Operação por apenas uma pessoa	1		1	0
Total			0	7

Conforme a Tabela 5, a concepção escolhida foi a seguinte:

- Carregar a estrutura: indução eletromagnética;
- Iluminar: laser diodo;
- Adquirir imagem: cabeçote one-shot;
- Fixar o equipamento: fixação manual.

Como citado anteriormente, o produto desta metodologia serve como uma concepção inicial, sendo que os conceitos aqui escolhidos serão avaliados experimentalmente nas próximas etapas do projeto e poderão sofrer alterações de acordo com os resultados dos testes em laboratório. Com a concepção escolhida, foi gerado um esboço da solução, mostrado na Figura 36.

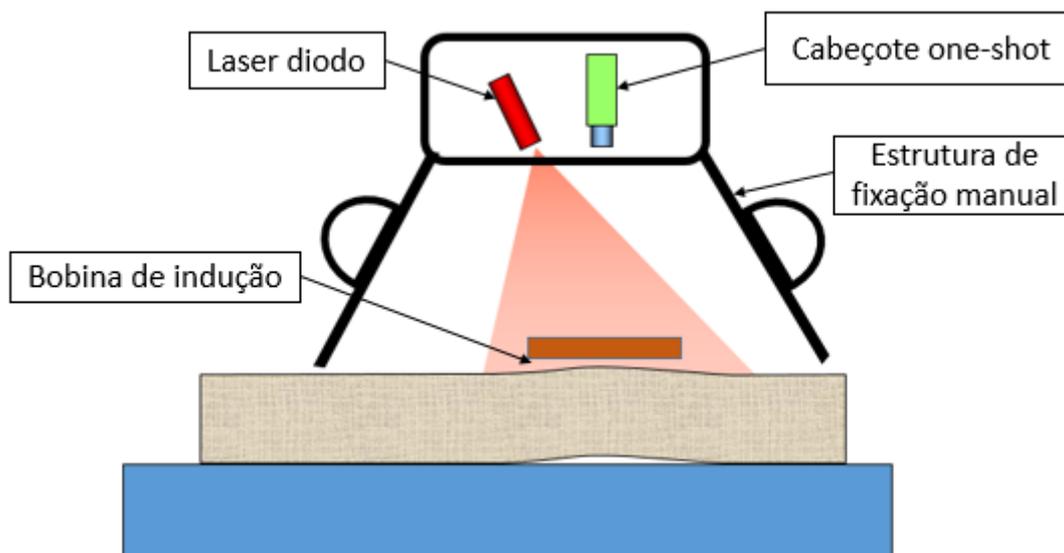


Figura 36 - Esboço da concepção gerada.

Após a escolha da concepção e a geração do seu esboço inicial, foram definidas as etapas de funcionamento do sistema, que são listadas na Tabela 6.

Inicialmente, deve-se posicionar o sistema sobre a estrutura a ser inspecionada, e acionar a fonte de iluminação sobre a região de testes. Após isso, é realizado o carregamento da estrutura através da bobina de indução, é capturada a imagem de referência e, durante o processo de resfriamento por convecção natural do ar, é capturada uma segunda imagem. Optou-se por realizar a captura da imagem durante o processo de resfriamento pois, dessa forma, não é necessário mover a estrutura depois que o processo de inspeção é iniciado. Em seguida, é feito o processamento das imagens e, então, é obtido o resultado.

Tabela 6 - Etapas de funcionamento.

	Etapas
1	Posicionar o equipamento
2	Iluminar
3	Carregar a estrutura
4	Capturar imagem de referência
5	Capturar imagem durante o resfriamento
7	Processamento de imagens
8	Resultado

Com a concepção do sistema e as suas etapas de funcionamento definidas, é dado início ao projeto preliminar, onde os princípios serão testados.

5.3 Projeto preliminar

O projeto preliminar é a etapa na qual a concepção gerada no projeto conceitual é testada e o projeto mecânico do sistema final é elaborado. Nessa fase, os componentes do equipamento são dimensionados e o leiaute final é concebido, pensando nas etapas subsequentes de fabricação e testes.

Para facilitar o entendimento, o desenvolvimento deste tópico será dividido de acordo com os módulos do sistema de shearografia.

5.3.1 Módulo de carregamento

De acordo com a etapa de projeto conceitual, o tipo de carregamento escolhido para o desenvolvimento deste sistema foi a indução eletromagnética. Como detalhado no item 4.4.2, o carregamento térmico por indução consiste no aquecimento de materiais condutores de eletricidade por indução eletromagnética, através da dissipação de energia associada a correntes parasitas (também conhecidas como *Eddy currents*).

A variação do campo magnético pode ser gerada pela movimentação relativa entre um ímã e o material condutor ou pela utilização de circuitos elétricos de corrente alternada. Neste último caso, o material condutor é colocado próximo a uma bobina ou solenoide (Figura 37) ou no interior de um solenoide, que gera um campo magnético variável quando percorrido por uma corrente elétrica alternada [40].

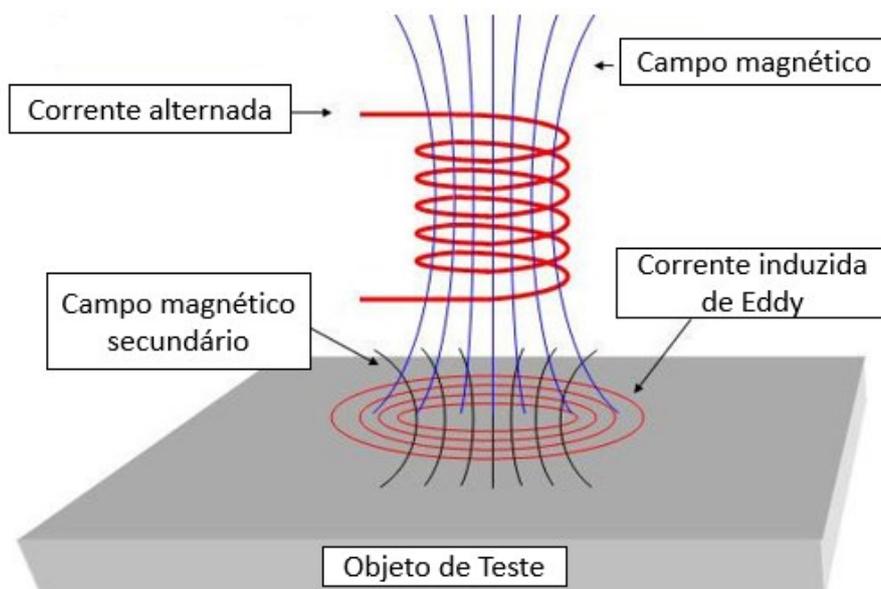


Figura 37 - Ilustração da corrente parasita (*Eddy currents*) induzida através da variação das linhas do campo magnético que são produzidas pela corrente alternada aplicada ao solenoide. Adaptado de [41].

A grande vantagem do método de indução, diferentemente das demais formas de carregamento térmico, é que a transferência de calor ocorre na superfície do material metálico de base, na interface com revestimento compósito. Conseqüentemente, as deformações induzidas nas camadas internas propagam-se até a superfície externa do compósito, possibilitando a identificação tanto de defeitos profundos quanto superficiais durante inspeções por shearografia.

Dentro dos projetos do LABMETRO/UFSC, essa forma de carregamento já foi estudada em alguns trabalhos recentes, por Figueredo [38] e Siebert [42], apresentando bons resultados na detecção de defeitos em revestimentos de MC por shearografia.

Para o desenvolvimento deste módulo, foi necessária a escolha de uma fonte de corrente. Optou-se por utilizar como base um fogão de indução comercial, já utilizado em outros trabalhos dentro do projeto SHIC. O equipamento foi desmontado para a análise dos componentes internos que formam o seu sistema de aquecimento. Na Figura 38, é possível observar a sua bobina de indução.



Figura 38 - Bobina de indução do fogão.

Esta bobina é composta por um enrolamento de 30 voltas de fios de cobre com diâmetro de 2,5 mm, e opera com uma corrente (após passar pelo retificador) da ordem de 50 A e uma frequência da ordem de 25 kHz. Esses valores são considerados adequados para realizar o aquecimento dos corpos de provas a serem testados, com até 10 mm de espessura da camada de material compósito. Para verificar este aquecimento, a bobina foi acionada sobre um tubo metálico de 152,4 mm (6 polegadas) de diâmetro revestido com uma camada de MC com aproximadamente 5 mm de espessura e utilizada uma câmera termográfica para verificar o seu desempenho. A Figura 39 ilustra este teste, sendo que o acionamento da bobina por poucos segundos (entre 5 s e 10 s) sobre o CP foi suficiente para gerar um incremento de temperatura adequado para a realização de inspeção por shearografia.



Figura 39 – Imagem termográfica da bobina de indução aquecendo um CP.

Dentro do projeto SHIC, também foi desenvolvida e construída, através de impressão 3D em polímero, uma estrutura de suporte e encapsulamento da bobina, para garantir uma maior segurança e ergonomia na realização dos testes, conforme ilustrado na Figura 40.



Figura 40 - Estrutura de suporte e encapsulamento da bobina de indução.

5.3.2 Módulo de iluminação

De acordo com os resultados do projeto conceitual, o sistema de iluminação a ser utilizado no desenvolvimento deste trabalho é um laser de baixa potência, do tipo diodo. Esta escolha deve-se principalmente pelo fato que este laser apresenta um custo relativamente baixo, na ordem de 250 dólares, e dimensões e massa reduzidos, enquanto ainda consegue fornecer uma iluminação adequada para as inspeções de shearografia.

Analisando alguns trabalhos já apresentados, e verificando as opções de lasers disponíveis no LABMETRO/UFSC, que atendem os requisitos descritos acima, optou-se pelo modelo de laser diodo com comprimento de onda λ igual a 532 nm (cor verde) e 40 mW de potência. Na Figura 41, tem-se uma imagem deste laser.



Figura 41 - Laser utilizado [44].

O laser escolhido é uma solução compacta, disponibilizada comercialmente em um encapsulamento metálico para facilitar a montagem. Como o ângulo de divergência total do feixe é pequeno, valor típico de 12 mrad, duas lentes asféricas com comprimento focal 2 mm foram selecionadas para promover a expansão.

Para facilitar a utilização deste laser nas inspeções de shearografia, optou-se por utilizar uma estrutura desenvolvida por Silva [5] que contempla um mecanismo de ajuste translacional radial do laser em relação às duas lentes de expansão, possibilitando corrigir pequenos desalinhamentos intrínsecos dos processos de fabricação dos componentes ópticos e mecânicos. Desta forma, o correto posicionamento da iluminação na região de interesse da estrutura a ser inspecionada e um melhor aproveitamento da luz são obtidos. Este sistema de ajuste projetado é composto por um duplo acoplamento excêntrico, no qual a combinação de movimentos dos excêntricos gera tanto o cancelamento como a soma dos efeitos de desalinhamento [5]. A Figura 42 mostra os componentes desta estrutura de iluminação. Além de garantir o suporte e o alinhamento do laser, esta estrutura metálica também contribui para a sua estabilidade térmica, garantindo que ele trabalhe dentro da faixa ótima de operação, aumentando, assim, a sua vida útil.

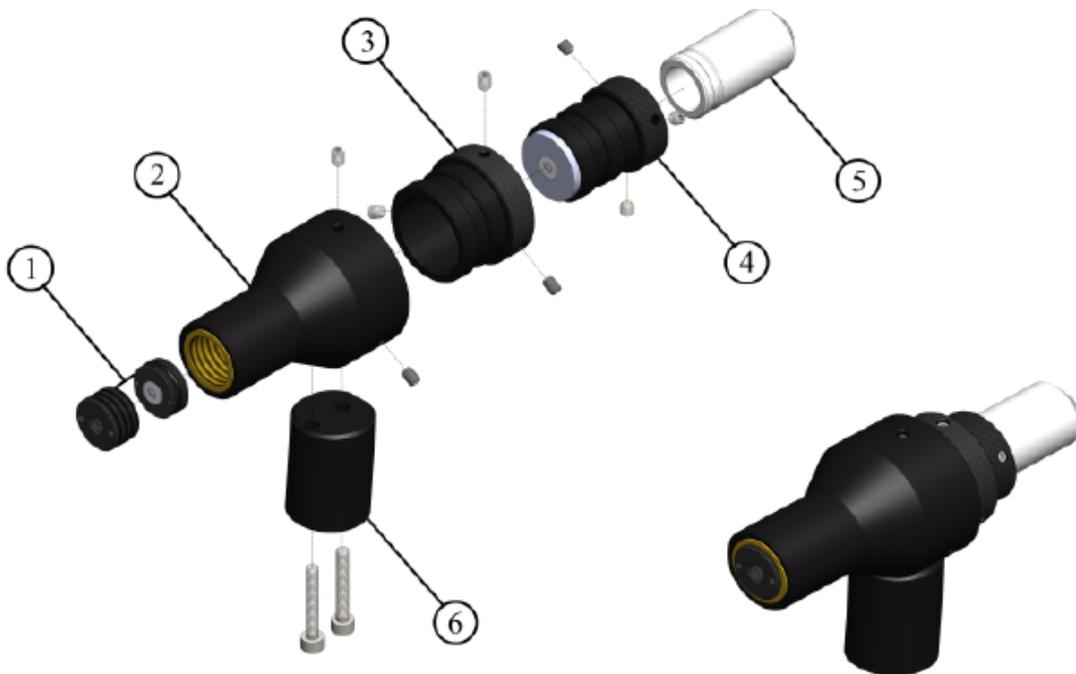


Figura 42 - Sistema de iluminação laser. (1) Suporte da lente de expansão frontal; (2) Carcaça externa; (3) Excêntrico externo; (4) Excêntrico interno; (5) Suporte do conector laser; (6) Barra de fixação [5].

5.3.3 Módulo de aquisição de imagens

O módulo de aquisição de imagens é basicamente composto por uma câmera, um interferômetro, um gerador de franjas portadoras e um conjunto de lentes para a formação da imagem.

A câmera utilizada possui resolução de 5 MP. Esta câmera já foi empregada em outros trabalhos do LABMETRO/UFSC, obtendo resultados satisfatórios na captura de imagens de shearografia. Na Figura 43, tem-se uma imagem da câmera utilizada.



Figura 43 - Câmera utilizada [45].

Conforme definido na etapa de projeto conceitual, o interferômetro e o dispositivo gerador de franjas portadoras utilizado foram baseados no sistema desenvolvido por Barrera [27], conhecido como cabeçote de shearografia instantânea multidirecional, ou simplesmente, cabeçote one-shot. Este sistema de shearografia se baseia no princípio da determinação de fase por métodos espaciais, abordado no item 4.3.2. Na Figura 44, tem-se um esquema ilustrando essa configuração óptica, composta por uma máscara com três aberturas para geração das franjas portadoras e de três prismas (W1, W2 e W3) para os deslocamentos laterais da imagem.

