

Fabio Aparecido Alves da Silva

**COLAR DE MÚLTIPLOS SENSORES DE SHEAROGRAFIA
PARA INSPEÇÃO DE REPAROS E UNIÕES DE MATERIAIS
COMPÓSITOS**

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

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

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

Florianópolis
2016

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

Silva, Fabio Aparecido Alves da
Colar de múltiplos sensores de shearografia para
inspeção de reparos e uniões de materiais compósitos / Fabio
Aparecido Alves da Silva ; orientador, Armando Albertazzi
Gonçalves Júnior ; coorientador, Daniel Pedro Willemann. -
Florianópolis, SC, 2016.
168 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Inspeção em materiais
compósitos. 3. Interferometria Speckle. 4. Shearografia. 5.
Desenvolvimento de Produto. I. Gonçalves Júnior, Armando
Albertazzi. II. Willemann, Daniel Pedro. III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. IV. Título.

Fabio Aparecido Alves da Silva

**COLAR DE MÚLTIPLOS SENSORES DE SHEAROGRAFIA
PARA INSPEÇÃO DE REPAROS E UNIÕES DE MATERIAIS
COMPÓSITOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 29 de julho de 2016.

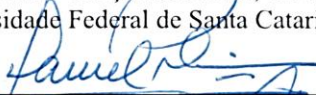


Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

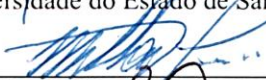
Banca Examinadora:



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



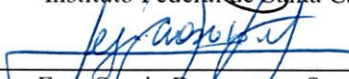
Prof. Daniel Pedro Willemann, Dott. Ing. – Coorientador
Universidade do Estado de Santa Catarina



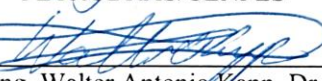
Prof. Milton Pereira, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. André Roberto de Sousa, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina



Eng. Sergio Damasceno Soares, Dr.
PETROBRAS/CENPES



Eng. Walter Antonio Kapp, Dr.
EngEMOVI

Dedico este trabalho
aos meus pais,
Ademar Alves da Silva (*in memoriam*) e
Santa Gabriel da Silva;
ao meu padrinho José Guiomar Gabriel;
ao meu querido filho Dylan Clemens da Silva;
à minha namorada Luciana Rodrigues de Oliveira;
pela paciência, incentivo e confiança a mim transmitidos
ao longo deste trabalho e de toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade, estrutura e pelos ensinamentos transmitidos pelo seu capacitado corpo docente.

À coordenação do POSMEC pelo suporte ao longo do curso.

Ao CENPES/PETROBRAS, por disponibilizar os recursos financeiros que viabilizaram o desenvolvimento deste trabalho, e ao coordenador do projeto SHIC na PETROBRAS, Eng. Sergio Damasceno, que nunca poupou esforços para contribuir com o sucesso do projeto.

Aos membros da banca examinadora, Prof. André Roberto de Sousa, Prof. Milton Pereira, Eng. Sergio Damasceno e Eng. Walter Kapp, pela disponibilidade de participar e contribuir com o trabalho.

Ao meu orientador Prof. Armando Albertazzi, pela oportunidade que me foi dada de realizar este mestrado, pela atenciosa orientação e principalmente pela confiança, credibilidade e paciência que me dispensou ao longo de todo o trabalho.

Ao meu coorientador Prof. Daniel Pedro Willemann, pela magnífica revisão da dissertação, pelo suporte nos testes e experimentos, e pelo conhecimento transmitido ao longo deste trabalho.

Ao meu amigo e companheiro de trabalho Eng. Matias Roberto Viotti, por sempre me incentivar nos meus sonhos, pela confiança no meu trabalho, e por estar sempre disponível para esclarecer minhas dúvidas, nunca hesitando em propagar seu conhecimento.

Aos amigos e companheiros de projeto Analucia Fantin, Claudio Schmitz e Mauro Benedet, pelas inúmeras ajudas ao longo do trabalho, por transmitirem seus conhecimentos e pela paciência que tiveram em esperar pelo tão prometido churrasco.

Ao amigo e futuro engenheiro James Nogueira, por “tipicamente” ter contribuído na elaboração dos inúmeros experimentos, e nas análises dos dados coletados.

Aos amigos engenheiros Anderson Pacheco, Cícero Walendowsky, Danilo Bonomo e Filipe Broetto, e ao Prof. Tiago Loureiro da Costa Pinto, pelos inúmeros conselhos e por compartilharem suas experiências, as quais foram fundamentais nas etapas de avaliação e conclusão deste trabalho.

À equipe de colaboradores do LABMETRO/UFSC, Eng. Celso Veiga pela experiência transmitida, Tecg. Elsie Varela pela contribuição nos experimentos, Eng. Pedro Buschinelli pela ajuda nas análises metrológicas dos dados, e a sempre animada e prestativa Rosana Vieira,

pelo incentivo e agilidade nas questões burocráticas que surgiram ao longo deste trabalho.

Aos estagiários do projeto SHIC, Eduardo Fronza, Eduardo Vieira, Gislaíne Hoffmann, Jonathan Luiz, Leandro Neves, Renan Daquina, por direta ou indiretamente terem contribuído com o trabalho.

À equipe do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA), em especial ao Eng. Jacson Gil Vargas, aos doutorandos Olavo Silva e Diego Staub e ao Prof. Arcanjo Lenzi, pela atenção e suporte nas medições com o vibrômetro laser.

À equipe do LABMETRO/LIAE, Cezar Alberto Penz, Maurício Schaefer e Miguel Burg Demay, pelas inúmeras contribuições ao longo do trabalho.

À CERTI – Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras, e aos seus colaboradores Alexandre Marcondes, Filipe Fontana, Girlei Fagundes, Mateus Dieckmann, Thiago Coutinho e Thiago Linhares, por viabilizarem as medições de tomografia computadorizada, sistema de medição óptica 3D e calibração dos sensores de temperatura.

Às empresas GW Usinagem, através de seus colaboradores Fábio, Ginter, Odirlei, Rubens e Lucas, e Simultânea Usinagem, representada por Alessandro Bortotti, pela fabricação dos componentes mecânicos do sistema.

Aos amigos Cíntia Alves, Darlan Becker, David Willemann, Françaó Horn, Gabriel Nery, Heloisa Costa, Isis Silveira, João Paulo Martins de Souza, José Antônio Piné, Livia Lothhammer, Maryah Haertel, Pedro Henrique Nadal, Rafael Chede Buffara, Ricardo Costa, e aos primos Antonio Paes Jr. e Vagner de Araujo Gabriel, pelo apoio, incentivo e pelos inúmeros momentos de alegria e descontração.

A toda minha família (incluindo Jay, Kirra e Sophie) e acima de tudo à Deus.

*“O fracasso sempre me levou a tentar
com mais entusiasmo na vez seguinte.”*
(Michael Jordan)

“A persistência é o caminho do êxito.”
(Charles Chaplin)

RESUMO

Com importantes aplicações nos mais diversos setores industriais, os materiais compósitos têm encontrado sua aplicação também na indústria petroquímica. A fabricação de tubos e componentes de tubulação, bem como, a utilização de material compósito em reparos de estruturas metálicas são, atualmente, as aplicações mais difundidas neste setor. Defeitos na fase de montagem de tubulações de compósito e na aplicação dos reparos em campo são predominantes no histórico de falhas destes materiais na indústria do petróleo e gás. Neste contexto, torna-se imprescindível o desenvolvimento de equipamentos e métodos capazes de inspecionar estas estruturas de compósito. A prática da inspeção contribui para minimizar a probabilidade de ocorrência de danos causados por um eventual colapso nas tubulações das instalações petroquímicas. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de inspeção capaz de avaliar tanto a qualidade de reparos compósitos aplicados em tubulações metálicas com trincas, ranhuras ou degradadas pela ação de corrosão, como também a qualidade de adesão de juntas tipo ponta e bolsa em tubulações de compósito. Um sistema modular com múltiplos sensores a laser, utilizando a técnica interferométrica shearografia, foi projetado e fabricado. Os resultados deste trabalho mostram que é possível inspecionar, de forma rápida e em uma única etapa, toda região perimetral de uma junta adesivada ou de um reparo de compósito. O método de inspeção proposto é não destrutivo e pode ser executado durante a operação da linha, sem impacto na sua produção. Experimentos aprofundados, com diferentes módulos do equipamento, permitiram avaliar de forma criteriosa o desempenho do sistema visando a sua aplicação em campo e o aumento da segurança deste setor industrial.

Palavras-chave: Inspeção em materiais compósitos. Ensaio não destrutivo. Interferometria *Speckle*. *Shearografia*. Óptica difrativa. Desenvolvimento de produto.

ABSTRACT

Composite materials are widely applied in several industrial sectors, including the oil and gas industry. The use of fiber reinforced plastic pipes and fittings as well as the use of composite material to protect or repair corroded metal structures and parts are currently the most widespread applications in this sector. In the oil and gas industry, defects in composite materials can arise during the pipe assembly stage and the application of the repairs in field. In this context, it is essential to develop equipment and methods to inspect these composite structures. The practice of inspection helps to minimize the probability of damage occurrence caused by a possible collapse in the pipelines or other parts of petrochemical plants. This work presents the development and evaluation of an inspection system able to assess both the quality of composite repairs applied to metal pipes degraded by corrosion, as the quality of adhesion of composite bell-and-spigot joints. A modular system with multiple laser sensors using shearography, an interferometric optical technique, was designed and manufactured. The results of this study show that it is possible to inspect, quickly and in one step, the entire perimeter of a bonded joint or a composite repair. The proposed inspection method is non-destructive and may be performed during line operation without impact on production. Careful experiments with different equipment modules have been carried out to evaluate the system performance, aiming its application in field and the safety increasing in the oil and gas industry.