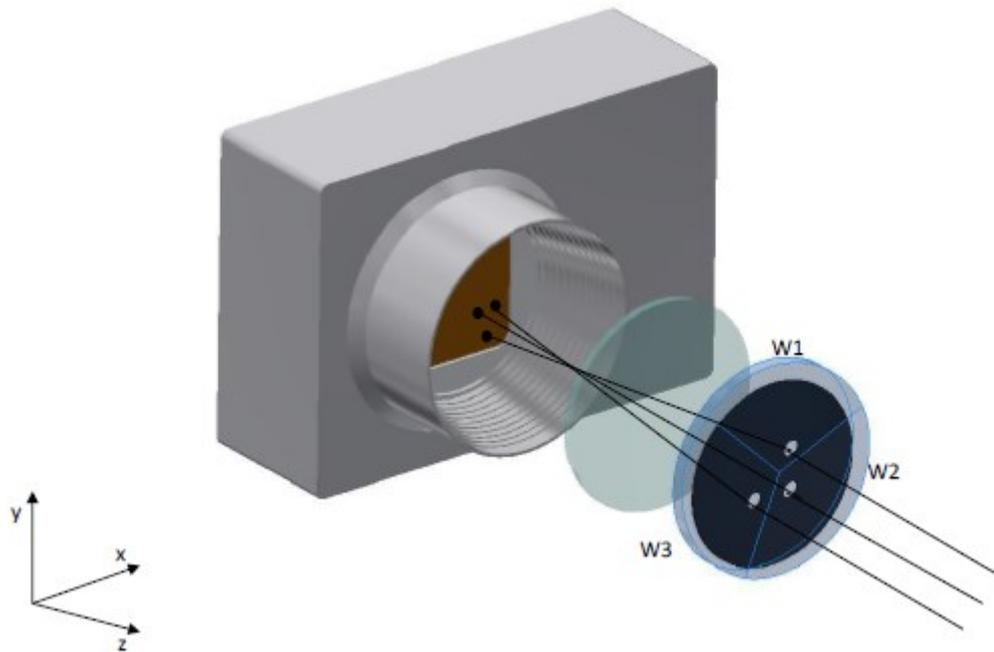


Figura 44 - Configuração óptica do cabeçote de shearografia one-shot [6].

Na Figura 45, tem-se uma imagem ilustrando a montagem experimental do cabeçote one-shot desenvolvido por Barrera, evidenciando a câmera, o dispositivo de deslocamento lateral e geração de franjas portadoras e a lente.



Figura 45 - Montagem experimental do cabeçote one-shot.

Nessa etapa, para verificar o campo de visão do sistema, a distância entre o cabeçote e o corpo de provas foi definida em 120 mm, e foram testadas duas opções de lente frontal. Uma lente com comprimento focal $f = 8,0$ mm gerou um campo de visão de aproximadamente (60×60) mm², e uma lente com comprimento focal de $f = 3,5$ mm gerou um campo de visão de aproximadamente (110×110) mm². Pelo fato de os corpos

de provas utilizados nos testes em laboratório possuem pequenas dimensões, optou-se por utilizar a lente de $f = 8,0$ mm para realização dos ensaios descritos no item a seguir.

5.3.4 Testes preliminares

Com os módulos de carregamento, iluminação e aquisição de imagens definidos, deu-se início à etapa de testes preliminares, para validar experimentalmente a escolha destes sistemas. Para realização dos testes, os componentes foram montados em uma mesa óptica e foram utilizados diferentes corpos de provas para verificação do desempenho do sistema. Na Figura 46, tem-se uma imagem da montagem experimental do sistema e do primeiro corpo de provas utilizado: uma placa metálica revestida de MC contendo dois furos na parede como defeitos.

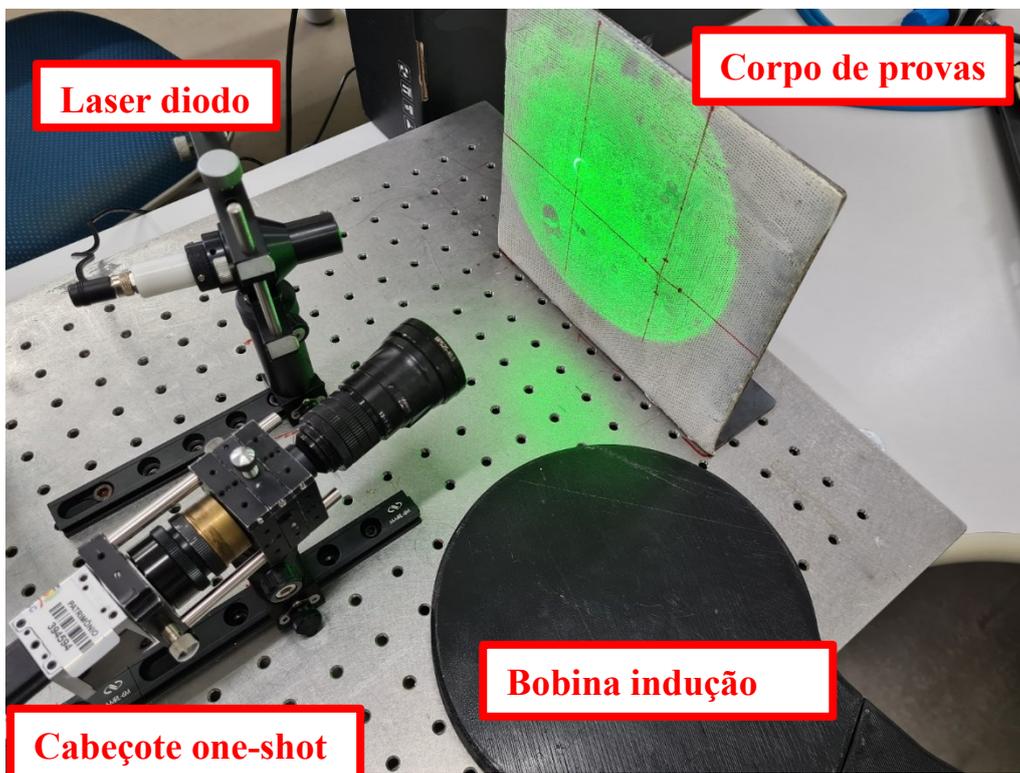


Figura 46 - Teste preliminar do sistema em uma placa metálica revestida com MC.

O procedimento para a realização do ensaio está de acordo com o que foi definido nas etapas de funcionamento do sistema. Após a fixação dos componentes e iluminação do CP, foi realizado o aquecimento com a bobina de indução e capturada uma imagem de referência; então, durante o processo de resfriamento por convecção natural do ar, foi

capturada uma segunda imagem. Este procedimento será mantido nos demais testes descritos neste trabalho.

Na Figura 47, tem-se uma imagem do resultado deste teste, no qual percebe-se que o sistema foi capaz de detectar os dois defeitos do CP, representado pelos dois padrões de franjas características da shearografia presentes na imagem.

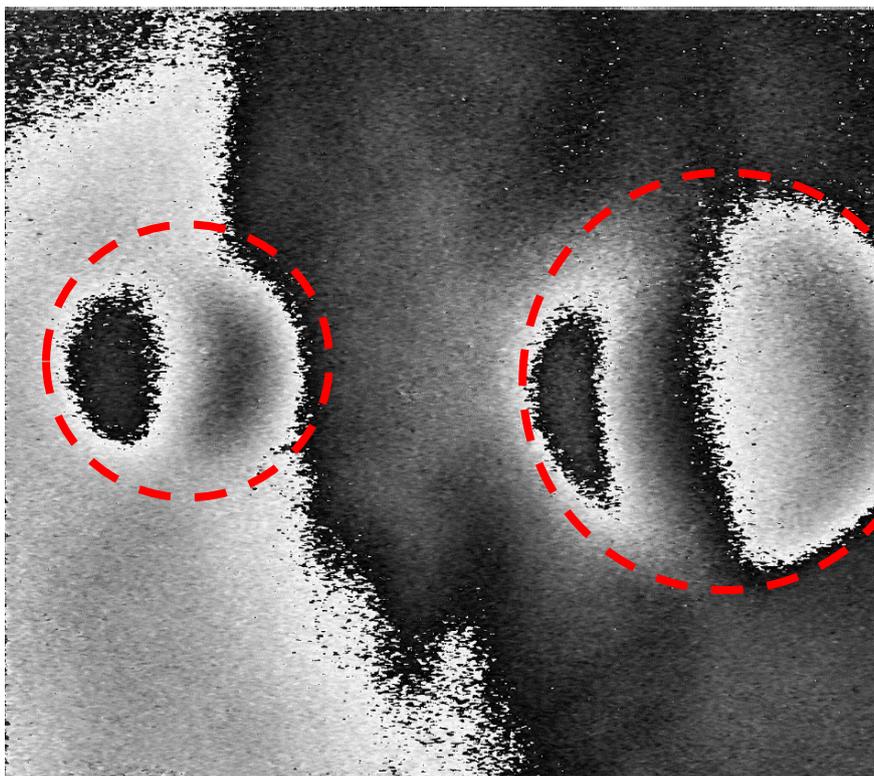


Figura 47 - Resultado da inspeção na placa revestida com MC.

Após este resultado satisfatório, o sistema foi testado com outro corpo de provas, neste caso, um vaso de pressão metálico revestido com MC, contendo um defeito inserido na interface entre o metal e o compósito. A Figura 48 mostra uma imagem do *setup* deste teste.

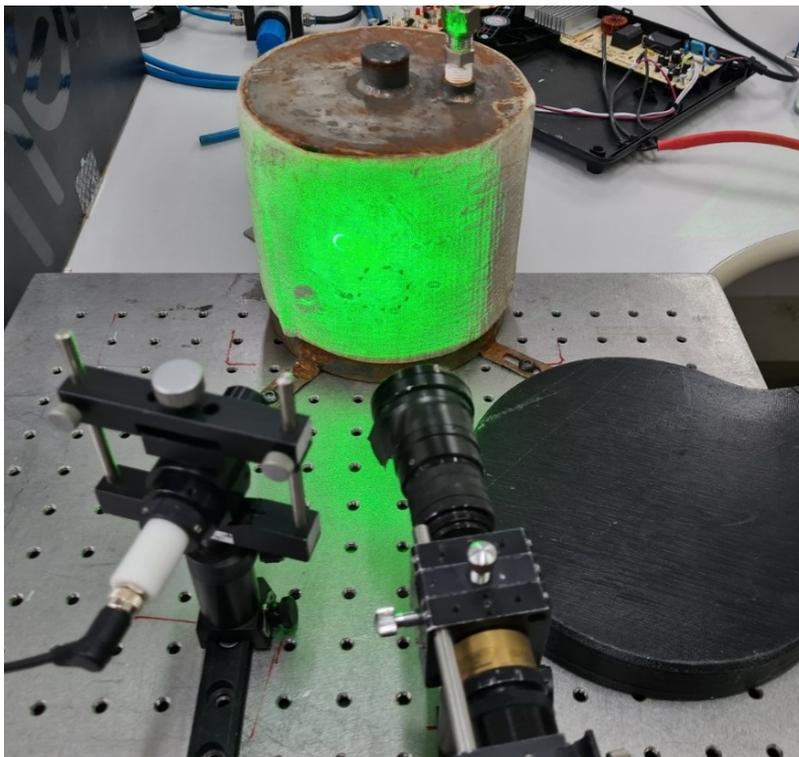


Figura 48 - Teste preliminar do sistema em um vaso de pressão revestido com MC.

A Figura 49 mostra o resultado deste teste, onde pode-se ver que o sistema conseguiu identificar o defeito no CP, representado pelas franjas em formato borboleta detacadas na região central inferior da imagem.

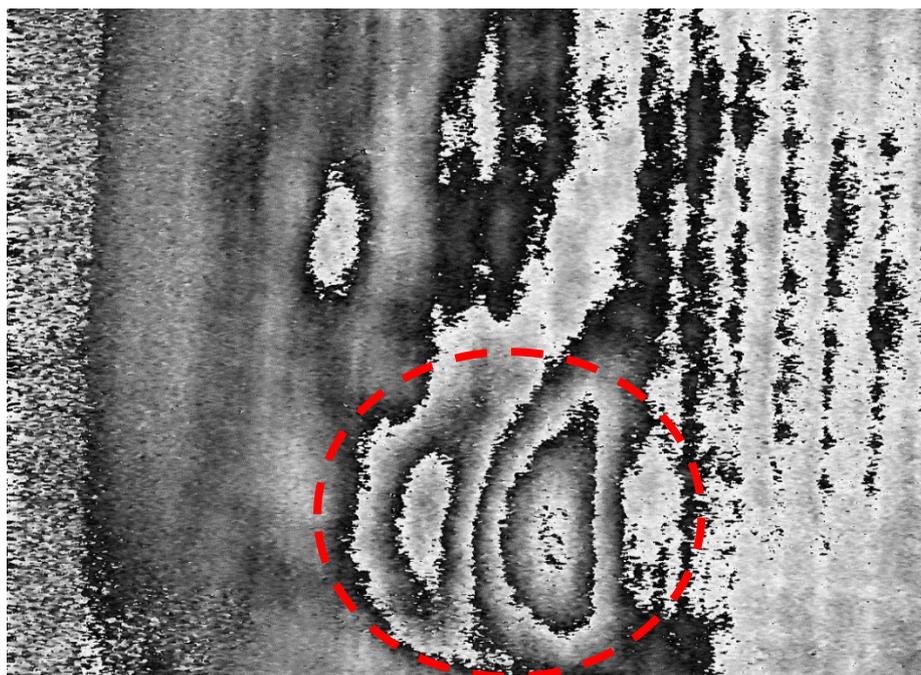


Figura 49 - Resultado da inspeção no vaso de pressão revestido com MC.

Por fim, o sistema foi testado em um terceiro corpo de provas, um tubo metálico de 152,4 mm (6 polegadas) revestido com MC, contendo um furo na parede como defeito. A Figura 50 apresenta uma imagem da bancada deste teste.

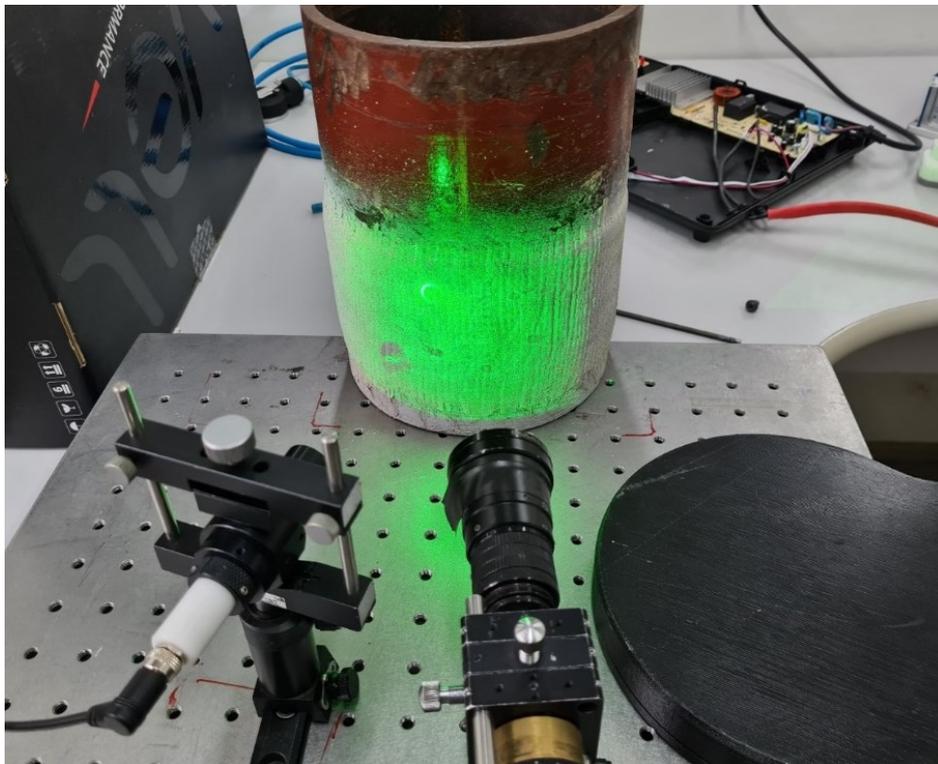


Figura 50 - Teste preliminar do sistema em um tubo metálico revestido com MC.

Na Figura 51, mostra-se o resultado deste teste, na qual percebe-se que o sistema conseguiu claramente evidenciar o defeito, indicado pelo padrão de franjas borboleta no centro da imagem.

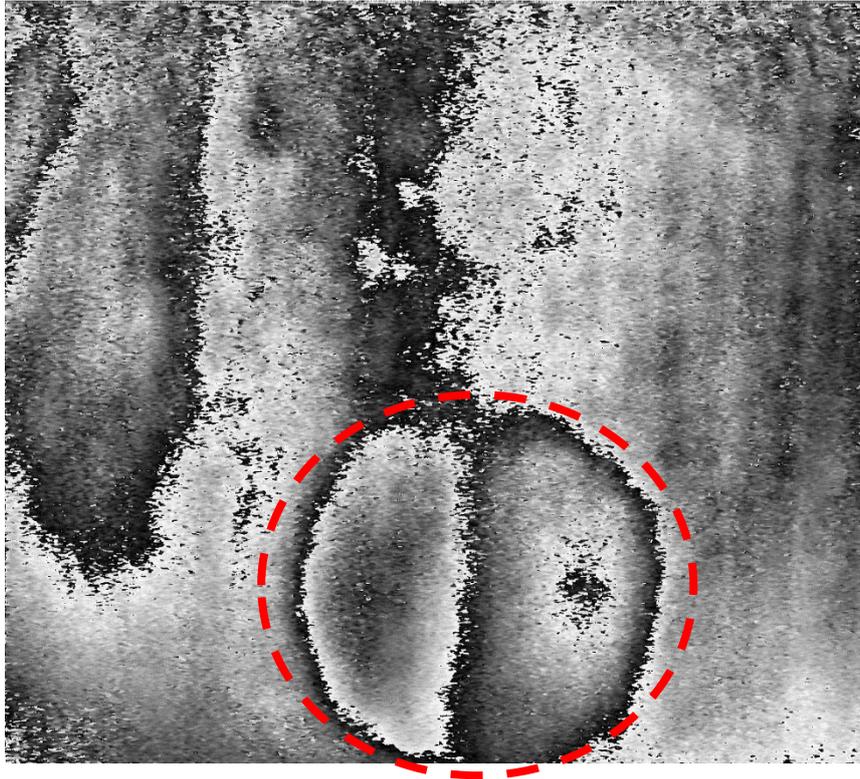


Figura 51- Resultado da inspeção no tubo metálico revestido com MC.

5.3.5 Módulo de fixação

Com os resultados satisfatórios dos testes dos princípios, deu-se início à etapa de projeto mecânico do módulo de fixação. Para isto, foi utilizado o software de CAD Autodesk Inventor. Este módulo consiste na estrutura que vai suportar os demais componentes do sistema, além de permitir o manuseio do sistema pelo operador e a fixação do equipamento sobre o corpo de provas a ser inspecionado.

O primeiro passo para o desenvolvimento do projeto mecânico do módulo de fixação foi um processo de engenharia reversa dos módulos de carregamento, iluminação e aquisição de imagem, validados experimentalmente no item anterior. Foram realizadas medições para obter as dimensões destes componentes e as posições relativas entre eles e os corpos de provas que foram inspecionados. A Figura 52 apresenta o resultado desta etapa, em que foi gerado um modelo CAD da montagem experimental dos testes dos princípios. Esta modelagem contém o posicionamento relativo entre os módulos de aquisição de imagens e de iluminação em relação ao corpo de provas. Também foram levados em consideração a expansão do laser e o campo de visão da câmera, para garantir que estrutura projetada não obstrua o processo de inspeção.

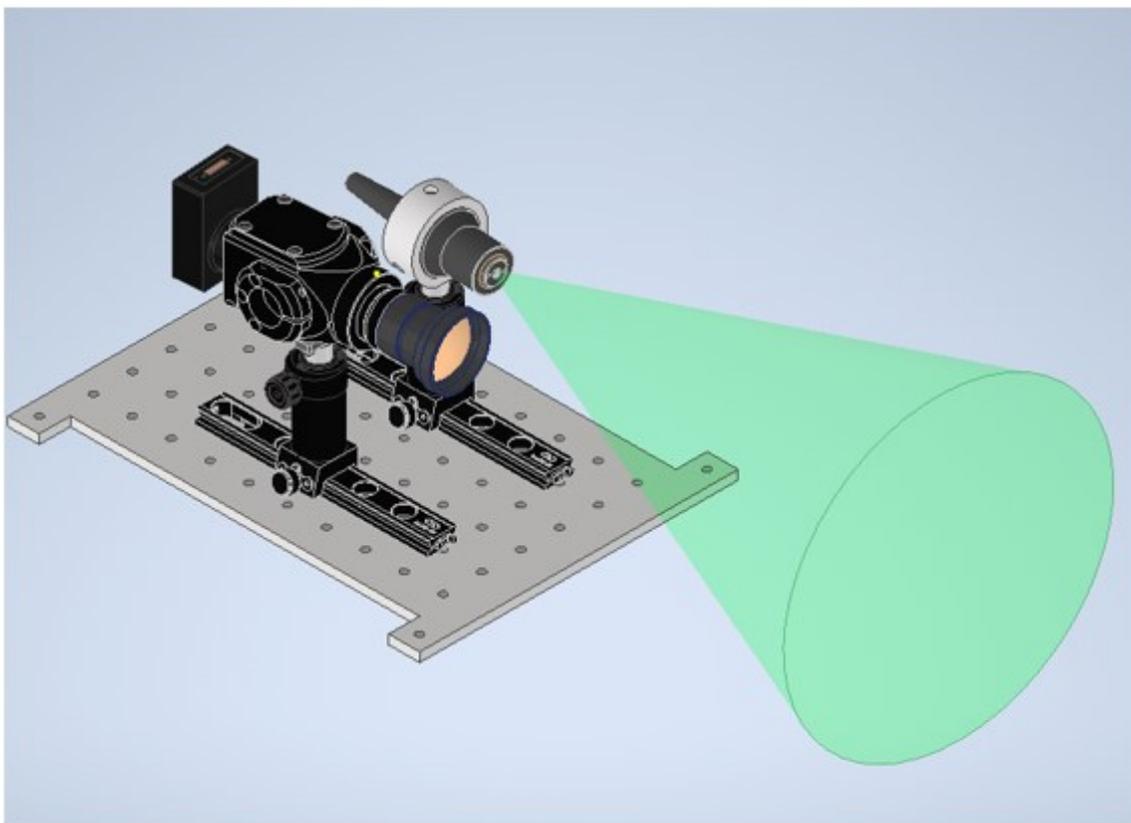


Figura 52 - CAD da montagem experimental dos testes dos princípios.

Neste momento, foi definido que os módulos de iluminação e aquisição de imagens seriam posicionados na região central da estrutura, e que o módulo de carregamento seria posicionado em uma área adjacente. Esse posicionamento mostrou-se vantajoso por simplificar a estrutura, eliminando a necessidade de um sistema de movimentação da bobina (para aplicar o carregamento e depois removê-la da área de inspeção). Outra vantagem se deu no aumento da produtividade do sistema como um todo, pois simultaneamente à aquisição das imagens na área de inspeção, a bobina de indução pode realizar o carregamento da área subsequente.

Conforme definido nos requisitos de operação, o módulo de fixação foi projetado para acoplar em tubulações de diâmetro de até 152,4 mm (6 polegadas) revestidas com material compósito. Para garantir um apoio rígido e sem movimentação da estrutura em relação ao CP, optou por utilizar um apoio em 3 pontos não coplanares, conforme mostra a Figura 53.

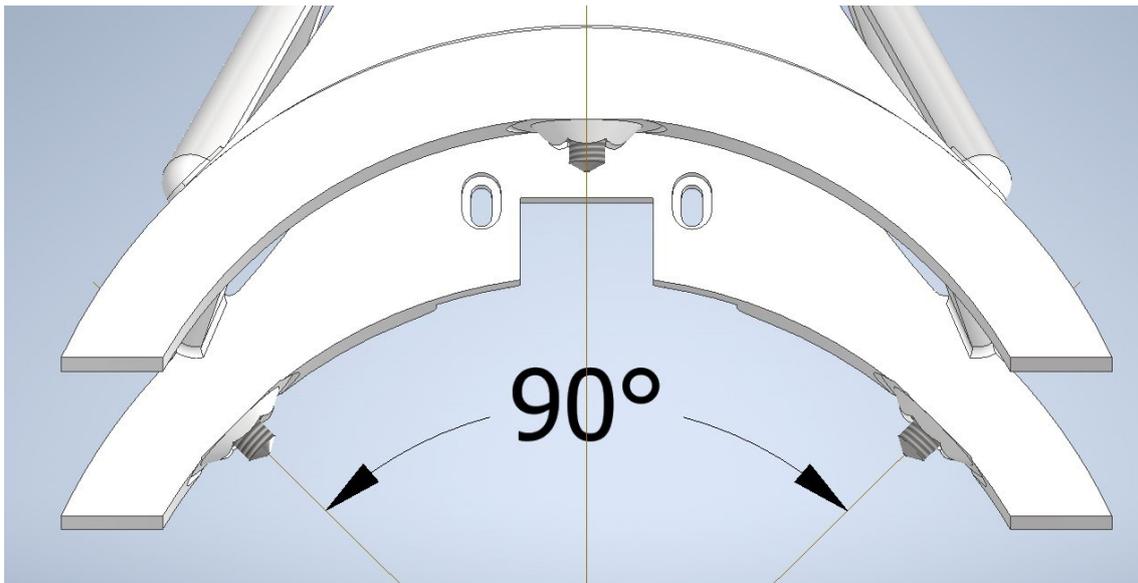


Figura 53 - Sistema de apoio em 3 pontos da estrutura sobre o CP.

O processo de desenvolvimento do projeto mecânico da estrutura do módulo de fixação foi iterativo, no qual foram apresentadas versões iniciais e intermediárias aos orientadores do trabalho e à equipe de projeto, que contribuíram para a definição da versão final da estrutura, apresentada na Figura 54. Para aumentar a rigidez estrutural do protótipo, foram aplicadas estruturas em forma de treliça no seu vão central, posicionadas de forma a não obstruir o campo de visão do sistema. Já para garantir a ergonomia e a facilidade de movimentação por parte do operador, foram posicionadas alças nas laterais da estrutura.

Aqui é importante ressaltar que, durante o projeto mecânico da estrutura, foi definido que o processo de fabricação da mesma seria através de manufatura aditiva (impressão 3D em polímero), o que motivou uma maior liberdade criativa, pelo fato desta técnica permitir a fabricação de estruturas complexas a um custo relativamente baixo, comparada a outros métodos de fabricação. Além disso, as novas técnicas e equipamentos de impressão 3D têm produzido estruturas com massas reduzidas e com propriedades mecânicas adequadas para diversas aplicações na indústria. Assim, neste trabalho, optou-se por explorar as aplicações desta técnica de fabricação na área de shearografia, algo até então pouco explorado nos trabalhos desenvolvidos no LABMETRO/UFSC.