Keywords: Inspection of composite materials. Non-destructive testing. Speckle interferometry. Shearography. Diffractive optics. Product development.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma para a análise e diagnóstico de defeito e reparo em uma tubulação de aço. Adaptado de [3].	34
Figura 2.2 – Aplicação de material compósito em segmento de tubo de aço [10].	35
Figura 2.3 – Falhas potenciais de reparos de compósito aplicados a um substrato metálico. Adaptado de [11].	36
Figura 2.4 – Tipos de uniões. (a) Ponta e bolsa adesivada; (b) Laminada; (c) Roscadas; (d) Flangeadas; (e) Com vedação elastomérica. Adaptado de [14].	37
Figura 2.5 – Aplicação <i>offshore</i> de tubulações de PRFV [15].	38
Figura 2.6 – Falta de adesivo em uma união do tipo ponta e bolsa [16].	38
Figura 2.7 – Aplicação de revestimento de compósito no exterior de tanques de armazenamento de combustível [21].	39
Figura 2.8 – Aplicação de revestimento de compósito no interior de tanques de armazenamento de combustível [21].	40
Figura 2.9 – Aplicação de revestimento de compósito em tanques de lastro de um navio plataforma tipo FPSO. (a) Piso com corrosão; (b) Processo de aplicação do compósito; (c) Piso reparado. Adaptado de [17].	40
Figura 3.1 – Princípio de Huygens. Adaptado de [22].	41
Figura 3.2 – Típica distribuição <i>speckle</i> simulada [23].	42
Figura 3.3 – Disco de Airy.	42
Figura 3.4 – (a) <i>Speckle</i> objetivo; (b) <i>Speckle</i> subjetivo. Adaptado de [23].	43
Figura 3.5 – Sobreposição de dois padrões de difração de Fraunhofer. As linhas tracejadas representam os padrões de difração de cada ponto. As linhas cheias representam a combinação dos efeitos. Adaptado de [26].	44
Figura 3.6 – Deslocamento de fase gerado por: (a) rotação de uma placa de quarto de onda; (b) inclinação de uma lâmina de vidro; (c) movimentação lateral de uma grade difrativa; (d) movimentação de um espelho com PZT. Adaptado de [23].	46
Figura 3.7 – Efeito produzido pelo par de imagens lateralmente deslocadas, gerado por um dispositivo óptico característico de um sistema de <i>shearografia</i> .	48
Figura 3.8 – Padrão de franjas característico em uma medição com <i>shearografia</i> produzido por: (a) Deslocamento lateral horizontal ($\partial w/\partial x$); (b) Deslocamento lateral vertical ($\partial w/\partial y$) [30].	49
Figura 3.9 – Distribuição 3-D da primeira derivada do deslocamento da superfície após remoção do salto de fase produzido por: (a) Deslocamento lateral horizontal ($\partial w/\partial x$); (b) Deslocamento lateral vertical ($\partial w/\partial y$).	49
Figura 3.10 – Superfície obtida pela integração da distribuição 3-D da primeira derivada do deslocamento.	50
Figura 3.11 – Detecção de falha de adesão por carregamento térmico.	51
Figura 3.12 – Detecção de falha de adesão por carregamento mecânico.	51
Figura 3.13 – Detecção de falha de adesão por carregamento a vácuo.	52

Figura 3.14 – Detecção de falha de adesão por carregamento vibracional.	53
Figura 3.15 – Exemplos de inspeções com <i>shearografia</i> . (a) Avaliação da qualidade de pneus na indústria automobilística; (b) Avaliação do bordo de ataque de uma asa na indústria aeronáutica [34].....	54
Figura 3.16 – Inspeções de <i>shearografia</i> aplicados na indústria do petróleo e gás. (a) Inspeção em uniões adesivadas de tubulações de compósito; (b) e (c) Inspeções em reparos de compósito aplicados em tubulações metálicas; (d) Inspeção em revestimentos de tanques de armazenamento [35].....	55
Figura 3.17 – Arranjo óptico tradicional de sistema de <i>shearografia</i> , baseado no interferômetro de Michelson modificado.	56
Figura 3.18 – Relação da área medida na superfície do objeto com o tamanho do divisor de feixes do interferômetro de Michelson modificado.	57
Figura 3.19 – Arranjo óptico de sistema de <i>shearografia</i> com configuração 4f.	58
Figura 3.20 – Esquema de uma grade difrativa de transmissão em fase.....	59
Figura 3.21 – Arranjo óptico de sistema de <i>shearografia</i> utilizando grade difrativa.	60
Figura 3.22 – Prisma de Wollaston.....	62
Figura 3.23 – Arranjo óptico de sistema de <i>shearografia</i> utilizando prisma de Wollaston.....	63
Figura 3.24 – Vetor sensibilidade de um determinado ponto da superfície.	64
Figura 3.25 – Diferença de trajetória da luz do laser entre dois pontos da superfície após uma deformação do objeto. Adaptado de [33].	65
Figura 3.26 – Processo para obtenção do mapa das diferenças de fase característico de <i>shearografia</i> , utilizando o algoritmo de quatro passos.	66
Figura 3.27 – Resultados de medição da deformação de uma membrana metálica com <i>shearografia</i> , onde apenas o valor do deslocamento lateral (δx) das imagens foi alterado, sendo δx em (a) $<$ δx em (b)	67
Figura 4.1 – Comparação entre as configurações: (a) com quatro sensores e (b) com três sensores, para inspecionar tubulações de 6”.....	73
Figura 4.2 – <i>Spool Bondstrand 7000M CP3</i> com diâmetro nominal de 6”.....	74
Figura 4.3 – Mudança do número de sensores do sistema de inspeção conforme o diâmetro da tubulação.....	74
Figura 4.4 – Modelo óptico geométrico.....	76
Figura 4.5 – Orientação do sensor de imagem em relação à tubulação.	77
Figura 4.6 – Aparato para obtenção da curva característica da microlente.....	79
Figura 4.7 – (a) Feixe luminoso projetado em uma superfície translúcida simulando um objeto; (b) Anteparo utilizado para projeção da imagem.	80
Figura 4.8 – Curva de focalização característica da lente.	80
Figura 4.9 – Identificação do plano característico da microlente.	81
Figura 4.10 – Arranjo óptico do sistema 4f.....	82
Figura 4.11 – Sistema óptico 4f. (1) Tubo metálico para suporte da lente objetiva; (2) Corpo principal; (3) Suporte câmera; (4) Suporte do conector elétrico do PZT; (5) Suporte do interferômetro com PZT e mecanismo para deslocamento lateral; (6) Tampa traseira.	83

Figura 4.12 – Aparato experimental para avaliação da configuração óptica com grade difrativa. (1) Câmera CCD; (2) Conjunto grade difrativa e PZT; (3) Lente objetiva; (4) Laser diodo vermelho; (5) Conjunto de lentes para expansão do feixe luminoso; (6) Simulador de deformações; (7) <i>Driver</i> do PZT; (8) <i>Driver</i> do laser diodo.....	84
Figura 4.13 – Diferenças de contraste apresentadas na primeira etapa dos experimentos com o sistema difrativo.	85
Figura 4.14 – Perda de contraste devido à orientação do laser em relação à grade difrativa. (a) Iluminação pelo lado esquerdo; (b) Iluminação pelo lado direito.	85
Figura 4.15 – Configuração com laser inclinado na direção perpendicular ao sentido do deslocamento lateral.	86
Figura 4.16 – Resultados da medição com a nova orientação da iluminação. ...	86
Figura 4.17 – Suporte flexível da grade difrativa.	87
Figura 4.18 – Módulo de formação e aquisição de imagem difrativo. (1) suporte da lente objetiva; (2) suporte da grade difrativa; (3) suporte do sensor CCD de imagem; (4) carcaça da câmera e (5) suporte do conector elétrico do PZT.	88
Figura 4.19 – Comparação entre os módulos de formação e aquisição de imagem difrativo e $4f$	88
Figura 4.20 – Módulo 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.	90
Figura 4.21 – Estudo geométrico dos pontos de apoio e dos pivôs da estrutura de sustentação e fixação do sistema de <i>shearografia</i>	91
Figura 4.22 – Estrutura de sustentação e fixação. (1) Suporte do módulo de iluminação; (2) Placa tensionadora; (3) Manopla para ajuste/aperto do Colar ao corpo da tubulação; (4) Buchas dos pivôs; (5) Eixo para fechamento da estrutura; (6) Apoio ajustável; (7) Apoios fixos.	92
Figura 4.23 – Submódulos funcionais: (a) de sustentação; (b) de fixação.	93
Figura 4.24 – Sistema de ajuste e fixação. (a) Sistema retraído, com mola helicoidal (3) comprimida e molas prato (4) relaxadas; (b) Sistema avançado, com mola helicoidal (3) relaxada e molas prato (4) comprimidas.	94
Figura 4.25 – Indicador de carregamento do sistema. (a) Sem carregamento; (b) Carga mínima atingida.	95
Figura 4.26 – Acoplamento do Colar em uma tubulação de 6” de diâmetro. ...	96
Figura 4.27 – Acoplamento de um único sensor em uma tubulação de 6” de diâmetro.	97
Figura 4.28 – Montagem do sistema de inspeção $4f$ com tripé.	97
Figura 4.29 – Comparação volumétrica entre os sistemas de <i>shearografia</i> do projeto SHIC. (a) Sistema de inspeção precursor, baseado no interferômetro de Michelson modificado; (b) Sistema de inspeção difrativo.	98
Figura 5.1 – Procedimento de calibração do PZT do sistema de inspeção $4f$	100
Figura 5.2 – Curva de calibração do PZT, do sistema $4f$, com a repetibilidade obtida nas medições com nível de confiança de 95,45%.	101