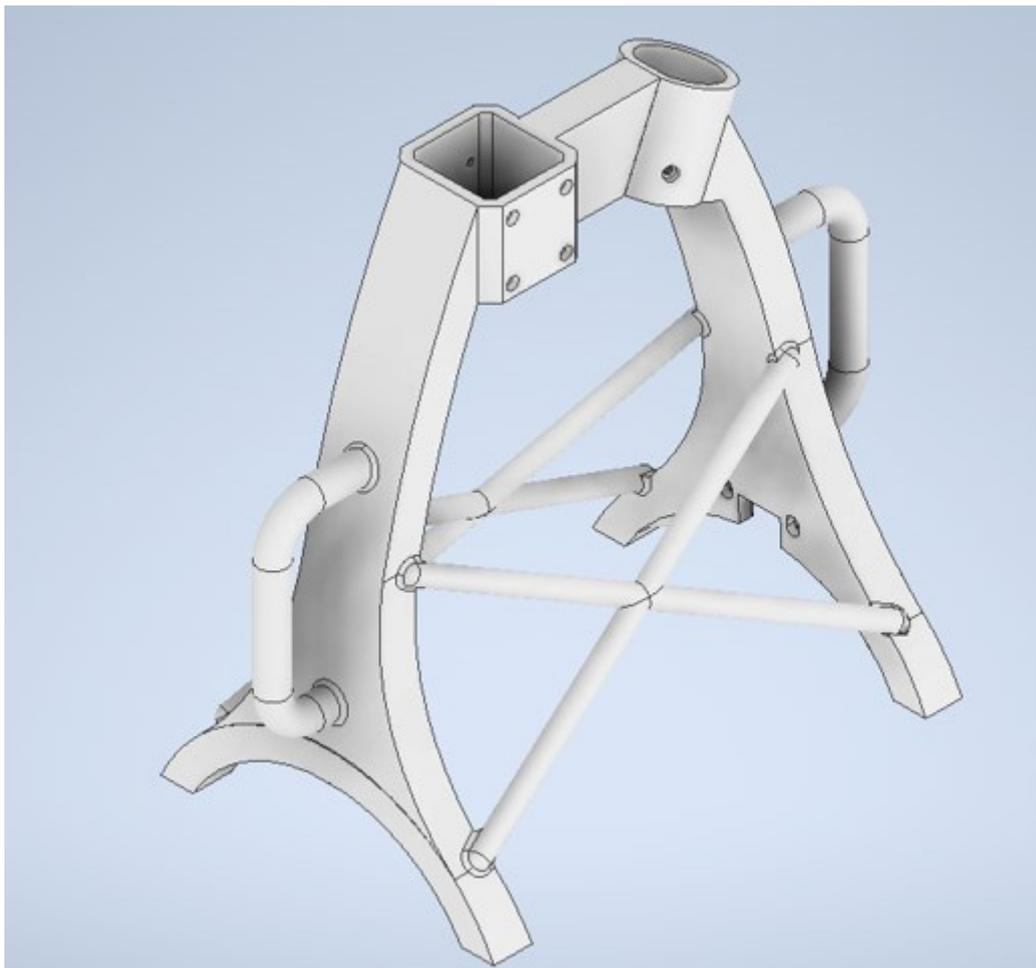


Figura 54 - CAD da estrutura do módulo de fixação.

Como citado, a estrutura acima foi projetada para ser fabricada por impressão 3D em polímero, sendo que a fixação dos módulos de iluminação, aquisição de imagens e de carregamento foi feita por parafusos metálicos. Também foram utilizados insertos metálicos nos três pontos de contato da estrutura com a tubulação, para garantir maior rigidez no contato entre as superfícies.

Na Figura 55, tem-se uma imagem em CAD do sistema completo, contendo todos os seus módulos e a tubulação revestida com MC a ser inspecionada. Os módulos de iluminação e aquisição de imagem estão posicionados na região central da estrutura, delimitando a área de inspeção, e o módulo de carregamento está localizado em uma região adjacente.

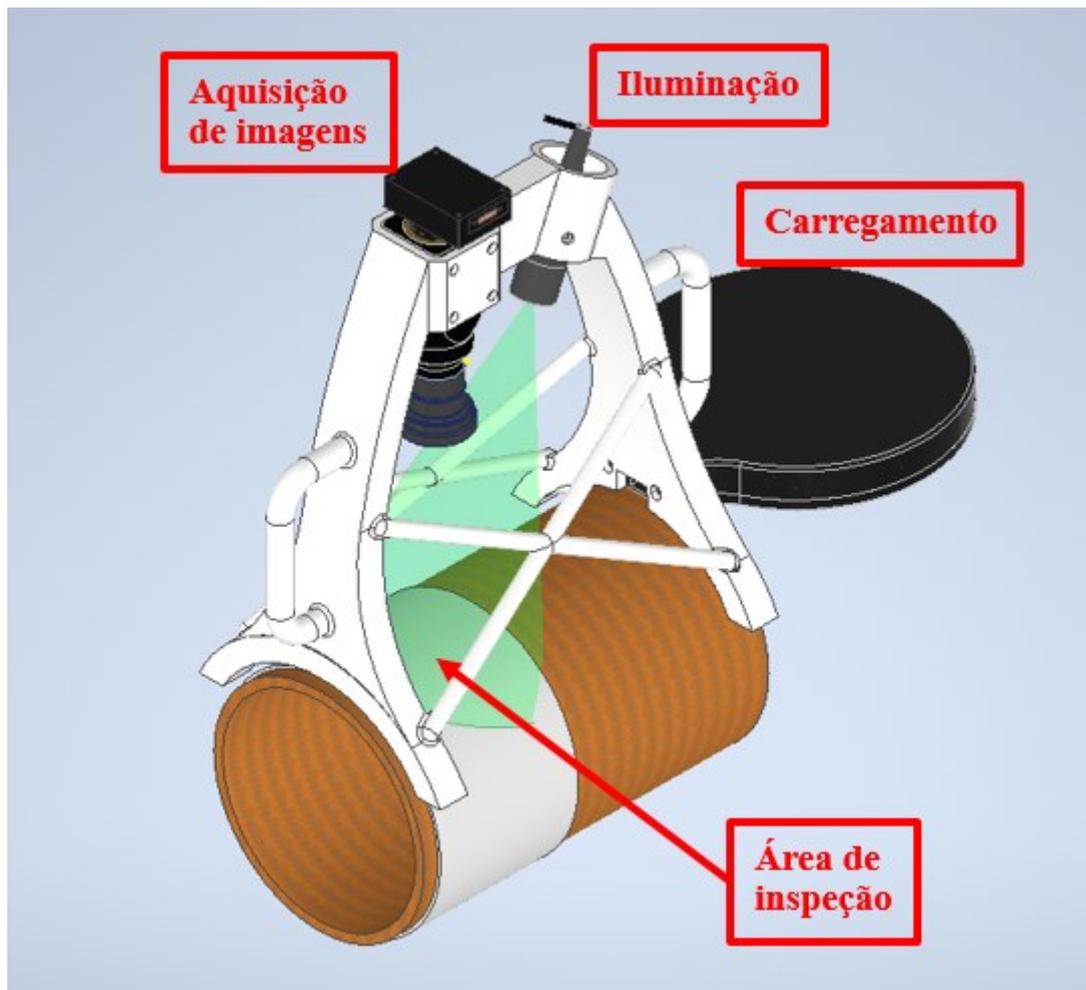


Figura 55 - Modelo 3D do sistema completo.

Com a definição de todos os módulos do sistema, a realização do projeto mecânico da estrutura e a definição dos processos de fabricação e montagem do equipamento, conclui-se a etapa do projeto preliminar e prossegue-se para a última etapa, o projeto detalhado.

5.4 Projeto detalhado (Validação e Resultados)

Neste trabalho, a etapa de projeto detalhado destina-se à fabricação e montagem do sistema projetado, além da realização dos testes e análise dos resultados experimentais. Paralelamente aos testes, são feitos ajustes de otimização dos componentes do sistema, a fim de melhorar o seu desempenho.

5.4.1 Fabricação e testes do protótipo

O primeiro passo do projeto detalhado foi realizar a fabricação da estrutura do módulo de fixação, projetada no item anterior. Para isso, foram avaliadas diferentes opções de impressoras 3D e escolhida a que melhor atendia aos requisitos de fabricação da estrutura, sendo eles: resolução, volume de impressão, rigidez, acabamento e tempo de fabricação.

A impressora escolhida foi o modelo GTMAX 3D GT5 e o material de impressão foi definido como ABS. Esta máquina foi gentilmente cedida pelo Instituto SENAI de Inovação em Sistema Embarcados, de Florianópolis, para a fabricação do protótipo. Esta impressora é utilizada no instituto para fabricação de diversas peças para diferentes projetos e tem apresentado excelentes resultados de fabricação. Na Figura 56, tem-se uma imagem da estrutura do protótipo durante o processo de impressão.

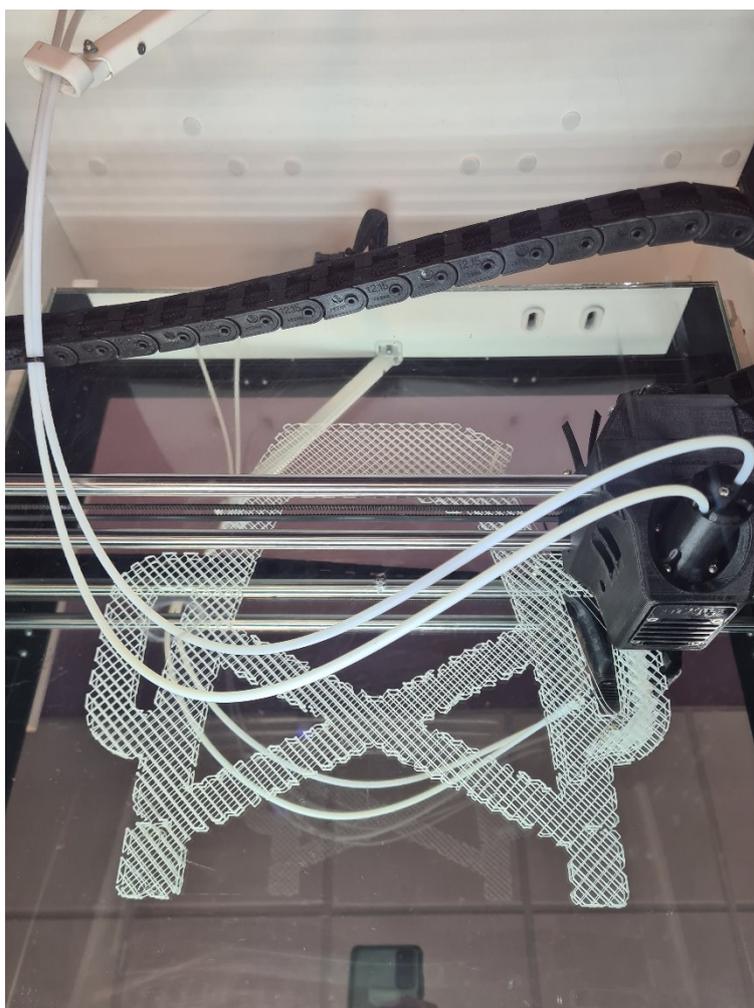


Figura 56 - Processo de impressão da estrutura do protótipo.

Já na Figura 57 é apresentada uma imagem da estrutura impressa, apresentando bom acabamento e respeitando as dimensões e geometria do projeto mecânico.



Figura 57 - Estrutura do protótipo impressa.

Após a impressão da estrutura, foi realizada a montagem completa do sistema, fixando os módulos de carregamento, aquisição de imagem e de iluminação através de parafusos e inserindo os três insertos metálicos e parafusos nos pontos de apoio da estrutura na tubulação. Na Figura 58, é apresentada uma imagem do protótipo montado, em inspeção sobre a tubulação utilizada como corpo de provas. Vale ressaltar que, graças à fabricação da estrutura em impressão 3D polimérica, o protótipo desenvolvido apresenta uma massa relativamente baixa, na ordem de 1500 gramas.

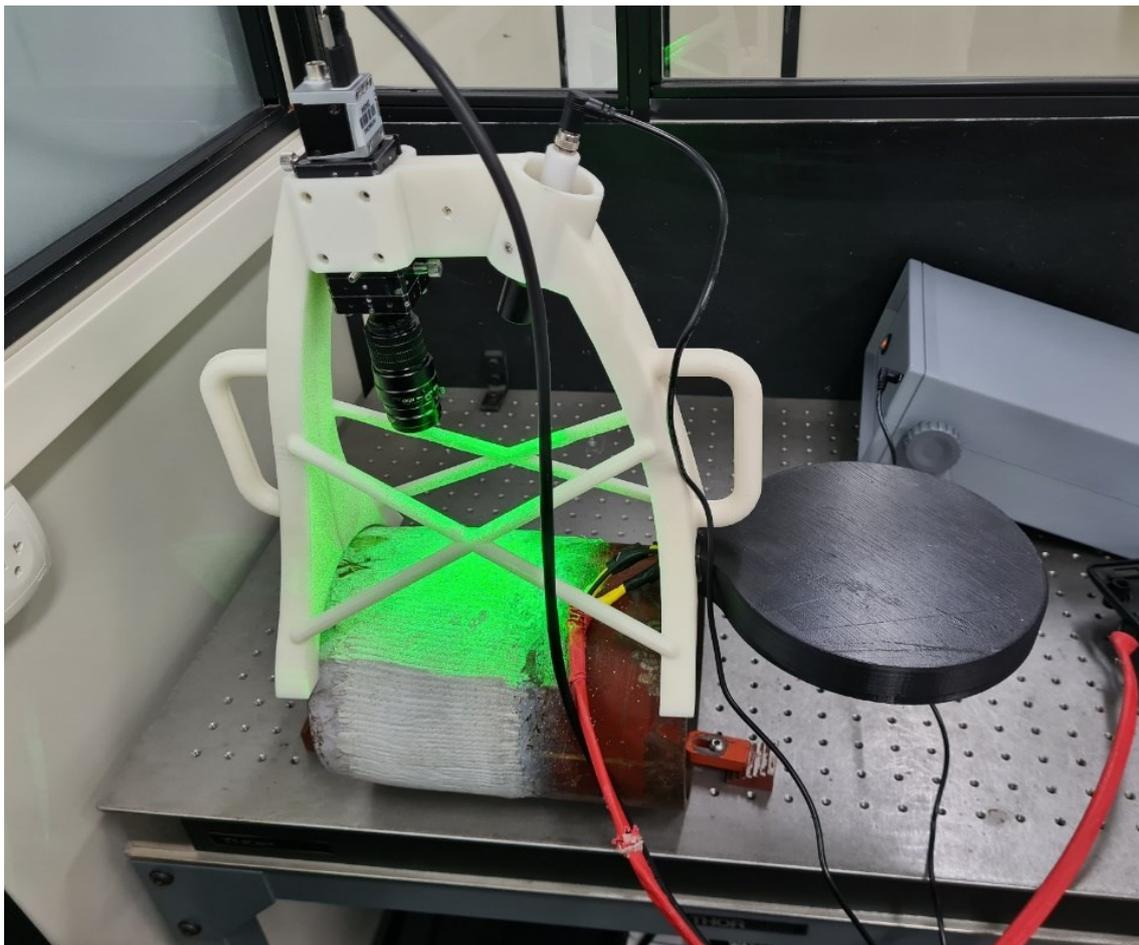


Figura 58 - Montagem experimental do protótipo.

Na Figura 59 é apresentada uma imagem de shearografia resultante da inspeção realizada pelo protótipo. Nela é possível perceber que o sistema foi capaz de evidenciar o defeito presente no corpo de provas, identificado pelo padrão de franjas no centro da imagem.

Como um dos principais objetivos deste trabalho está relacionado com a elevada produtividade de inspeção, optou-se por utilizar um curto intervalo de carregamento da estrutura, o que resulta em uma pequena densidade de franjas na imagem, como mostrado na Figura 59, procedimento que foi reproduzido nos demais testes realizados neste trabalho. Para a obtenção de uma maior densidade de franjas nas imagens, é necessário um maior intervalo de carregamento dos corpos de prova.

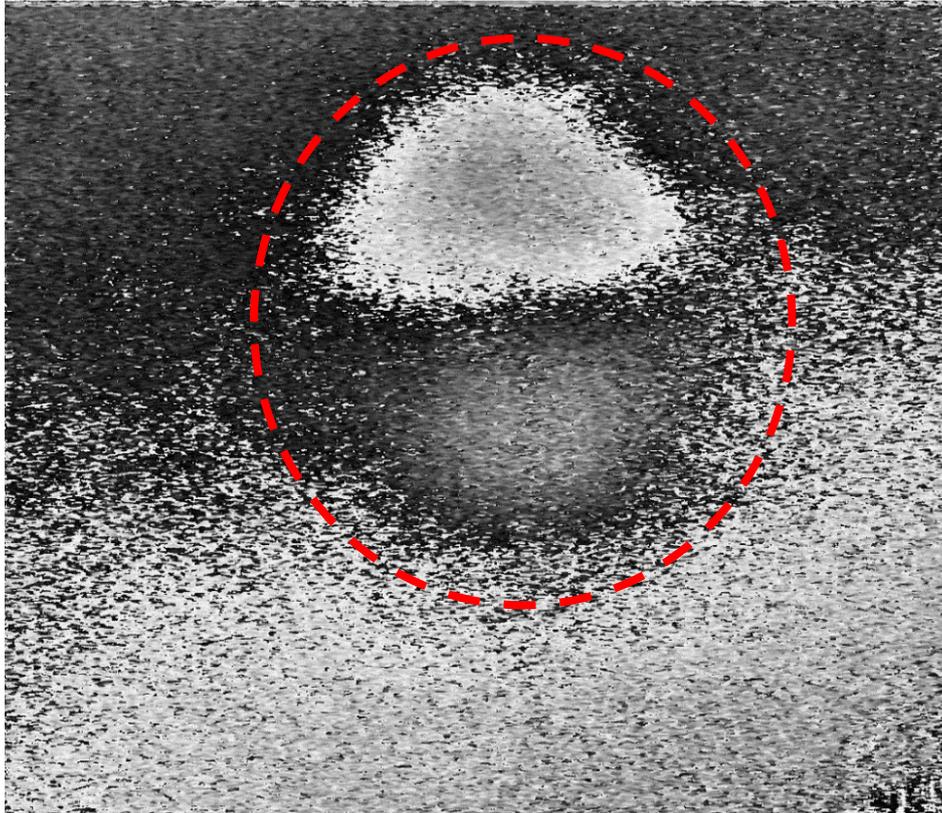


Figura 59 - Resultado da inspeção de shearografia do protótipo.

Como forma de avaliar o desempenho do protótipo desenvolvido, e a qualidade das imagens obtidas, foi utilizado um equipamento de shearografia já existente como referência para a comparação. Conforme ilustrado na Figura 60, o sistema de referência utiliza fixação por tripé. O corpo de provas, o defeito analisado, a forma de carregamento utilizada e os demais parâmetros da inspeção foram mantidos entre os dois ensaios.

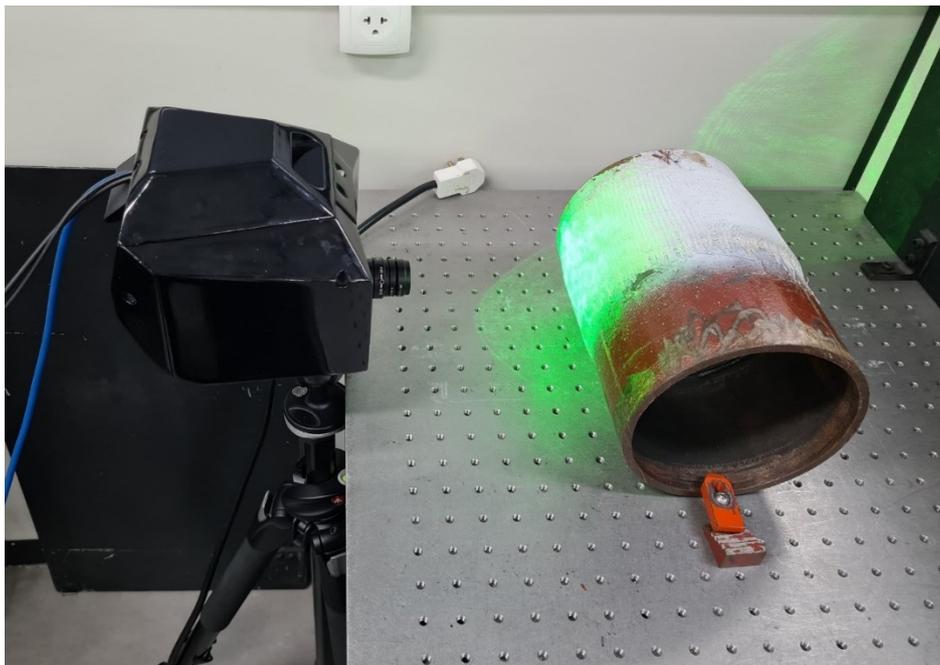


Figura 60 - Inspeção com sistema de shearografia de referência.

A Figura 61 apresenta o resultado da inspeção com o sistema de referêcia. Comparando esta imagem com a Figura 59, que apresenta o resultado obtido com o protótipo, percebe-se que ambos os sistemas foram capazes de identificar a presença do defeito no CP de forma satisfatória, com imagens de boa qualidade.

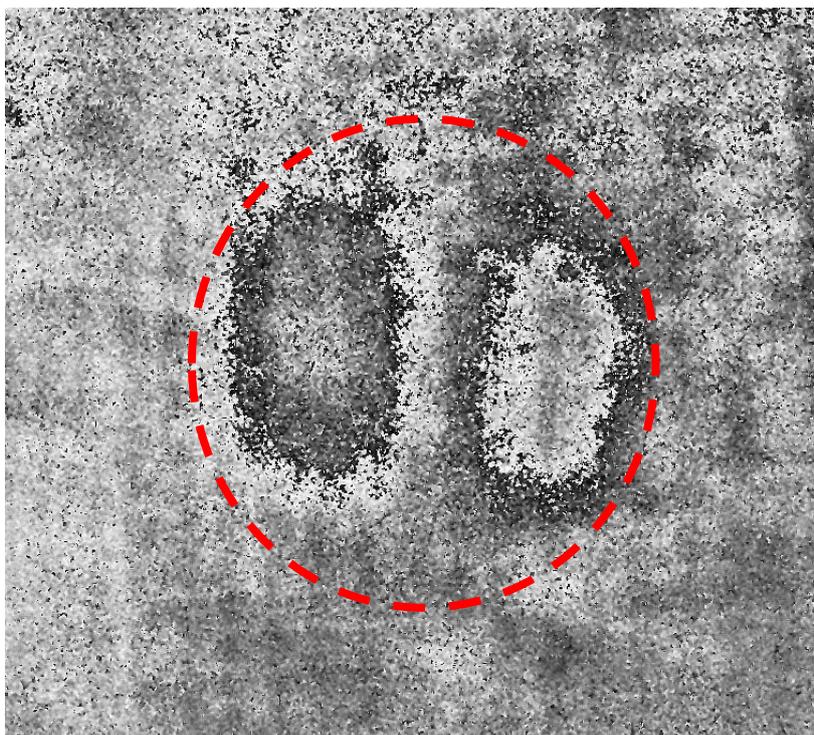


Figura 61 - Resultado da inspeção com sistema de referêcia.

O resultado apresentado na Figura 59 foi obtido com o protótipo posicionado sobre o corpo de provas na direção vertical, na qual a atração gravitacional foi responsável por garantir o posicionamento do sistema durante a inspeção. Nesta configuração o sistema apresentou resultados satisfatórios. Em seguida, foram realizados testes em outras direções ao longo da circunferência da tubulação e nestes casos foi necessário realizar a fixação manual do sistema sobre o CP com a atuação de um operador, conforme ilustrado na Figura 62.



Figura 62 - Protótipo em inspeção com fixação manual.

Nestas medições não foi possível obter um resultado satisfatório. Em alguns breves momentos foi possível identificar um padrão de franjas na imagem de shearografia que logo desapareciam. Na Figura 63 é apresentado um exemplo de resultado deste teste, onde não é possível identificar um padrão de franjas. Acredita-se que pequenas vibrações oriundas do operador foram suficientes para que o sistema perdesse a correlação entre a imagem de referência e a imagem após o carregamento.

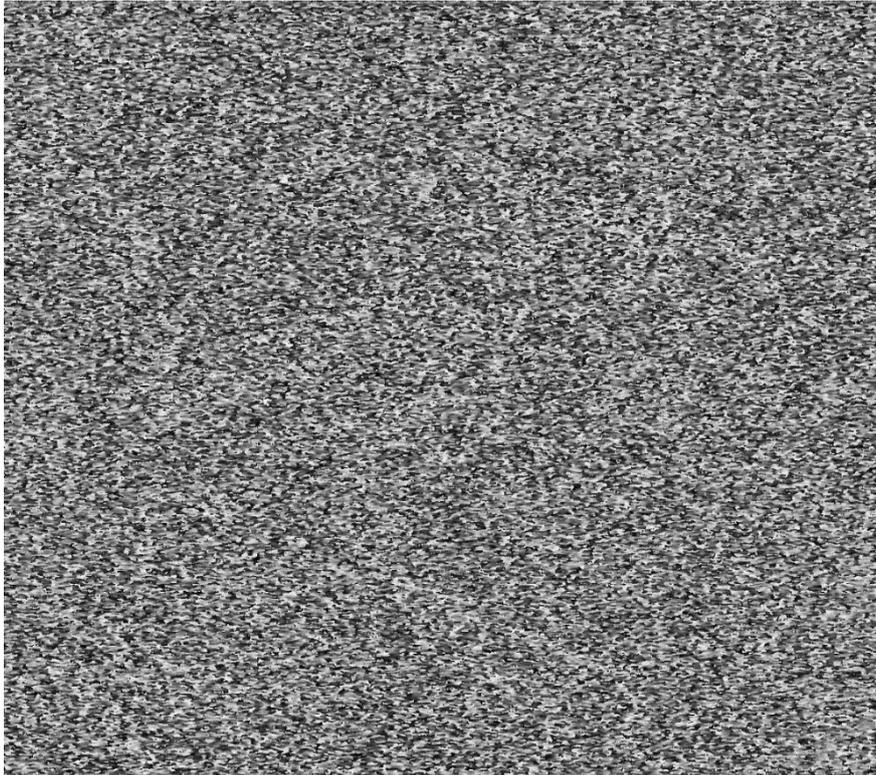


Figura 63 - Resultado não satisfatório da inspeção com fixação manual.

O resultado acima mostrou que, para o sistema desenvolvido, a fixação manual não é adequada para realização de inspeções por shearografia, o que não invalida todo o processo de desenvolvimento executado. Relembra-se que a metodologia utilizada, e os princípios escolhidos nos itens anteriores deste trabalho, estavam sujeitos à validação experimental e a possíveis modificações e melhorias para aprimorar o seu desempenho. Estas melhorias serão abordadas no tópico a seguir.

5.4.2 Melhorias do sistema

Como o sistema de fixação manual inicialmente projetado não apresentou desempenho adequado nos testes experimentais, decidiu-se por avaliar outras possíveis soluções para fixar o equipamento no corpo de provas. Neste sentido, foi revisitada a Tabela 3, na qual haviam sido propostos diferentes princípios de solução para cada uma das funções elementares do sistema.

Para a função de fixar o equipamento, além da fixação manual escolhida, foram propostos os princípios de fixação magnética e de fixação por elásticos de amarração. Portanto, para melhorar o desempenho do sistema como um todo, estes princípios foram testados experimentalmente.

Inicialmente, foi avaliada a solução de fixação magnética, onde foram utilizadas bases magnéticas comerciais, fixadas nos três pontos de apoio originalmente projetados. Na Figura 64 apresenta-se uma imagem do sistema de apoio anterior (insertos e parafusos metálicos) e do novo sistema de fixação (bases magnéticas).

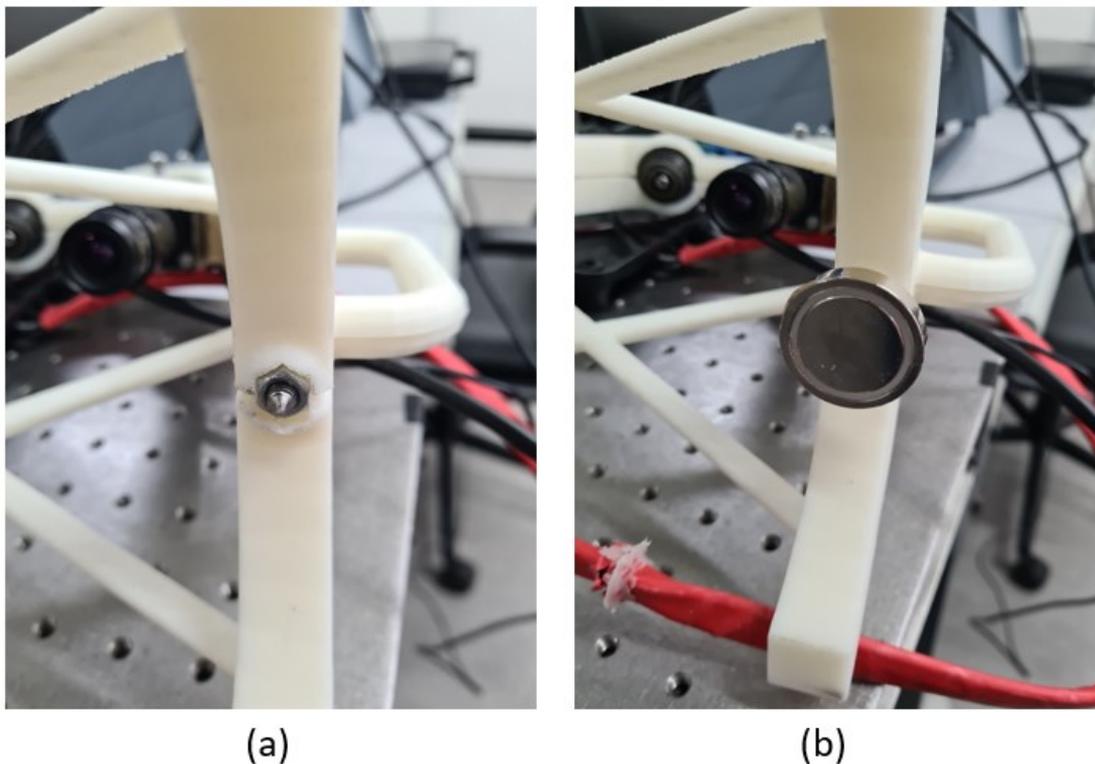


Figura 64 - (a) Sistema de apoio por parafusos; (b) Novo sistema de apoio com bases magnéticas.