Figura 5.3 – Bancada para calibração do PZT do sistema com grade difrativa. (a) Espelho de calibração fixo ao suporte da grade difrativa; (b) Montagem com Interferômetro de Michelson.	102
Figura 5.4 – Procedimento de obtenção da curva tensão x deslocamento do PZT.	103
Figura 5.5 – Curva de calibração do PZT, do sistema difrativo, com a repetibilidade obtida nas medições com nível de confiança de 95,45%.	104
Figura 5.6 – Bancada para ajuste óptico dos sistemas. (a) Projeção de uma linha laser no plano objeto. (b) Imagem obtida pelo sistema com grade difrativa 0+1; (c) Imagem obtida pelo sistema com a grade difrativa -1+1.	105
Figura 6.1 – Calibração dos termopares tipo T por comparação com instrumento-padrão.	108
Figura 6.2 – Bancada para avaliação da influência térmica no desempenho do módulo de iluminação. (a) Esquema de ligação da bancada; (b) Laser localizado no interior do tubo, com resistência elétrica tipo coleira para aquecimento; (c) Disposição física da bancada.	108
Figura 6.3 – Gráficos de avaliação da influência térmica na potência do laser. Tempos de análise: (a) 180 min; (b) 335 min.	109
Figura 6.4 – Gráfico de avaliação da influência térmica na potência do laser com temperatura acentuada.	111
Figura 6.5 – Simulação térmica do módulo de iluminação laser.	112
Figura 6.6 – Configuração da bancada para análise modal experimental com vibrômetro laser.	114
Figura 6.7 – Malha gerada para a análise modal da estrutura metálica na direção frontal (a) e lateral (b) do sistema de inspeção.	115
Figura 6.8 – Modo de deflexão operacional da estrutura do sistema de inspeção difrativo na frequência de 12,5 Hz.	115
Figura 6.9 – Modos de vibração da estrutura de sustentação e fixação do sistema difrativo, na faixa de frequência de (0 a 500) Hz.	116
Figura 6.10 – Modo de deflexão operacional da estrutura do sistema de inspeção 4f na frequência de 23,1 Hz.	117
Figura 6.11 – Bancada para avaliação da eficiência das grades difrativas.	119
Figura 6.12 – Efeito da sobreposição das imagens geradas pela grade 0+1. ...	120
Figura 6.13 – Efeito da sobreposição das imagens geradas pela grade -1+1. .	121
Figura 6.14 – Medição dos passos das grades utilizando uma máquina de medição óptica 3D. (a) Passo da grade -1+1; (b) Passo da grade 0+1.	121
Figura 6.15 – Comparativo entre as medições obtidas pelo módulo de formação e aquisição de imagem difrativo: (a) grade -1+1; (b) grade 0+1.	122
Figura 6.16 – Simulador de deformações fora do plano acionado por parafuso micrométrico.	123
Figura 6.17 – Comparação entre os resultados de medição dos módulos (a) difrativo e (b) 4f.	123
Figura 6.18 – Resultados da avaliação de decorrelação por translação do sistema difrativo.	125

Figura 6.19 – Curva de conversão de deslocamentos do objeto em deslocamentos do <i>speckle</i> na imagem.....	126
Figura 6.20 – Bancada experimental de vibrações.....	127
Figura 6.21 – Avaliação dos módulos de formação e aquisição de imagem em ambiente com vibrações.....	128
Figura 6.22 – Quadro comparativo da qualidade das medições obtidas pelos módulos de formação e aquisição de imagem em ambiente com vibração.	129
Figura 6.23 – Identificação das posições, tamanhos e tipos de defeitos inseridos nas interfaces das juntas ponta e bolsa do corpo de prova CP3.	130
Figura 6.24 – Medição das juntas ponta e bolsa do CP3. (a) Colar montado na tubulação e computador para aquisição de dados. (b) Sistema de pressurização do tubo: bomba hidráulica manual e manômetro.	131
Figura 6.25 – Resumo dos resultados das inspeções das juntas ponta e bolsa adesivadas, do corpo de prova CP3, obtidos com uma variação de pressão hidrostática de 600 kPa.	132
Figura 6.26 – Tamanho, forma e tipo de defeito inserido na região da junta ponta e bolsa. (1) Defeito retangular com lâmina de teflon; (2) Defeito circular com lâmina de teflon; (3) Defeito elíptico com parafina.	133
Figura 6.27 – Montagem do corpo de prova CP0, com os defeitos artificialmente inseridos na região da união.	134
Figura 6.28 – Bancada experimental para avaliação de junta ponta e bolsa com defeitos inseridos.	135
Figura 6.29 – Preparação do CP0 para tomografia computadorizada.	135
Figura 6.30 – Tomografia computadorizada das juntas adesivadas do CP0. (a) Junta J0 inserida no interior do tomógrafo para realização da inspeção; (b) Exemplos de resultados obtidos na tomografia da junta J0.	136
Figura 6.31 – Comparação entre resultados de <i>shearografia</i> e tomografia computadorizada, obtidos nas inspeções da junta J0, do corpo de prova CP0.	137
Figura 6.32 – Comparação entre resultados de <i>shearografia</i> e tomografia computadorizada, obtidos nas inspeções da junta J11, do corpo de prova CP0.	138
Figura 6.33 – Bancada experimental de vibrações com tubo acoplado à mesa metálica.....	141
Figura 6.34 – Defeito com controle de deformação por parafuso micrométrico.	141
Figura 6.35 – Curvas de vibração do tubo e do sistema de inspeção.	143
Figura 6.36 – Funções de resposta em frequência do sistema de inspeção difrativo: (a) FRF na direção x; (b) FRF na direção y.	144
Figura 6.37 – Fase relativa entre os deslocamentos em x do sistema e do tubo.	145
Figura 6.38 – Deslocamento relativo entre o tubo e o sistema de inspeção.	145
Figura 6.39 – Deslocamento máximo do tubo para viabilizar a inspeção.	146
Figura 6.40 – Medição da junta ponta e bolsa com vibrações.	147
Figura 6.41 – Deslocamento do <i>spool</i> registrado na medição.....	148
Figura 6.42 – Avaliação da probabilidade de inspeção da qualidade da junta.	148

Figura 6.43 – Resultado da inspeção de uma seção de uma junta ponta e bolsa em ambiente com vibrações.	149
Figura 6.44 – Identificação de defeitos em inspeções realizadas em campo [35].	150
Figura 6.45 – Resultado das inspeções realizadas em tubulações com vibração presente [35].	151
Figura 6.46 – Inspeções em campo realizadas pela equipe do projeto SHIC [35].	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Temperaturas máximas de trabalho de tubulações de PRFV [12].	36
Tabela 2.2 – Estimativa hora-homem para montagem de uma união em tubulações metálicas e de materiais compósitos [14].	37
Tabela 3.1 – Eficiência das ordens de difração de uma grade binária ideal [38].	60
Tabela 4.1 – Resumo dos requisitos de projeto.	72
Tabela 4.2 – Valores comparativos entre os módulos de formação e aquisição de imagem.	89
Tabela 4.3 – Faixa de adaptação da estrutura do Colar.	93
Tabela 4.4 – Valores comparativos entre os sistemas de inspeção de shearografia do projeto SHIC.	98
Tabela 6.1– Temperatura de trabalho com melhor estabilidade luminosa do laser, dentro da faixa de temperatura avaliada.	111
Tabela 6.2 – Eficiência de cada ordem de difração das grades analisadas.	119
Tabela 6.3 – Avaliação das medições dos módulos em ambiente com vibrações.	129
Tabela 6.4 – Fontes de vibração comuns na indústria [20].	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
CCD	<i>Charge Couple Device</i> (Sensor de Imagem baseado em Dispositivo de Carga Acoplada)
CENPES	Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello
CERTI	Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras
CP	Corpo de Prova
DoF	<i>Depth of Field</i> (Profundidade de Campo)
END	Ensaio Não Destrutivo
FoV	<i>Field of View</i> (Campo de Visão do Sistema Óptico)
FPSO	<i>Floating Production, Storage and Offloading</i> (Unidades Flutuantes de Produção, Armazenamento e Transferência de Petróleo)
FRF	Função de Resposta em Frequência
LABMETRO	Laboratório de Metrologia e Automatização
LAMIA	Implantação de Infraestrutura Laboratorial para P&D em Soluções de Medição e Instrumentação Avançadas para o Setor Petróleo e Gás
LVA	Laboratório de Vibrações e Acústica
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NPS	<i>Nominal Pipe Size</i> (Tamanho Nominal do Tubo)
ODS	<i>Operating Deflection Shapes</i> (Formas de Deflexão Operacional)
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
PID	Controle Proporcional Integral Derivativo
PRF	Plástico Reforçado com Fibras
PRFC	Plástico Reforçado com Fibras de Carbono
PRFV	Plástico Reforçado com Fibras de Vidro
PZT	<i>Piezoelectric Transducer</i> (Transdutor Piezoelétrico)
ROI	<i>Region of Interest</i> (Região de Interesse)
SHIC	Shearografia para a Inspeção de Compósitos
SILICCOM	<i>Software</i> do Sistema Laser para Inspeção de Cilindros Leves de Materiais Compósitos para Aplicações de Gás Natural Veicular
TC	Tomografia Computadorizada
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Barramento Serial Universal)

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino:

c	Círculo de confusão na imagem
d	Profundidade do sulco da grade difrativa
\mathbf{d}	Vetor deslocamento
D	Diâmetro da íris
D_{hip}	Distância hiperfocal
d_{sp}	Diâmetro médio do <i>speckle</i>
$(d_{sp})_{objeto}$	Diâmetro do <i>speckle</i> na superfície do objeto
f	Comprimento focal de lentes
$f/\#$	<i>f</i> -number
$H_x(\omega), H_y(\omega)$	Função resposta em frequência nas direções x e y
$\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$	Vetores unitários nas direções x, y e z
I	Intensidade resultante da interferência de feixes
I_0	Intensidade de fundo
I_1, I_2	Intensidade dos feixes
I_M	Intensidade média
\mathbf{k}_s	Vetor sensibilidade do sistema
m	Ordem de difração
M_g	Magnificação do sistema óptico
n	Índice de refração do meio
V	Contraste das franjas
u, v, w	Deslocamentos nas direções x, y e z
x, y, z	Direções cartesianas
$X_{rel_x}(\omega)$	Deslocamento relativo entre o sistema e a superfície de inspeção na direção x
$X_{SI}(\omega)$	Deslocamento do sistema na direção x
$X_T(\omega)$	Deslocamento do tubo na direção x
$X_{T_max_x}(\omega)$	Deslocamento máximo do tubo na direção x
$X_{T_max_y}(\omega)$	Deslocamento máximo do tubo na direção y
y_i, y_o	Tamanho da imagem e do objeto, respectivamente
$Y_{SI}(\omega)$	Deslocamento do sistema na direção x
z_i, z_o	Distância entre a íris e os planos imagem e objeto