Após a instalação das bases magnéticas, a fixação do sistema foi novamente testada no mesmo corpo de provas utilizado anteriormente, sendo possível a fixação em diferentes direções ao longo da circunferência da tubulação. Na Figura 65 tem-se uma imagem do sistema apoiado sobre a tubulação com uma inclinação de aproximadamente 45° com a vertical.

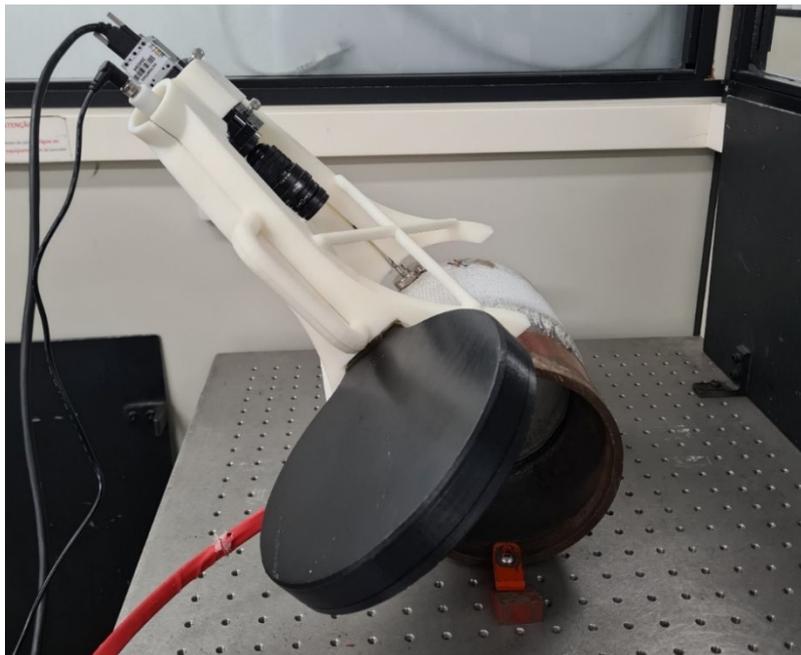


Figura 65 - Fixação do sistema no corpo de provas através de bases magnéticas.

Para validar esta fixação, foram realizadas inspeções de shearografia nesta configuração do sistema. Na Figura 66 temos resultado de uma destas inspeções, na qual é possível perceber que o sistema foi capaz de evidenciar o defeito, caracterizado pelo padrão de franjas no centro da imagem.

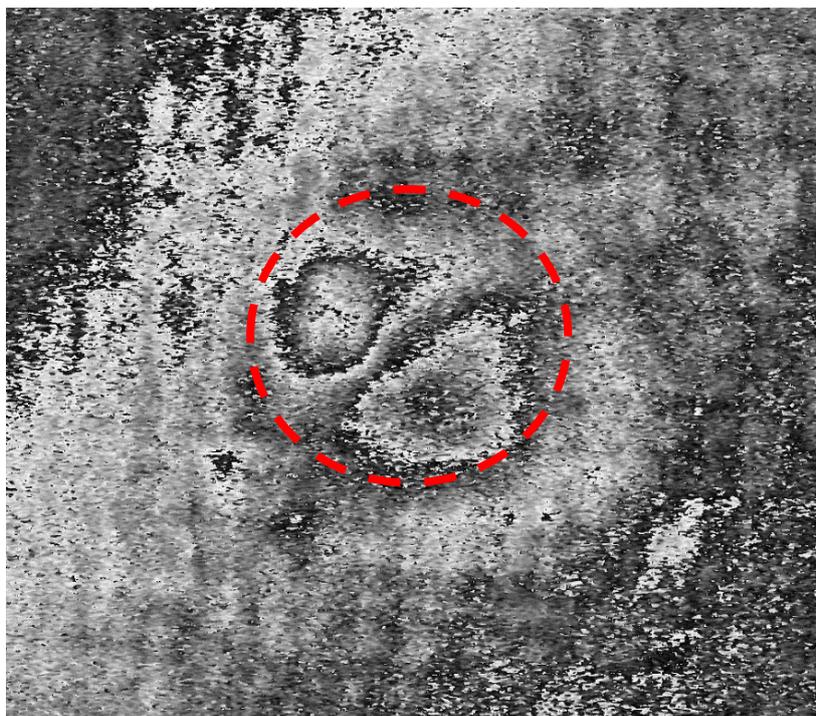


Figura 66 - Resultado de inspeção de shearografia com fixação magnética.

Apesar dos resultados positivos obtidos com o sistema de fixação magnética nos testes em laboratório, ponderou-se que este princípio de solução não seria o mais adequado para aplicação em campo da shearografia, pelo fato que a força de fixação magnética é fortemente dependente da espessura da camada de material compósito aplicada sobre a tubulação.

No corpo de provas utilizado nos testes relatados anteriormente, a espessura da camada de MC é de aproximadamente 5 mm, já sendo suficiente para influenciar na rigidez de fixação da estrutura no CP, e prejudicar qualidade das imagens obtidas, conforme representado na Figura 66. Entretanto em inspeções em campo, é comum encontrar estruturas revestidas com camadas de material compósito da ordem de 20 mm, ou até maiores. Nestes casos, avaliou-se que a fixação magnética poderia não apresentar resultados adequados em manter o sistema preso à tubulação.

Para explorar de forma mais aprofundada a aplicação de fixação magnética em inspeções por shearografia, recomenda a realização de trabalhos futuros, avaliando, através de simulações e ensaios experimentais, a influência na espessura da camada de MC sobre a força de atração magnética entre as bases e o substrato metálico.

Com objetivo de aproximar os testes realizados em laboratório com aplicações reais, e dando continuidade no processo de desenvolvimento do presente trabalho, decidiu-se por avaliar também o terceiro princípio de fixação proposto na Tabela 3, a fixação por elásticos de amarração. Para isto foram removidas as bases magnéticas, e retornou-se ao sistema de apoio em três pontos, com parafusos metálicos, conforme mostrado na Figura 64 (a). Para a nova fixação foram utilizados elásticos comerciais para amarração, com ganchos plásticos para ancoragem da estrutura do protótipo sobre o corpo de provas.

Para melhor validar as capacidades do sistema desenvolvido, optou-se por testá-lo em outro corpo de provas, além da tubulação já apresentada. Desta vez, foi utilizada uma tubulação em curva, de 4 polegadas revestida com MC, fornecida pela Petrobras no âmbito do projeto SHIC para a realizações de inspeções por shearografia. Diferentemente dos corpos de provas utilizados anteriormente, que foram fabricados em laboratórios, esta tubulação representa uma estrutura utilizada em aplicações reais da indústria, que são tipicamente encontradas em inspeções em campo. A Figura 67 apresenta uma imagem deste CP.

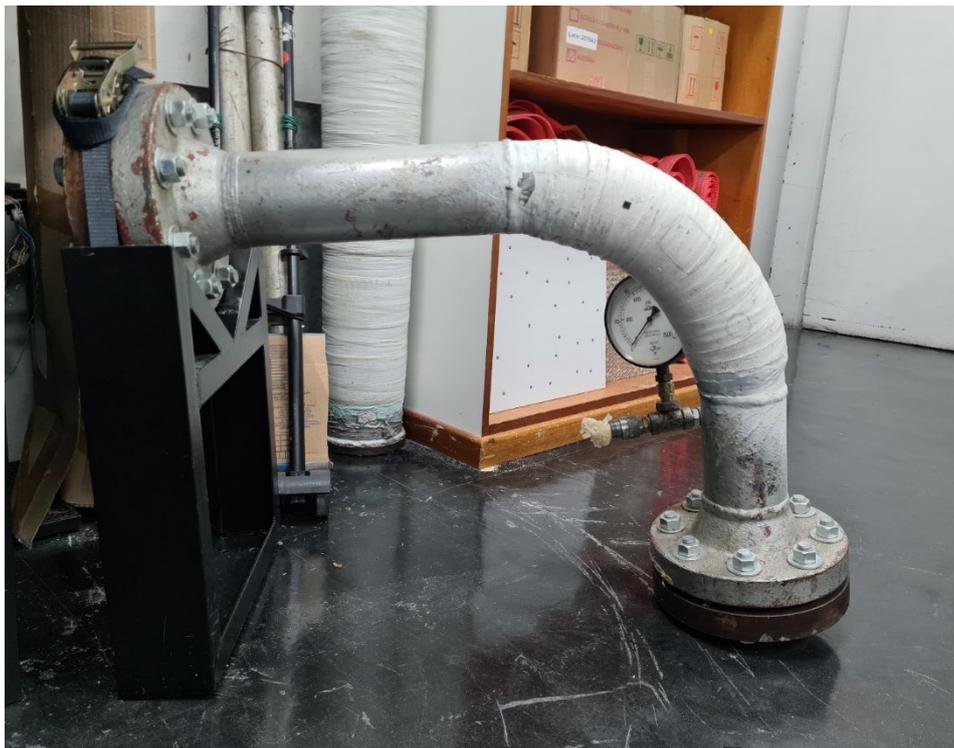


Figura 67 - Tubulação em curva utilizada nos testes do sistema.

Na Figura 68 tem-se uma imagem do protótipo em inspeção neste novo corpo de prova, esta imagem já mostra o sistema de fixação com elásticos de amarração.

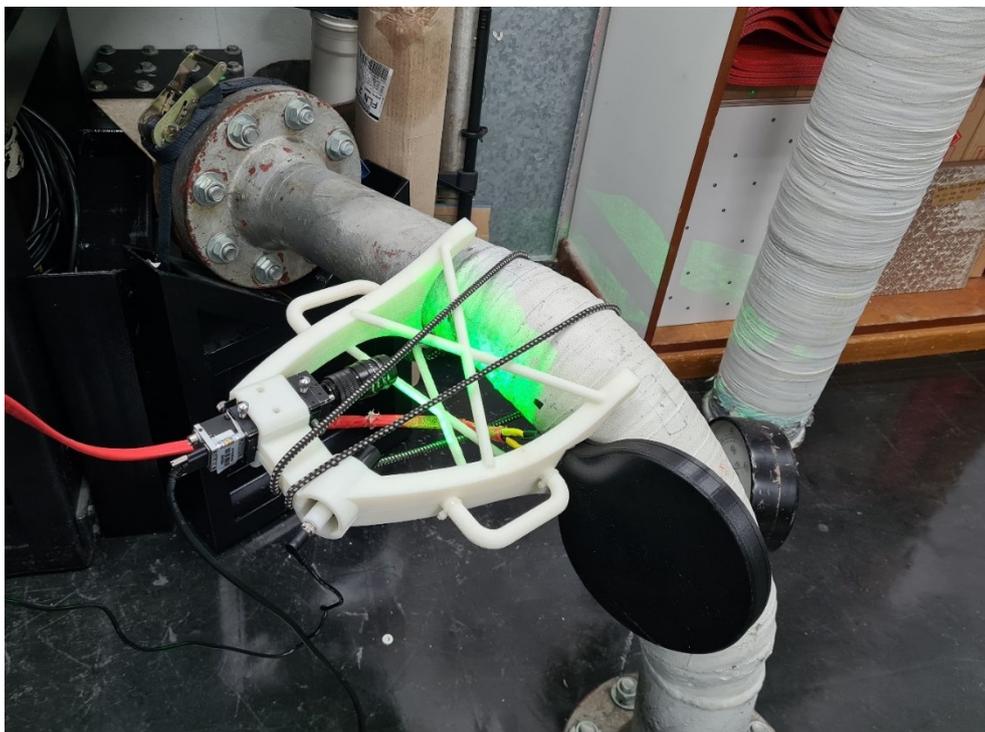


Figura 68 - Protótipo em inspeção com fixação por elásticos.

A Figura 69 apresenta o resultado desta inspeção, na qual é possível perceber que o sistema foi capaz de identificar uma região da tubulação com a presença de defeitos, evidenciada pelo padrão de franjas destacado na imagem.

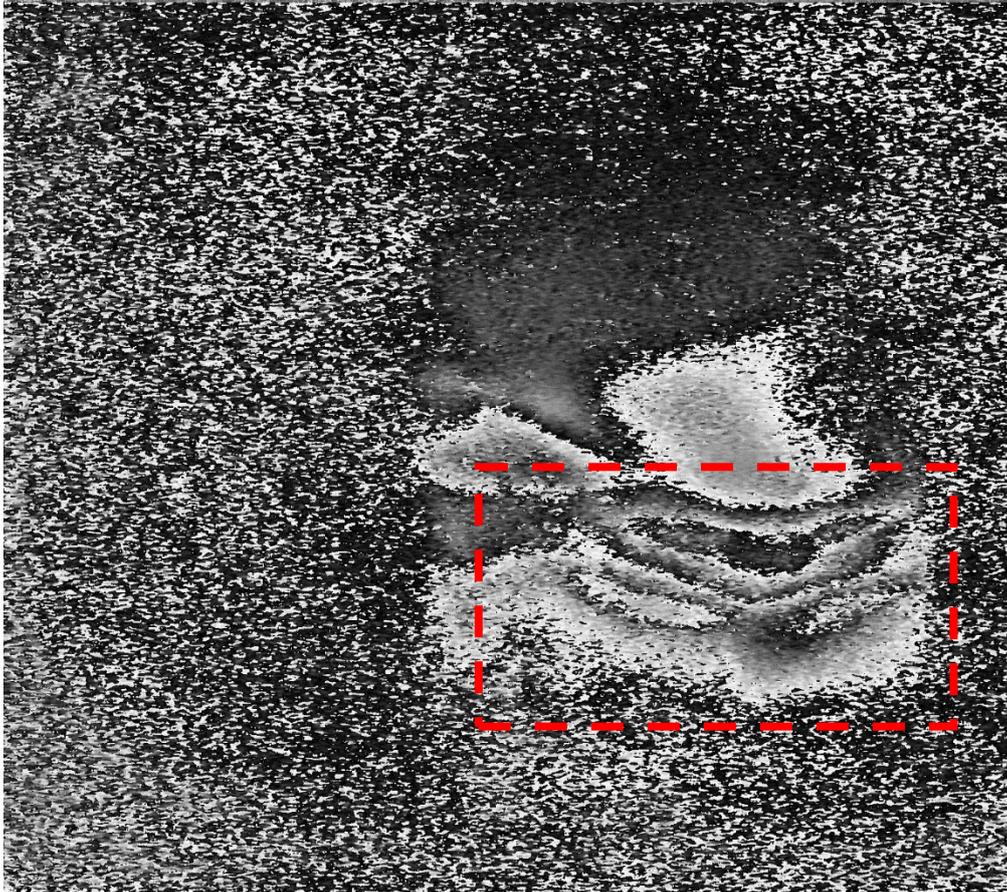


Figura 69 - Resultado da inspeção na tubulação em curva.

Também com objetivo de melhorar a robustez do sistema desenvolvido, para aplicação em ambientes reais de inspeção, decidiu-se por fazer o enclausuramento da região de inspeção. Isto se deve ao fato de que muitas vezes os testes realizados em campo ocorrem sob a incidência direta de luz solar, o que prejudica ou até inviabiliza a obtenção de imagens de shearografia em alguns casos. Este é potencializado quando se utiliza um sistema de iluminação de baixa potência, como no caso do sistema desenvolvido. Portanto, optou-se por revestir todo o vão central do protótipo, com folhas de borracha do tipo EVA na cor preta fosca, que garantiram a vedação da região de inspeção contra a entrada de luz externa, sem gerar reflexões internas indesejadas. A Figura 70 mostra uma imagem do protótipo em inspeção, já com a região de testes encapsulada.



Figura 70 - Sistema com encapsulamento da região de teste.

A Figura 71 mostra o resultado desta inspeção, na qual percebe-se que o sistema continuou capaz de evidenciar a presença de defeitos nos corpos de provas, indicado pelo padrão de franjas na direita da imagem.

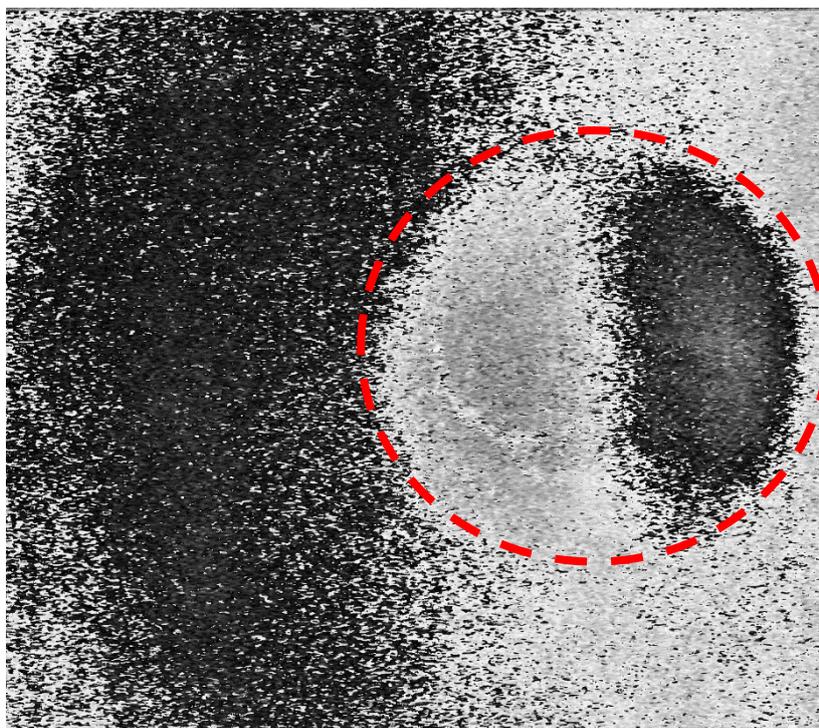


Figura 71 - Resultado da inspeção do sistema com encapsulamento.

Para verificar que o sistema de encapsulamento estava garantindo a correta vedação da região de inspeção, sem permitir a entrada de luz externa, foi utilizado um holofote de alta potência (500 W) para iluminar diretamente a região a ser inspecionada. Na Figura 72 apresenta-se uma imagem do sistema em sua configuração final, com fixação por elásticos e com o enclausuramento, em inspeção na tubulação em curva, com a iluminação direta do holofote, simulando a incidência de luz solar.



Figura 72 - Sistema em configuração final de inspeção.

Na Figura 73 apresenta-se uma imagem do resultado desta inspeção, em que é possível perceber que o sistema foi capaz de evidenciar a presença de defeitos (padrão de franjas destacado na imagem) na estrutura mesmo sob incidência direta de uma iluminação de elevada intensidade, o que não seria possível sem o encapsulamento da região de testes, comprovando a eficiência de vedação do protótipo.

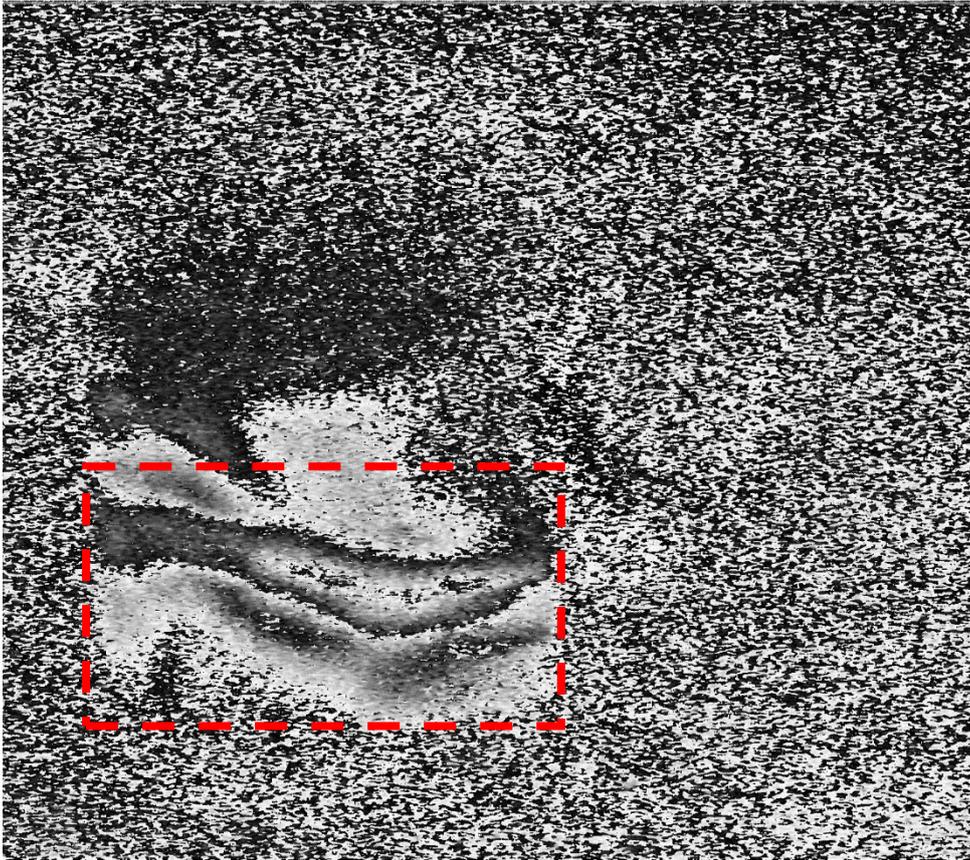


Figura 73 - Resultado da inspeção na tubulação em curva com o sistema em configuração final, sob iluminação direta.

Os resultados positivos obtidos nestes últimos testes, realizados em uma estrutura que representa as utilizadas na indústria, enviada pela Petrobras, e em condições de testes que simulam algumas condições ambientes presentes em campo, permitem inferir que o sistema desenvolvido no presente trabalho estaria apto para ser utilizado em situações de ensaios não destrutivos reais na indústria.

Desta forma, verifica-se que o sistema projetado, construído e testado atende aos objetivos definidos para este trabalho. O protótipo desenvolvido permitiu a realização de inspeções de shearografia em tubulações revestidas com material compósito de forma prática. Graças as suas dimensões compactas e simples princípio de fixação, o sistema pode ser operado por apenas uma pessoa, já que após o aquecimento do corpo de provas e a fixação da estrutura na área de inspeção, o operador pode realizar a captura e processamento das imagens de forma independente. Após a realização de um ensaio, o operador move o sistema para a próxima região de inspeção e repete o mesmo procedimento.

5.4.3 Análise do ganho de produtividade do sistema

De acordo com os resultados apresentados no item anterior, é possível inferir que o sistema desenvolvido possui uma maior produtividade para inspeções de tubulações quando comparado a sistemas de shearografia que dependem de outras formas de posicionamento, tornando mais lenta e trabalhosa a realização dos ensaios. Para quantificar este ganho de produtividade de forma exata, sugere-se a construção de uma tubulação padrão para testes, contendo diferentes defeitos em diversas direções ao longo da superfície. Desta forma é possível realizar uma análise comparativa da produtividade de diferentes sistemas de shearografia sob as mesmas condições. Um corpo de provas como este não estava disponível durante o desenvolvimento do presente trabalho. Portanto, neste tópico será realizada uma análise do ganho de produtividade estimado, comparando o sistema desenvolvido com um outro sistema de medição já existente.

Para realizar uma análise comparativa justa, optou-se por não envolver os equipamentos de shearografia que dependem de fixação por tripé, já que esses não são adequados para inspeções ao longo da circunferência de tubulações horizontais. Foi então escolhido um modelo de sistema de shearografia que pudesse ser fixado diretamente na tubulação. Foi adotado como modelo de referência um sistema de shearografia desenvolvido anteriormente no projeto SHIC para inspeção de tubulações. O sistema é composto por um colar de fixação, que é preso ao tubo através de cinta e catraca, conforme mostrado na Figura 74. Como destacado na figura, o sistema possui um módulo de aquisição de imagens e um módulo de iluminação, além da estrutura para fixação com cinta e catraca. Entretanto, o sistema de referência não possui um módulo de carregamento integrado, portanto, para esta análise, considerou-se a utilização de uma fonte de carregamento por indução eletromagnética externa.

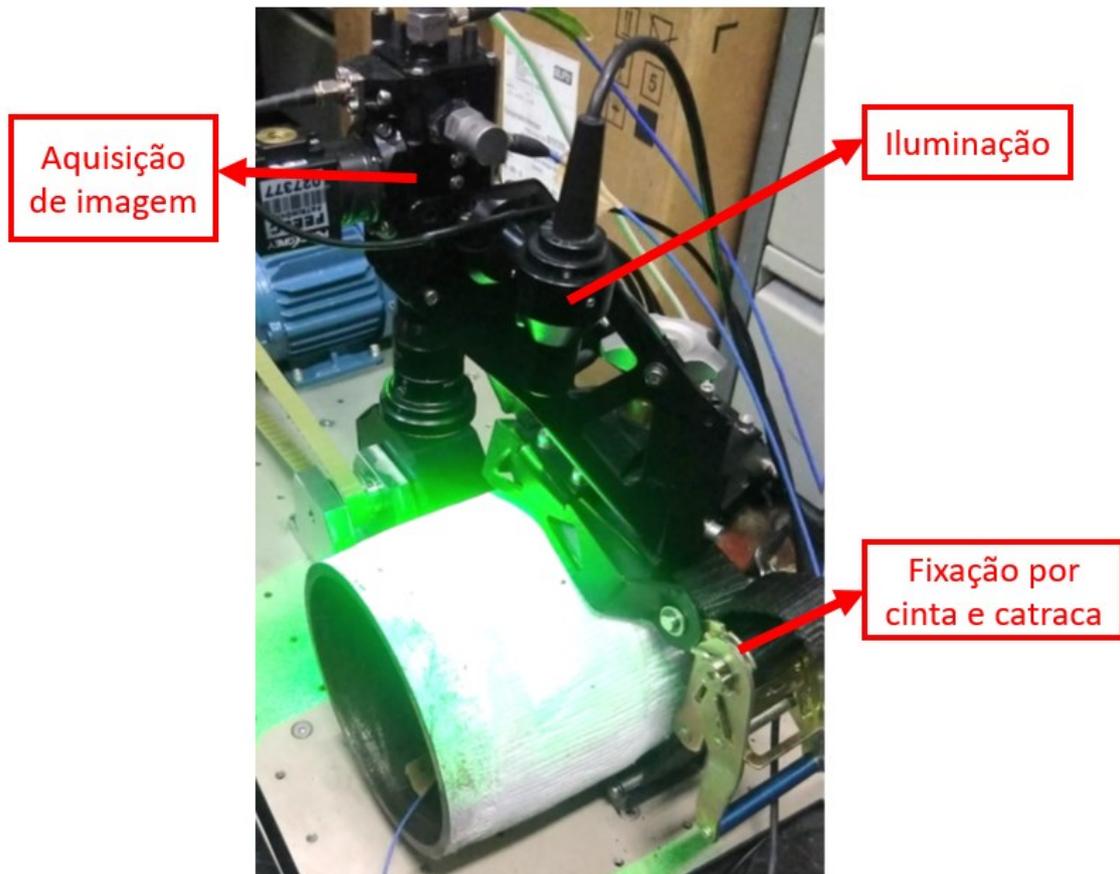


Figura 74 - Sistema de shearografia utilizado como referência para a análise comparativa.

Para realizar essa análise comparativa, a tarefa de inspeção de shearografia foi dividida em algumas etapas, sendo elas: posicionamento inicial do sistema; carregamento da estrutura; aquisição de imagens da primeira região de testes; deslocamento do sistema; carregamento da área seguinte; e aquisição de imagens da próxima região. Na Tabela 7 é apresentada a análise comparativa estimando-se os tempos necessários para realizar cada etapa nos dois sistemas. Vale destacar que foram estimados intervalos temporais para a realização de cada uma das etapas, pois os tempos efetivamente envolvidos variam conforme a experiência do operador e as condições do local onde está sendo realizada a inspeção. A área de inspeção dos dois sistemas pode variar de acordo com o conjunto de lentes utilizado no módulo de aquisição de imagens. Para simplificar a análise, foi considerado que os dois sistemas possuem a mesma área de inspeção, de aproximadamente $(60 \times 60) \text{ mm}^2$. Procedimentos anteriores ao teste, como localização e preparação do corpo de provas, não fizeram parte da análise, por serem comuns aos dois sistemas.

Tabela 7 - Estimativa comparativa da produtividade do sistema.