Alfabeto grego:

α	Separação angular dos feixes emergentes de um prisma de Wollaston
η_m	Eficiência de difração
θ	Ângulo da cunha do prisma de Wollaston
θ_i	Ângulo de incidência da luz na grade difrativa
θ_m	Ângulo de difração da luz
θ_{xy}	Ângulo entre o eixo de iluminação e o eixo óptico de visualização
λ	Comprimento de onda do laser
Λ	Passo da grade difrativa
ϕ	Fase relativa entre feixes
φ	Fase em um determinado ponto do interferograma
φ_1, φ_2	Fase dos feixes
δ_x	Deslocamento lateral na imagem em <i>shearografia</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	29
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO	29
1.2 OBJETIVOS	30
1.2.1 Objetivo principal.....	30
1.2.2 Objetivos específicos.....	30
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	31
2 MATERIAIS COMPÓSITOS APLICADOS NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E GÁS.....	33
2.1 REPAROS EM TUBULAÇÕES METÁLICAS.....	33
2.2 TUBULAÇÕES DE MATERIAIS COMPÓSITOS	36
2.3 REVESTIMENTOS EM TANQUES DE ARMAZENAMENTO E ESTRUTURAS METÁLICAS DE NAVIOS	39
3 INTERFEROMETRIA <i>SPECKLE</i>.....	41
3.1 <i>SPECKLE</i>	41
3.2 DESLOCAMENTO DE FASE	46
3.3 <i>SHEAROGRAFIA</i>	47
3.3.1 Tipos de carregamentos	50
3.3.2 Aplicação da <i>shearografia</i> na indústria.....	53
3.3.3 Configurações ópticas para <i>shearografia</i> e seus dispositivos para deslocamento lateral das imagens	56
3.4 INTERPRETAÇÃO DAS FRANJAS DE <i>SHEAROGRAFIA</i>	63
4 CONFIGURAÇÃO PROPOSTA	69
4.1 REQUISITOS DE PROJETO	69
4.2 SISTEMA DE INSPEÇÃO COM MÚLTIPLOS SENSORES – COLAR	72
4.2.1 Módulo de formação e aquisição de imagem	75
4.2.2 Módulo de iluminação laser	89
4.2.3 Módulo de sustentação e fixação.....	90
4.2.4 Integração dos módulos	95
5 CALIBRAÇÃO E AJUSTES	99
5.1 DESLOCAMENTO DE FASE	99
5.1.1 Calibração do PZT do sistema de inspeção $4f$	99
5.1.2 Calibração do PZT do sistema de inspeção difrativo	101
5.2 AJUSTE ÓPTICO DOS CABEÇOTES DIFRATIVO E $4f$	104
6 AVALIAÇÃO DO SISTEMA	107
6.1 MÓDULO DE ILUMINAÇÃO	107
6.1.1 Influência térmica no desempenho do laser.....	107

6.1.2	Avaliação da condutividade térmica da carcaça do módulo de iluminação.....	111
6.2	MÓDULO DE SUSTENTAÇÃO E FIXAÇÃO.....	112
6.2.1	Análise modal experimental com vibrômetro laser.....	113
6.3	MÓDULOS DE FORMAÇÃO E AQUISIÇÃO DE IMAGEM.....	118
6.3.1	Avaliação da grade difrativa	118
6.3.1	Avaliação dos interferogramas.....	122
6.3.2	Avaliação da decorrelação do <i>speckle</i>	124
6.3.3	Avaliação em ambiente com vibração.....	127
6.4	SISTEMA DE INSPEÇÃO COM MÚLTIPLOS SENSORES – COLAR.....	129
6.4.1	Medição do <i>spool</i> CP3	130
6.4.2	Caracterização dos resultados de <i>shearografia</i>	133
6.4.3	Medição em ambientes sujeitos a vibrações.....	140
6.5	ENSAIOS EM CAMPO	149
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	153
7.1	AVALIAÇÃO GERAL DO TRABALHO	153
7.1.1	Quanto ao módulo de iluminação.....	153
7.1.2	Quanto ao módulo de sustentação e fixação.....	154
7.1.3	Quanto ao módulo de formação e aquisição de imagens $4f$	155
7.1.4	Quanto ao módulo de formação e aquisição de imagens difrativo.	155
7.1.5	Quanto ao funcionamento geral do sistema.....	156
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	156
	REFERÊNCIAS.....	157
	APÊNDICE A.....	163
	APÊNDICE B.....	165

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento tecnológico contemporâneo não poderia ser tão significativo sem os correspondentes avanços alcançados na engenharia de materiais. Desde o início da década de 1960, houve uma crescente demanda por materiais de alto desempenho, mais resistentes, com elevada dureza e mais leves, em diversas áreas, tais como: aeroespacial, energia e construção civil [1]. Os denominados materiais compósitos foram um dos que mais contribuíram nesse processo e inúmeros produtos ganharam mercado devido às diversas características que esses materiais proporcionam.

Um material compósito é formado pela união macroscópica de dois ou mais materiais de naturezas diferentes, resultando em um material de desempenho superior àquele de seus componentes considerados separadamente. Há hoje uma grande diversidade de materiais compósitos, desde o concreto usado na construção civil até os plásticos reforçados com fibras de carbono utilizados na moderna indústria aeroespacial. O tipo de material compósito envolvido neste trabalho é o plástico reforçado com fibras (PRF), que resulta de um arranjo resistente de fibras, contínuas ou não, denominado reforço, que é impregnado em uma matriz polimérica de resistência mecânica inferior às fibras [2].

Os PRFs são muito utilizados pela indústria petroquímica na fabricação de tubos e componentes de tubulação. Além dessas aplicações, materiais compósitos também são usados para a fabricação de componentes estruturais nas plataformas de petróleo, tais como guarda-corpos e pisos. Uma aplicação mais recente desses materiais, que vem sendo bastante difundida na área de petróleo e gás, é o reparo de compósito aplicado sobre estruturas e componentes metálicos. Esta prática proporciona o prolongamento da vida útil do sistema reparado, contribuindo, assim, com sua integridade e segurança. As primeiras aplicações de materiais compósitos para reparo de dutos com escoamento de gases datam da década de 90 [3].

Defeitos na fase de montagem de tubulações de compósito e na aplicação de reparos em campo são predominantes no histórico de falhas em materiais compósitos na indústria do petróleo e gás. Nas tubulações de compósito, os defeitos acontecem normalmente na região das uniões adesivadas. Se não detectados e corrigidos em uma fase prematura, estes

defeitos podem evoluir e levar a falhas operacionais, o que pode acarretar em vazamento de insumos.

Diante disso, torna-se necessário o desenvolvimento de equipamentos e métodos para inspecionar tanto a qualidade de reparos, como também a qualidade de uniões adesivadas em tubulações de compósitos, a fim de garantir sua integridade. A prática da inspeção contribui para minimizar a probabilidade de ocorrência de danos gerados por um eventual colapso de gasodutos e oleodutos. Estes fatores delinearão e motivaram o desenvolvimento deste trabalho.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos foram delineados para atender às demandas da indústria do petróleo e gás para inspecionar a integridade de uniões adesivadas em tubulações de materiais compósitos e a adesão dos reparos de materiais compósitos aplicados em tubulações metálicas.

1.2.1 Objetivo principal

A proposta deste trabalho é desenvolver um sistema de inspeção com múltiplos sensores capaz de avaliar, a partir de um único posicionamento, a adesão em juntas denominadas ponta e bolsa (*bell and spigot*, em inglês) existentes em tubulações inteiramente feitas de materiais compósitos. O mesmo sistema deverá ser capaz de inspecionar a integridade da adesão de reparos de materiais compósitos aplicados na superfície externa de tubulações metálicas com trincas, ranhuras ou degradadas pela ação de corrosão.

1.2.2 Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos foram definidos para a efetivação do trabalho:

- a) Levantar e especificar detalhadamente os aspectos técnicos e operacionais necessários ao sistema de inspeção com múltiplos sensores. A verificação da integridade da aderência de juntas adesivadas e reparos de materiais compósitos, usadas na indústria do petróleo e gás, foi tomada como foco do estudo;
- b) Conceber e desenvolver todas as etapas do projeto de um protótipo: informacional, conceitual, básico e detalhado. O protótipo deve ser desenhado para uso em campo, preservando requisitos de modularidade e compactação, estando adequado à

- dinâmica do processo de inspeção a fim de manter elevada a produtividade da inspeção;
- c) Construir o sistema projetado com base na concepção desenvolvida;
 - d) Avaliar o desempenho do sistema em laboratório e em campo.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está subdividido em sete capítulos. O capítulo 2 tem o objetivo de abordar as principais aplicações de materiais compósitos na indústria do petróleo e gás.

No capítulo 3, uma revisão bibliográfica relacionada à interferometria *speckle* é apresentada.

O capítulo 4 apresenta os requisitos de projeto e as configurações propostas no trabalho. A concepção desenvolvida é minuciosamente apresentada no capítulo.

O capítulo 5 descreve os procedimentos de calibração e ajustes realizados para a montagem e início de operação do sistema desenvolvido.

O capítulo 6 apresenta os testes que permitiram avaliar de forma criteriosa o desempenho do sistema.