Etapas	Sistema proposto (s)	Sistema de referência (s)
1 - Posicionamento inicial	$60 < t < 90$	$240 < t < 360$
2 - Carregamento da estrutura	$15 < t < 30$	$15 < t < 30$
3 - Aquisição da primeira região	$30 < t < 60$	$30 < t < 60$
4 - Deslocamento do sistema	$15 < t < 30$	$60 < t < 120$
5 - Carregamento segunda região	0 (durante etapa 3)	$15 < t < 30$
6 - Aquisição da segunda região	$30 < t < 60$	$30 < t < 60$
Total (inspeção de duas regiões)	$150 < t < 270$	$390 < t < 660$

De acordo com os dados apresentados, para as condições descritas acima, o tempo médio para realização do ensaio com o sistema proposto foi da ordem de 40% do tempo médio estimado para realizar o mesmo ensaio com o sistema de referência. Os maiores ganhos de produtividade do sistema proposto estão nos tempos de posicionamento mais rápidos, graças a simples fixação por elásticos, e na possibilidade de realizar o carregamento da área de testes seguinte durante a aquisição das imagens da região que está sendo inspecionada.

Vale ressaltar que a análise de produtividade foi realizada para duas inspeções seguidas, mas o ganho de produtividade irá ser mais expressivo quanto mais testes forem realizados em sequência. Pois a cada etapa de movimentação e carregamento da estrutura, o sistema desenvolvido aumentará a vantagem em relação ao sistema de referência.

Com a conclusão de todas as etapas do projeto do sistema, dos ensaios experimentais e da análise dos resultados, prossegue-se para as considerações finais deste trabalho.

6 CONCLUSÕES

Neste capítulo é feita uma análise geral do projeto desenvolvido e dos experimentos realizados, confrontando os resultados com os objetivos pretendidos no planejamento da dissertação. Além disso, comenta-se sobre os avanços obtidos neste trabalho e sugere-se tópicos para dar prosseguimento no desenvolvimento tecnológico deste campo.

O principal objetivo definido para este trabalho foi o desenvolvimento e avaliação de protótipo de sistema de shearografia compacto e de elevada produtividade, que facilitasse a atividade de inspeção em dutos de aço revestido com material compósito, em locais de difícil acesso. Um sistema com essa finalidade foi desenvolvido, construído, e testado em laboratório, mostrando-se capaz de realizar inspeções e detectar defeitos em tubulações revestidas com material compósito de forma simples e eficaz, apresentado produtividade superior à de outros sistemas existentes. Portanto, permite-se concluir que o objetivo principal desta dissertação foi atingido com êxito.

6.1 Análise geral do trabalho

Para atender aos objetivos propostos, foi aplicada uma ferramenta de metodologia de projeto, composta por diferentes etapas sequenciais que facilitaram o desenvolvimento e a organização do trabalho. Foram definidos os requisitos de projeto e de operação, além das funções elementares do sistema. Para cada função foram gerados diferentes princípios de solução e escolhidos aqueles que melhor atendessem aos requisitos de projeto. Os princípios escolhidos foram testados experimentalmente e um protótipo do sistema foi construído em laboratório. Com base nos resultados dos ensaios experimentais, foram realizadas modificações no sistema para aprimorar o seu desempenho e a sua usabilidade.

As soluções inicialmente escolhidas através da metodologia para: iluminação (laser diodo), carregamento (indução eletromagnética) e aquisição de imagens (cabeçote 'one-shot') apresentaram excelentes resultados nos ensaios experimentais. O sistema de fixação manual inicialmente projetado apresentou limitações de operação, sendo modificado para alcançar um melhor desempenho. O novo sistema de fixação, que combinou o apoio em três pontos com elásticos de amarração na estrutura, se mostrou uma ótima solução, combinando rigidez na fixação com fácil movimentação. A estrutura do protótipo, fabricada por impressão 3D, se mostrou sólida e ergonômica para a realização dos ensaios. A área de inspeção do sistema mostrou-se adequada para a

detecção de defeitos em todos os corpos de prova utilizados neste trabalho, podendo ser modificada através da simples troca do conjunto de lentes do módulo de aquisição de imagens. Para facilitar a aplicação do protótipo em ambientes reais, a região de testes foi encapsulada para evitar a entrada de luz externa.

O processo de inspeção utilizando o sistema desenvolvido no presente trabalho se mostrou prático e ágil. Diferentemente de outros sistemas que dependem da utilização e posicionamento de tripés para a inspeção, o protótipo construído pode ser fixado diretamente na superfície da tubulação, facilitando o posicionamento e a movimentação ao longo de diferentes posições sobre a estrutura, o que aumenta a produtividade e a eficiência das inspeções. Realizou-se uma análise comparativa da produtividade do sistema desenvolvido, comparando-a com a de outro sistema de shearografia que é fixado na tubulação através de cinta e catraca. A produtividade do sistema desenvolvido se mostrou significativamente superior ao equipamento de referência, consumindo um tempo médio de inspeção estimado em cerca de 40% do que consome o sistema de referência.

O protótipo construído também tem como vantagem as dimensões compactas e a baixa massa, que são características especialmente importantes para aplicações embarcadas, que demandam transporte aéreo e que possuem estruturas para serem analisadas em locais de difícil acesso e em ambientes restritos.

As inspeções realizadas com o protótipo mostraram a sua eficácia em identificar e evidenciar a localização de defeitos em tubulações revestidas com material compósito. Para isso foram utilizados diferentes corpos de provas, fabricados em laboratório e oriundos da indústria. As condições dos testes realizados foram definidas para simular algumas das condições encontradas em inspeções em campo, onde a presença de diversos fatores externos perturba as medições. Os resultados obtidos nestes ensaios permitem concluir que o sistema desenvolvido tem grande potencial para ser utilizado em aplicações industriais, e obter resultados positivos nestes ambientes.

Com os resultados desta dissertação, o LABMETRO/UFSC, que é referência no estudo da técnica de shearografia no país, continua a avançar no desenvolvimento e na aplicação industrial deste método de ensaio não destrutivo. A shearografia é uma técnica há muito explorada, mas que ainda pode ser objeto de muitos estudos no futuro. A seguir propõe-se alguns destes tópicos.

6.2 Sugestões de trabalhos futuros

Com base no desenvolvimento do presente trabalho e nos resultados obtidos, sugere-se alguns possíveis trabalhos futuros que podem dar continuidade no desenvolvimento tecnológico desta área. São eles:

1. Desenvolver um módulo de controle do sistema de carregamento por indução, otimizado para aplicações de shearografia, e avaliar outras possíveis configuração da bobina de indução;
2. Explorar de forma mais aprofundada o sistema de fixação magnética, avaliando a aplicabilidade de eletroímãs;
3. Incorporar um sistema de ajuste/tensionamento dos elásticos de amarração no projeto mecânico da estrutura;
4. Avaliar a aplicabilidade de um sistema de fixação e de carregamento adaptáveis a diferentes diâmetros de tubulações;
5. Realizar um estudo sobre o consumo energético do sistema como um todo e avaliar a possibilidade de utilização de baterias para alimentação.
6. Avaliar a fabricação de uma estrutura metálica para o protótipo e compará-la com a versão em polímero.
7. Desenvolver uma tubulação padrão para testes, contendo diferentes defeitos em diversas direções ao longo da superfície, e realizar uma análise comparativa experimental da produtividade de diferentes sistemas de shearografia.
8. Avaliar o desempenho do sistema em ambientes com vibração e comparar com o de outros sistemas de shearografia.

REFERÊNCIAS

- [1] CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA. Quantos quilômetros de dutos temos no Brasil hoje? [S. l.], 26 mar. 2019. Disponível em: <https://cbie.com.br/quantos-quilometros-de-dutos-temos-no-brasil-hoje/>. Acesso em: 11 set. 2023.
- [2] SOUZA, R. M. de. Sistema de shearografia para inspeção de grandes áreas verticais revestidas por materiais compósitos. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- [3] GUO, B. et al. Offshore Pipelines: Design, Installation, and Maintenance. 2a ed. Waltham: Elsevier, 2014.
- [4] SPEIGHT, J. G. Handbook of Offshore Oil and Gas Operations. 1. ed. Kidlington: Elsevier, 2015.
- [5] SILVA, F. A. A. da. Colar de múltiplos sensores de shearografia para inspeção de reparos e uniões de materiais compósitos. 168 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- [6] VIEIRA, E.C.C. Desenvolvimento de um protótipo de sistema para inspeções por shearografia subaquática de forma remota. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- [7] KARBHARI, V. M. Rehabilitation of Pipelines Using Fiber-reinforced Polymer (FRP) Composites. Cambridge: Woodhead publishing, 2015.
- [8] LEMOS, R.P. Reparos compósitos autoexcitáveis na inspeção com shearografia. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- [9] MALLICK, P. Composites Engineering handbook (Materials Engineering). [S.l.]: CRC Press, 1997. 1264 p. ISBN 0824793048.
- [10] CALLISTER, W. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000. ISBN 8521618212.
- [11] MENDONÇA, P. d. T. R. de. Materiais compostos e estruturas-sanduíche: projeto e análise. [S.l.]: Manole, 2005. ISBN 8520418821.

- [13] OXYBLACK. Compósitos - O que são? [S. l.]. Disponível em: <https://www.oxyblack.com/index.php/pt/compositos/o-que-sao>. Acesso em: 13 set. 2023.
- [14] ALBERTAZZI, A.; MENICONI, C. L.; WILLEMANN, D. P.; BEPLER, R. V.; SFREDO, P. B.; FERREIRA, R. P.; DEVEGILI, É.; VIOTTI, M. R.; HOFMANN, D. Detecção de falhas de adesão entre mantas poliméricas e dutos usando interferometria de deslocamento. In: Conaed 036. [S.l.: s.n.], 2006. p. 15.
- [15] SMITH, R. A. Composite defects and their detection. Article 6.36.5.3. MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING – Vol. III – Composite Defects and Their Detection, p. 41, 2002.
- [16] VIEIRA, E. C. C. Desenvolvimento de uma unidade instrumentada para inspeção de grandes áreas revestidas por materiais compósitos utilizando shearografia. 93 p. Monografia (TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- [17] WORKMAN, G. L.; MOORE, P. O. Non-destructive testing handbook: Non-destructive testing overview. 3rd ed. v. 10. American Society for Nondestructive Testing, 2012.
- [18] GHOLIZADEH, S. “A review of non-destructive testing methods of composite materials,” 2016. Procedia Structural Integrity, Volume 1, páginas 50-57.
- [19] ANDREUCCI, R. Ensaio por Ultrassom, Abendi, 103p. 2016.
- [20] MIRANDA, M. Comparação entre métodos de inspeção não-destrutiva aplicados a peças compósitas laminadas sólidas estruturais aeronáuticas. 159p. Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo, 2011.
- [21] ANDREUCCI, R. Radiologia Industrial, Abendi, 130p. 2014.
- [22] FERREIRA, C. G. Metodologia de ensaios não destrutivos com raios X para inspeção de juntas laminadas de tubulações em materiais compósitos poliméricos reforçados por fibra de vidro (PRVF). 105 p. Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2019.
- [23] CERTI. Tomografia Industrial. [S. l.], 15 out. 2018. Disponível em: < <https://certi.org.br/blog/tomografia-industrial/>>. Acesso em: 21 set. 2023.
- [24] YANG, L.; XIE, X. Digital shearography - New Developments and Applications. 1. ed. Bellingham: SPIE, 2016.
- [25] Shearography - Non Destructive Testing (NDT) Measurement Systems. Disponível em: <https://www.dantecdynamics.com/shearography-non-destructive-testing>. Acesso em: 13 set. 2023.

- [26] FRANCIS, D.; M, G. R.; TATAM, R. P. Shearography technology and applications: a review. IOPscience, 2010.
- [27] BARRERA, E. S. Shearografia instantânea multidirecional. 2018. 127 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. 2018.
- [28] LUIZ, J.O. Desenvolvimento de uma bancada de testes para avaliação de sistemas de shearografia submetidos a vibrações. 94 p. Monografia (TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- [29] ANISIMOV, A. G.; GROVES, R. M. 3D shape shearography with integrated structured light projection for strain inspection of curved objects. 2015.
- [30] TAKEDA, M.; INA, H.; KOBAYASHI, S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. Journal of the Optical Society of America, 1982.
- [31] VIOTTI, M.; ALBERTAZZI, A. Robust speckle metrology techniques for stress analysis and NDT. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2014.
- [32] STAUB, D. F. Caracterização de defeitos por excitação dinâmica e shearografia com iluminação pulsada. 2018. 281 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina. 2018.
- [33] LIMA, T. P. Configuração de shearografia instantânea com fendas paralelas. 2022. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina. 2022.
- [34] BENEDET, Mauro Eduardo et al. The use of Shearography technique to evaluate polymeric composite repairs – case study. Material Magazine, [S. l.], 8 p., 2017.
- [35] BACK, N. et al. Projeto Integrado de Produtos: planejamento, concepção e modelagem. São Paulo: Manole, 2008.
- [36] ISIS - Shearography NDT. Disponível em <https://pdf.directindustry.com/pdf/steinbichler-optotechnik/isis-shearography-ndt/24625-167939.html>. Acesso em: 20 set. 2023.
- [37] Laser Shearography NDT. Disponível em <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/laser-shearography-ndt/>. Acesso em: 20 set. 2023.

- [38] FIGUEREDO T. R. Inspeção de defeitos em revestimentos de materiais compósitos em ambiente subaquático pela técnica de shearografia. 153 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina. 2019.
- [39] BORTOLI, T. J. Método Híbrido Usando Shearografia Para Determinar Raios de Furos Passantes em Tubos Metálicos Sob Reparos de Materiais Compósitos. 2019. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- [40] DEBASTIANI, D. J. Aplicação da shearografia com excitação por indução para a inspeção não destrutiva de revestimentos compósitos. 61p. Relatório – Universidade do Estado de Santa Catarina. 2017.
- [41] ZHANG G. Exploration on Optimizing Maintenance Management by Using Condition Monitoring on Drilling Platforms in COSL. 62 p. Master Thesis in Offshore Technology – University of Stavanger, 2012.
- [42] SEIBERT, A. A. Aplicações de carregamento térmico para inspeção não-destrutiva de revestimentos de materiais compósitos. 2022. 169 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2022.
- [43] OLIVEIRA, G. V. Desenvolvimento de um protótipo de carregamento térmico por indução para inspeções por shearografia. 2020. 76 f. Monografia (TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2020.
- [44] THORLABS. Diodo Laser 532 nm DPSS. Disponível em: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5597&pn=DJ532. Acesso em: 20 out. 2023.
- [45] BASLER. Basler ace acA2440-75um. Disponível em: <https://www.baslerweb.com/en-us/shop/aca2440-75um>. Acesso em: 21 out. 2023.
- [46] TAKEDA, M.; MUTOH K., Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes, Appl. Opt. 22, 3977-3982 (1983).
- [47] KAZUYOSHI. I., Analysis of the phase unwrapping problem, Applied Optics, Vol. 21, No. 14, p. 2470, July 15, 1982.