As considerações finais e sugestões para trabalhos futuros são então apresentadas no capítulo 7.

Alguns procedimentos de ajuste e resultados de inspeções realizadas no trabalho são apresentados na forma de apêndice no final deste.

2 MATERIAIS COMPÓSITOS APLICADOS NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E GÁS

Como em muitos outros setores industriais, os materiais compósitos estão sendo cada vez mais inseridos também no setor petroquímico. O presente capítulo traz um resumo das aplicações de materiais compósitos mais difundidas atualmente na indústria do petróleo e gás.

2.1 REPAROS EM TUBULAÇÕES METÁLICAS

Tubulação é um conjunto de tubos interligados através de seus acessórios. A necessidade da existência das tubulações decorre principalmente do fato de o ponto de geração ou de armazenagem dos fluidos estar, em geral, distante do seu ponto de utilização. Desta forma, é necessário transportá-lo.

A importância das tubulações na indústria é enorme, sendo ainda maior nas chamadas indústrias de processo contínuo, tais como as indústrias químicas e do petróleo, nas quais as tubulações são elementos físicos de ligação entre os equipamentos (vasos de pressão, reatores, tanques, bombas, trocadores de calor, etc.), por onde circulam os fluidos de processo e de utilidades. Nessas indústrias, os custos com tubulações podem ser divididos em: (a) projeto das tubulações, que representa, em média, 20% do custo total, (b) as tubulações em si, que representam cerca de 20 a 25% do custo total da instalação industrial e (c) a montagem das tubulações, que atinge, em média, 45 a 50% do custo total [4].

Em função das tubulações terem um alto valor agregado, substituições futuras não são previstas em seus projetos, pois essa prática requer a interrupção temporária da linha de transmissão e um alto custo de mobilização de corpo técnico para efetuar o procedimento [4]. No entanto, como as tubulações estão expostas a ações locais de agentes químicos e físicos, podem ocorrer corrosões e erosões em certas regiões destes elementos. Diante disso, inspeções periódicas devem ser realizadas para avaliar a integridade estrutural destes componentes.

A detecção de danos pode ser realizada por diversas técnicas de ensaios não destrutivos (END), que são aplicáveis em função das características de cada região da linha. A inspeção visual é a técnica frequentemente utilizada para avaliar a superfície externa de tubulações e dutos expostos. A medição da parede da tubulação/duto deve ser realizada quando houver evidência de perda de espessura na inspeção visual, para determinação da espessura remanescente. Normalmente é utilizado o

ultrassom. No caso da inspeção interna, esta é tipicamente realizada através de dispositivos deslocados no interior do duto, denominados de pigs instrumentados [5][6][7][8].

O método de reparo de tubulações de aço com escoamento de petróleo ou gás é escolhido em função do grau de risco que um defeito apresenta à tubulação. Entre os tipos de reparo utilizados tem-se: o corte e substituição da região danificada, dupla calha soldada, dupla calha com enchimento e a utilização de reforços de materiais compósitos [9].

Um fluxograma sugerido na literatura (Figura 2.1) mostra uma sequência de etapas para a análise e diagnóstico de danos em uma tubulação, até a escolha do tipo de reparo a ser realizado [3].

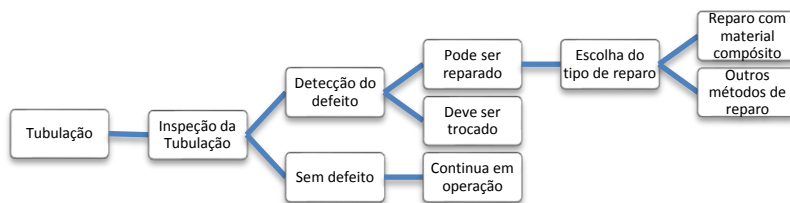


Figura 2.1 – Fluxograma para a análise e diagnóstico de defeito e reparo em uma tubulação de aço. Adaptado de [3].

Os reparos com materiais compósitos oferecem vantagens em relação aos outros métodos de reparo, tais como: (a) são de fácil aplicação, (b) podem ser executados a frio, isto é, sem a abertura de arcos de solda, (c) podem ser aplicados em defeitos de qualquer comprimento e em trechos curvos, (d) a interrupção da distribuição não é necessária e (e) têm custo de instalação relativamente baixo [10]. Existem vários tipos de materiais compósitos para reparos. A maioria utiliza mantas de fibra de vidro aplicadas em várias camadas e unidas por adesivo líquido. A Figura 2.2 apresenta dois exemplos de reparos aplicados na superfície externa de tubos de aço.



Figura 2.2 – Aplicação de material compósito em segmento de tubo de aço [10].

Os materiais compósitos são aplicados diretamente sobre o tubo de aço, na região que contém o defeito, após a realização de alguns procedimentos padrão. Estes procedimentos constituem as etapas necessárias a serem seguidas antes da aplicação do material compósito para que se tenha qualidade e confiabilidade do reparo final. Estas etapas podem ser descritas, de modo geral, de acordo com os itens listados a seguir [3].

- a) Preparação da superfície: retirada por processos físicos e químicos de resíduos metálicos, oxidação, graxas e óleos;
- b) Aplicação de camada de resina base (*primer*): nivelamento da superfície;
- c) Aplicação de camada de resina com mesma composição da matriz do material compósito para manter afinidade química da interface entre o *primer* e o material compósito;
- d) Aplicação das camadas de material compósito: realizada até atingir a espessura desejada;
- e) Aplicação de camada protetora externa: contra a ação de intempéries e raios ultravioleta.

Por melhor que seja o procedimento de aplicação do reparo, defeitos podem surgir em cada etapa e estar presentes ao final do processo, como por exemplo: delaminação (separação de duas camadas adjacentes), falta de adesão (entre o reparo e o substrato metálico), presença de vazios, porosidades, entre outros. A Figura 2.3 apresenta algumas dessas falhas.

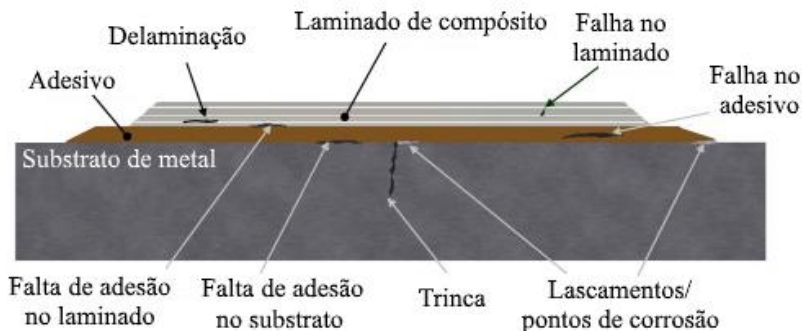


Figura 2.3 – Falhas potenciais de reparos de compósito aplicados a um substrato metálico. Adaptado de [11].

2.2 TUBULAÇÕES DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Tubulações de materiais compósitos possuem uma excelente resistência à corrosão e uma combinação de propriedades mecânicas e físicas que oferecem algumas vantagens sobre a tradicional tubulação metálica. As tubulações compósitas são fabricadas tanto em Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) como em Fibra de Carbono (PRFC). As tubulações de PRFV são as mais utilizadas e podem ser aplicadas em uma faixa de temperatura entre -35 °C e 150 °C [12]. O tipo de resina utilizado é que restringe a sua aplicação a um patamar de temperatura, conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Temperaturas máximas de trabalho de tubulações de PRFV [12].

Tipo de resina	Temperatura máxima de trabalho
Fenólica	150 °C
Epóxi	110 °C
Éster vinílica	100 °C
Poliéster	70 °C

Estas tubulações são aplicadas tipicamente no transporte de água (do mar, potável, lastro, incêndio, resfriamento, injeção, processo e formação), combustíveis, petróleo, CO_2 , gás inerte, entre outros [12].

Vários tipos de uniões podem ser aplicados nessas tubulações e são exclusivos de cada fornecedor. Porém, as uniões podem ser classificadas, de modo geral, como: adesivadas, laminadas, com vedação elastomérica

(com ou sem trava), flangeadas, mecânicas, metálicas/compósitos e roscadas [13]. A Figura 2.4 apresenta algumas delas.

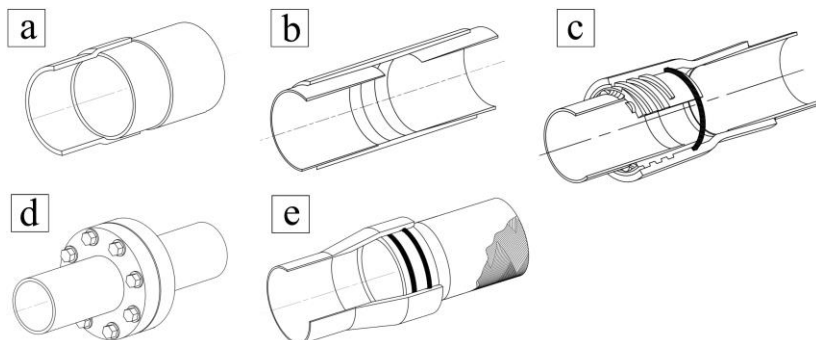


Figura 2.4 – Tipos de uniões. (a) Ponta e bolsa adesivada; (b) Laminada; (c) Roscadas; (d) Flangeadas; (e) Com vedação elastomérica. Adaptado de [14].

As tubulações de materiais compósitos possuem alta relação resistência/massa. Por conseguinte, promovem um baixo custo de transporte e instalação, apresentando cerca de 25% do valor relativo à instalação de uma tubulação de aço com capacidade equivalente. Uma estimativa de tempo (hora-homem) necessário para montagem de alguns tipos de uniões, em condições ideais, é apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Estimativa hora-homem para montagem de uma união em tubulações metálicas e de materiais compósitos [14].

Tipo de união/Tubulação	Diâmetro nominal em polegadas (milímetros)				
	6 (150)	8 (200)	10 (250)	12 (300)	14 (350)
Vedação elastomérica/PRFV	0,5	0,6	0,8	1,0	1,1
Ponta e bolsa/PRFV	0,8	0,9	1,1	1,2	1,6
Soldada/Aço carbono Sch 40	2,0	2,6	3,1	4,1	5,0
Soldada/Aço carbono Sch 80	2,5	3,3	5,1	6,6	9,6
Soldada/Aço inoxidável Sch 10S	3,3	4,5	5,6	6,7	8,3
Soldada/Cobre-níquel Sch 40	3,3	4,5	5,7	8,0	10,0

O emprego destes materiais tem crescido nos últimos anos, principalmente como substitutos para os aços inoxidáveis e metais não

ferrosos. Com o aumento constante do valor dos metais citados e com o aperfeiçoamento dos compósitos, a utilização destes no mercado tende a aumentar. A vida útil destas tubulações é calculada para 20 anos, porém, algumas linhas de compósitos já estão operando há mais de 30 anos. Um exemplo de aplicação *offshore* está representada na Figura 2.5.



Figura 2.5 – Aplicação *offshore* de tubulações de PRFV [15].

No entanto, o procedimento de montagem das tubulações compósitas também está susceptível a falhas. A Figura 2.6 mostra um exemplo de falta de adesivo em uma união do tipo ponta e bolsa.

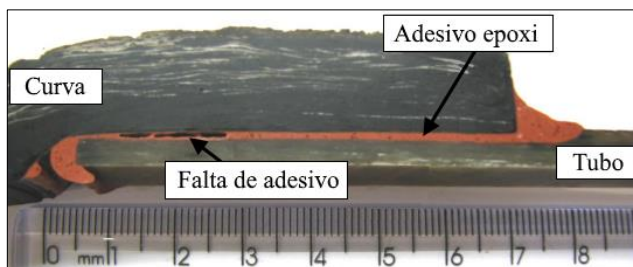


Figura 2.6 – Falta de adesivo em uma união do tipo ponta e bolsa [16].

2.3 REVESTIMENTOS EM TANQUES DE ARMAZENAMENTO E ESTRUTURAS METÁLICAS DE NAVIOS

Outra aplicação dos compósitos na indústria do petróleo e gás é como revestimento anticorrosivo em pisos e costados de tanques de armazenamento ou transporte de hidrocarbonetos e de navios-plataforma do tipo FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*), unidades flutuantes de produção, armazenamento e transferência de petróleo [11][17][18][19][20].

O objetivo principal do revestimento é promover maior vida útil do material revestido, minimizando paradas para manutenção e reduzindo custos. O revestimento pode ser aplicado tanto no exterior como no interior dos costados.

A Figura 2.7 mostra a aplicação de um revestimento de compósito externamente a um tanque de armazenamento de combustível. Já a aplicação de revestimento de compósito internamente a um tanque de armazenamento é mostrada na Figura 2.8.



Figura 2.7 – Aplicação de revestimento de compósito no exterior de tanques de armazenamento de combustível [21].



Figura 2.8 – Aplicação de revestimento de compósito no interior de tanques de armazenamento de combustível [21].

A Figura 2.9 mostra a aplicação de revestimento de compósito no piso de um tanque de lastro em um FPSO.



Figura 2.9 – Aplicação de revestimento de compósito em tanques de lastro de um navio plataforma tipo FPSO. (a) Piso com corrosão; (b) Processo de aplicação do compósito; (c) Piso reparado. Adaptado de [17].

A utilização de materiais compósitos como revestimentos é uma ótima alternativa ao tradicional reparo por soldagem. Como não são envolvidas elevadas temperaturas e faíscas, não é necessária a remoção de produtos inflamáveis e nem tornar o ambiente do reparo anti-explosão. O emprego dessa tecnologia de reparo em tanques e costados de navios vem aumentando tanto no Brasil como no exterior [18].

3 INTERFEROMETRIA *SPECKLE*

3.1 *SPECKLE*

O princípio de Huygens define que cada ponto de uma frente de onda primária constitui uma fonte de onda esférica secundária, e a posição da frente de onda primária em um instante posterior é determinada pela envolvente de todas estas ondas secundárias [22], conforme ilustrado na Figura 3.1.

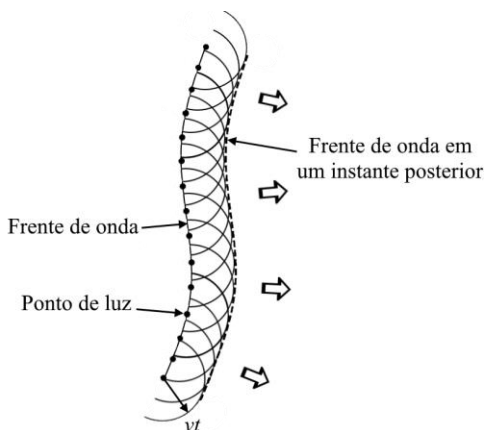


Figura 3.1 – Princípio de Huygens. Adaptado de [22].

Quando a luz coerente de um laser incide em uma superfície com rugosidade maior que seu comprimento de onda λ , a luz incidente será refletida em várias direções. Neste caso, cada ponto da superfície pode ser considerado como uma pequena fonte de luz, conforme o princípio de Huygens. Além disso, a magnitude do campo óptico em cada ponto do espaço pode ser determinada pela soma complexa de todas as ondas providas de cada ponto da superfície. Observa-se, neste caso, a formação de um padrão granular característico com elevado contraste. Esse efeito é denominado de *speckle*, sendo caracterizado por uma distribuição aleatória de uma luz difusa [23], conforme ilustrado na Figura 3.2. Essa distribuição luminosa aleatória permanece invariável no tempo se for observada de uma mesma posição espacial e mantidas as condições de iluminação.

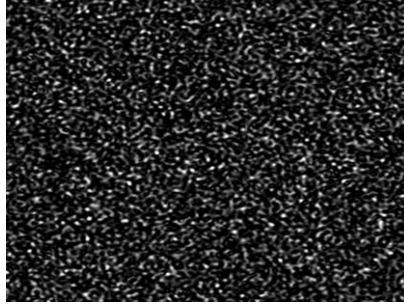


Figura 3.2 – Típica distribuição *speckle* simulada [23].

Duas formas distintas de *speckle* são observadas quando um objeto rugoso é iluminado por um laser. A primeira é chamada de *speckle* objetivo e corresponde a um campo de propagação livre que preenche o espaço tridimensional em frente à superfície do objeto. Reciprocamente, se uma imagem for capturada por um dispositivo óptico, como uma câmera ou o olho humano, *speckles* estarão presentes no plano de imagem, sendo denominados neste caso de *speckles* subjetivos [23], onde o fenômeno da difração está presente.

Quando uma abertura circular é uniformemente iluminada por ondas planas provenientes de uma fonte pontual distante, a projeção das ondas emergentes num plano de observação produz um padrão de difração denominado difração de Fraunhofer. Esse padrão é composto por uma zona circular com elevada irradiância, denominada disco de Airy, que é circundada por um conjunto de anéis claros e escuros [22][24], conforme mostrado na Figura 3.3.

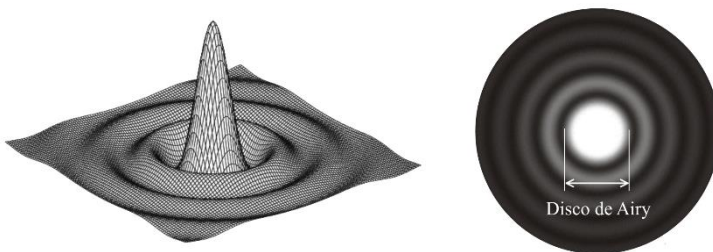


Figura 3.3 – Disco de Airy.

Considerando um plano paralelo à superfície iluminada, com distância z em relação a esta, Figura 3.4 (a), o campo luminoso em um determinado ponto $Q(x,z)$ é uma soma das ondas provindas de cada ponto

da superfície, com fase aleatória relativa à sua rugosidade[23][25]. Neste caso, o padrão de *speckle* observado é o objetivo. A Figura 3.4 (b) ilustra a formação do *speckle* subjetivo. Em função da existência da íris no sistema óptico, parte da luz refletida num ponto P_3 , localizado na superfície do objeto, é projetada no plano imagem como uma distribuição de intensidade centrada no ponto Q (disco de Airy).

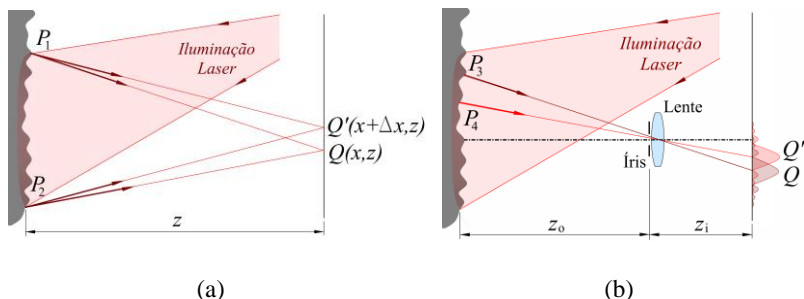


Figura 3.4 – (a) *Speckle* objetivo; (b) *Speckle* subjetivo. Adaptado de [23].

Considerando-se um novo ponto P_4 nas proximidades de P_3 , um novo disco de Airy aparecerá centrado em Q' . Note que, na Figura 3.4 (b), Q' aparece parcialmente sobreposto a Q devido à distância entre os pontos P_3 e P_4 . Esta distância pressupõe que o primeiro valor mínimo de intensidade da distribuição de Airy em Q' coincidirá com o valor de máximo de Q e, portanto, o ponto P_4 não iluminará o ponto Q . Adicionalmente, as ordens superiores de P_4 e de outros pontos ainda mais distantes também não contribuirão com a iluminação do ponto Q , pois as intensidades máximas secundárias têm valores muito menores que o máximo central. Neste caso, os pontos são estatisticamente independentes, possuindo valores próprios de intensidade e de fase.

É importante ressaltar que uma maior quantidade de pontos na imagem melhora a resolução espacial de medições interferométricas. Portanto, procura-se correlacionar o valor da distância mínima entre pontos, onde ainda é possível distinguir as suas intensidades individuais, mesmo em situações de sobreposição, com o limite de resolução do sensor óptico utilizado.

A Figura 3.5 ilustra o efeito da sobreposição de dois discos de Airy com diferentes espaçamentos. É possível perceber que existe uma distância mínima entre dois pontos na qual, apesar de existir sobreposição entre seus discos, ainda é possível resolver/distinguir as contribuições

luminosas de cada ponto em particular. A distância mínima entre os discos de Airy é mostrada na Figura 3.5 (c).

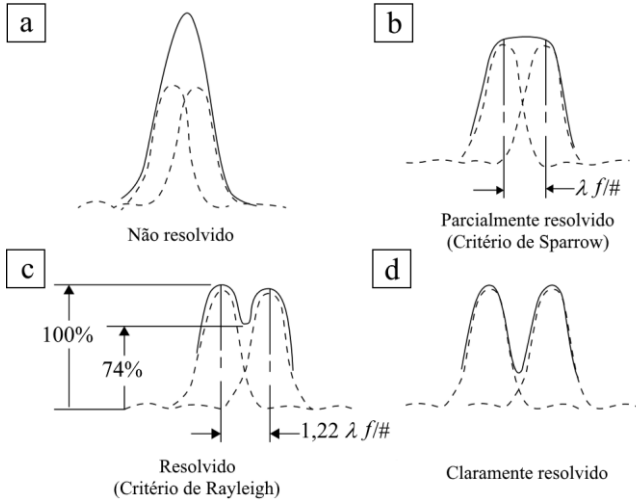


Figura 3.5 – Sobreposição de dois padrões de difração de Fraunhofer. As linhas tracejadas representam os padrões de difração de cada ponto. As linhas cheias representam a combinação dos efeitos. Adaptado de [26].

O *speckle* tem uma forma tridimensional complexa. Uma abordagem estatística é fundamental para um básico entendimento deste campo de estudo. Uma leitura mais aprofundada sobre o tema pode ser feita em [25]. De uma forma mais simplificada, uma estimativa do tamanho do *speckle* pode ser obtida através do critério de Rayleigh. Neste caso, o diâmetro médio do *speckle* d_{sp} (situado no plano de imagem) corresponde ao raio do disco de Airy, o qual pode ser calculado conforme

$$d_{sp} = 1,22 \frac{\lambda z_i}{D}, \quad (3.1)$$

onde λ é o comprimento de onda do laser, z_i a distância entre a íris e o plano imagem, e D o diâmetro da íris.

O padrão de *speckle* formado no plano focal é uma imagem do padrão constituído na superfície iluminada. O diâmetro do *speckle* tomado na superfície do objeto é calculado por

$$(d_{sp})_{objeto} = 1,22 \frac{\lambda z_o}{D}, \quad (3.2)$$

onde z_o é a distância entre a íris e o objeto.

A área relativa a este diâmetro é conhecida como célula de resolução do sistema óptico, e corresponde ao tamanho do grão do *speckle* projetado na superfície do objeto iluminado.

Seja M_g a magnificação do sistema óptico, que é a relação entre o tamanho da imagem e do objeto e, *f-number* ($f/\#$) a relação entre o comprimento focal f da lente e o diâmetro D de abertura da íris, o tamanho do *speckle* pode ser obtido por

$$d_{sp} = 1,22 \lambda f/\# (1 + M_g). \quad (3.3)$$

Portanto, um *speckle* subjetivo pequeno é relativo a lentes com pequeno *f-number* (íris com grande abertura). Em outras palavras, o aumento na abertura da íris de uma lente provoca a obtenção de um granulado menor e vice-versa [23].

Na interferometria *speckle* o granulado óptico da superfície a ser medida interfere de forma coerente com uma iluminação de referência originária do mesmo laser ou com outro granulado óptico. O resultado da interferência é captado por uma câmera de vídeo, digitalizado e processado.

As distribuições da fase e intensidade do granulado óptico são aleatórias e estão diretamente relacionadas com a microestrutura da superfície da região iluminada. O *speckle* permanece temporalmente estável enquanto a superfície a medir ficar imóvel em relação ao ponto de observação. Um deslocamento relativo entre eles resulta em mudança de intensidade e fase de cada ponto, sendo, por esse motivo, frequentemente usada em medições de deslocamentos e deformações. Para estas medições, duas ou mais imagens deste padrão de interferência são obtidas em instantes diferentes, estando a superfície com distintos níveis de deformações. Um padrão das franjas é então obtido através do processamento digital destas imagens, seja através da diferença de intensidades ou, o que é preferível, pela diferença de fase [27].

A intensidade resultante da interferência de dois feixes com intensidade I_1 e I_2 pode ser definida conforme [22]

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (3.4)$$

onde φ_1 e φ_2 são as fases dos respectivos feixes. Essa equação pode ser expressa conforme

$$I = I_0(1 + V \cos \phi), \quad (3.5)$$

onde $I_0 = I_1 + I_2$ é a intensidade de fundo e V é o contraste das franjas. O contraste pode ser expresso em função das intensidades, tal como

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}. \quad (3.6)$$

A fase relativa entre a interferência dos feixes é computada como:

$$\phi = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (3.7)$$

3.2 DESLOCAMENTO DE FASE

Conforme explicado na seção anterior, a medição de deslocamentos e deformações na superfície de uma peça pode ser obtida em função da mudança na fase de cada ponto do granulado óptico desta superfície. No entanto, para a determinação do valor da fase de cada ponto da superfície medida, deslocamentos de fase conhecidos precisam ser intencionalmente aplicados durante o processo de medição. O deslocamento de fase pode ser introduzido por alguns diferentes dispositivos, conforme ilustrado na Figura 3.6. O atuador piezoelétrico (PZT) é, frequentemente, o dispositivo de deslocamento de fase mais utilizado.

É importante destacar que a fase do padrão de *speckles* pode ser modificada de duas maneiras: (a) por movimentações ocorridas na superfície estudada em função de, por exemplo, carregamentos mecânicos aplicados à estrutura, que é o que se deseja medir, e (b) por deslocamentos de fase provocados de maneira proposital por dispositivos específicos, conforme exemplificado na Figura 3.6.

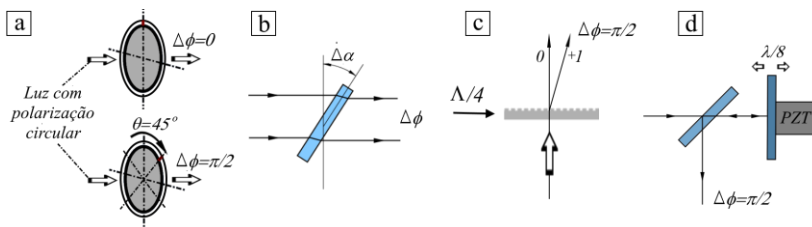


Figura 3.6 – Deslocamento de fase gerado por: (a) rotação de uma placa de quarto de onda; (b) inclinação de uma lâmina de vidro; (c) movimentação lateral de uma grade difrativa; (d) movimentação de um espelho com PZT.

Adaptado de [23].

Vários algoritmos para determinar a fase utilizando múltiplas imagens estão disponíveis, cada qual com sua particularidade. Alguns deles serão analisados ao longo do trabalho.

O algoritmo de quatro-passos é um dos mais simples entre os empregados para calcular a fase do padrão de *speckle* da superfície estudada. Ele utiliza quatro imagens com fases deslocadas propositalmente em $\pi/2$ [23][28], onde suas intensidades são relativas a:

$$\begin{aligned} I(0) &= I_0 + I_M \cos \phi, \\ I(1) &= I_0 + I_M \cos(\phi + \pi/2) = I_0 - I_M \sin \phi, \\ I(2) &= I_0 + I_M \cos(\phi + \pi) = I_0 - I_M \cos \phi, \\ I(3) &= I_0 + I_M \cos(\phi + 3\pi/2) = I_0 + I_M \sin \phi. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Rearranjando-se as equações, os valores da fase ϕ e da intensidade média I_M podem ser obtidos:

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{I(3) - I(1)}{I(0) - I(2)} \right], \quad (3.9)$$

$$I_M = \frac{\sqrt{[I(3) - I(1)]^2 + [I(0) - I(2)]^2}}{2}. \quad (3.10)$$

A subtração das imagens de dois padrões de *speckle* obtidos, por exemplo, antes e depois de um carregamento, produz um padrão de franjas (linhas claras e escuras). Este padrão é denominado mapa das diferenças de fase e é o resultado obtido na interferometria *speckle*. Os mapas de diferenças de fase são também conhecidos como interferogramas. Através das diferenças de fases é possível obter os campos de deformação da superfície que está sendo medida.

Das técnicas interferométricas existentes, este trabalho explora a *shearografia*, que será detalhada a seguir.

3.3 SHEAROGRAFIA

Shearografia, do inglês *shearography*, é um tipo especial de interferometria *speckle*, similar à holografia eletrônica. Esta técnica interferométrica utiliza um dispositivo óptico especial, o qual é responsável pela formação de imagens duplas lateralmente deslocadas, conforme ilustrado na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Efeito produzido pelo par de imagens lateralmente deslocadas, gerado por um dispositivo óptico característico de um sistema de *shearografia*.

Uma vez que a superfície do objeto estudado é iluminada por luz laser, a imagem dupla do padrão *speckle* interfere mutuamente de forma coerente e é capturada pelo sensor de imagem da câmara. Deste modo, a *shearografia* é capaz de medir o gradiente do deslocamento de uma superfície, ou seja, detecta diretamente microdeformações do objeto inspecionado. Mesmo sendo uma técnica interferométrica com grande sensibilidade de medição, a *shearografia* é menos sensível a perturbações ambientais quando comparada às demais técnicas, pois não detecta movimentos de corpo rígido. Portanto, a *shearografia* é a técnica interferométrica com maior capacidade de aplicação em ensaios não destrutivos (END) realizados em campo.

Falhas em materiais compósitos normalmente estão associadas a descontinuidades do material. Falta de adesão entre camadas de materiais compósitos ou entre estes e a superfície do material de base que estão revestindo são dois exemplos importantes de falhas. Para detectar falhas em materiais compósitos com *shearografia* é necessário aplicar algum tipo de carregamento mecânico que deforme ligeiramente a estrutura, fazendo com que a falha interna existente provoque, na sua superfície, descontinuidades no campo de deformações. Estas descontinuidades na superfície, por sua vez, geram anomalias nos padrões de interferência da *shearografia* e são visualmente detectadas pelo inspetor [29].

Quando o vetor sensibilidade do sistema (seção 3.4) está alinhado com a direção normal da superfície do objeto, as franjas de *shearografia* representam a primeira derivada dos deslocamentos ocorridos fora do plano ($\partial w/\partial x$ e/ou $\partial w/\partial y$). As direções x e y representam as direções dos deslocamentos laterais entre as imagens formadas no sistema de *shearografia*. Já w representa os deslocamentos na direção z (fora do plano de medição). A Figura 3.8 ilustra o padrão de franjas obtido em

uma medição com *shearografia*, representando as deformações ocorridas fora do plano em uma certa superfície.

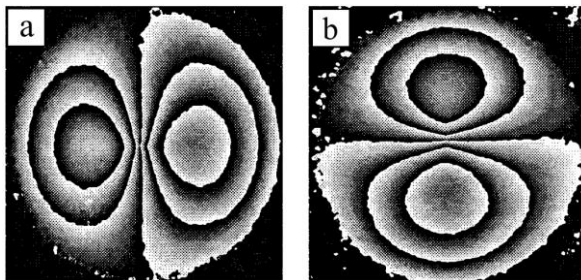


Figura 3.8 – Padrão de franjas característico em uma medição com *shearografia* produzido por: (a) Deslocamento lateral horizontal ($\partial w/\partial x$); (b) Deslocamento lateral vertical ($\partial w/\partial y$) [30].

A utilização de um algoritmo de remoção de salto de fase [28][31] produz uma distribuição tridimensional da primeira derivada dos deslocamentos da superfície, conforme mostra a Figura 3.9.

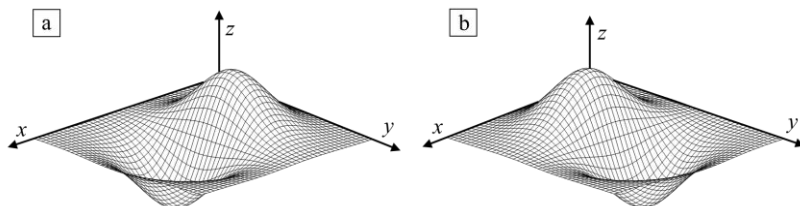


Figura 3.9 – Distribuição 3-D da primeira derivada do deslocamento da superfície após remoção do salto de fase produzido por: (a) Deslocamento lateral horizontal ($\partial w/\partial x$); (b) Deslocamento lateral vertical ($\partial w/\partial y$).

A integração da distribuição 3-D da primeira derivada resulta na superfície deformada, que no caso da Figura 3.9 aproxima-se de uma calota, como mostra a Figura 3.10. No entanto, a integração não é necessária para o processo de inspeção, pois já com o padrão de franjas característico da *shearografia*, mostrado na Figura 3.7, é possível identificar a presença de defeitos internos no material.

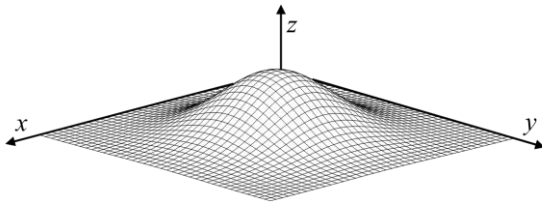


Figura 3.10 – Superfície obtida pela integração da distribuição 3-D da primeira derivada do deslocamento.

3.3.1 Tipos de carregamentos

A escolha da melhor forma de carregamento depende do tipo de material, das características do defeito e de aspectos operacionais de cada caso. Quatro tipos de carregamentos são tipicamente utilizados: térmico, mecânico, vibracional e por vácuo [29]. A seguir serão feitas algumas considerações sobre cada forma de carregamento.

3.3.1.1 Carregamento térmico

A aplicação de um fluxo de calor uniforme em um material compósito provoca sua expansão por dilatação térmica. O campo de deformações causado pela temperatura é relativamente uniforme na ausência de defeitos. Entretanto, a presença de falhas em um revestimento produz descontinuidades no campo de deformações [29]. A aplicação de um pequeno carregamento térmico já é suficiente para gerar, na superfície do objeto, as microdeformações fora do plano a serem detectadas pelo sistema.

O aquecimento pode ser realizado por: irradiação térmica de uma lâmpada; condução de uma manta térmica flexível; convecção térmica através de um fluxo de ar quente; dispositivo de aquecimento por indução eletromagnética. Dentre estes, o aquecimento por irradiação térmica é o mais empregado. A Figura 3.11 mostra o efeito produzido pelo aquecimento da superfície do reparo através da irradiação térmica de uma lâmpada.

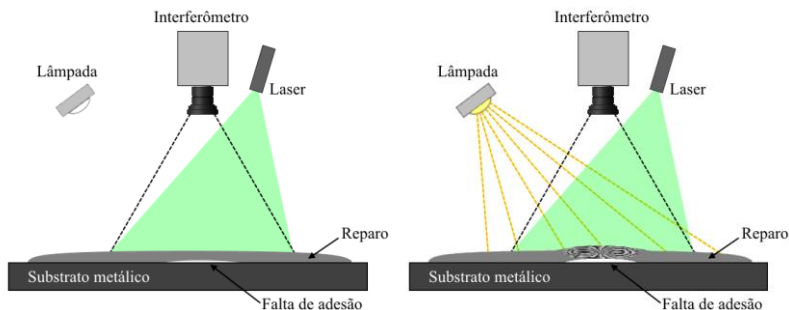


Figura 3.11 – Detecção de falha de adesão por carregamento térmico.

3.3.1.1 Carregamento mecânico

Assim como no carregamento térmico, a aplicação de um carregamento mecânico em um corpo metálico revestido com material compósito também produz campos de deformações relativamente uniformes. A presença de defeitos internos no reparo produz descontinuidades no campo de deformações, pois nessas regiões as deformações se manifestam de maneira diferente das regiões onde o reparo está bem aderido à superfície do substrato [29].

O carregamento mecânico pode ser provocado tanto pela variação interna da pressão de uma tubulação ou de um vaso de pressão, como também por tração, torção ou flexão de uma estrutura [23]. A Figura 3.12 mostra como um defeito de falta de adesão se manifesta na superfície do reparo quando um carregamento mecânico de tração é aplicado ao substrato.

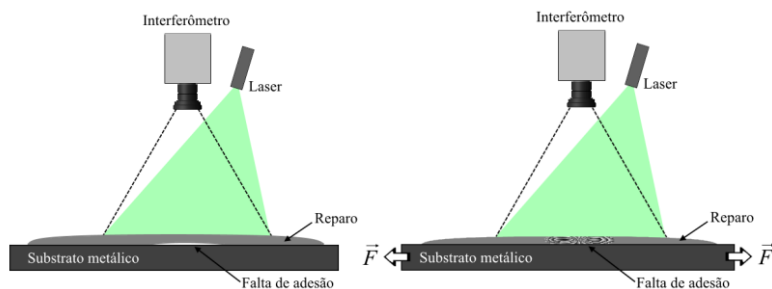


Figura 3.12 – Detecção de falha de adesão por carregamento mecânico.

3.3.1.1 Carregamento a vácuo

Outro carregamento empregado no procedimento de detecção de defeitos é a aplicação de vácuo na região inspecionada. Utiliza-se uma câmara de vácuo com parede transparente (vidro espesso, por exemplo), interligada a uma bomba que produz a diminuição da pressão no interior da câmara. O vácuo causa uma deformação mais proeminente na região do defeito, comparada às regiões integras do reparo, visto que a região de falha não está aderida ao substrato metálico. A Figura 3.13 ilustra a aplicação de vácuo na detecção de um defeito de falta de adesão.

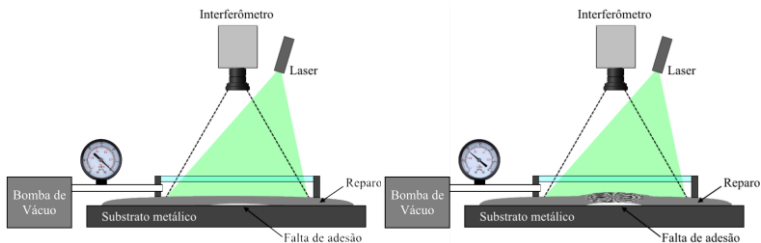


Figura 3.13 – Detecção de falha de adesão por carregamento a vácuo.

3.3.1.1 Carregamento vibracional

Um carregamento vibracional também pode ser utilizado na detecção de defeitos por *shearografia*. Uma varredura de frequências é feita na superfície de inspeção até atingir as frequências naturais de ressonância do defeito, que se comporta como uma membrana. Na ressonância, o defeito vibra com maior amplitude de deslocamento, destacando-se do restante da estrutura. A excitação vibracional pode ser produzida pelo acoplamento de atuadores piezoelétricos à superfície do reparo [32] ou através de excitação sem contato por ondas sonoras, utilizando-se um alto-falante. A Figura 3.14 mostra a aplicação de um carregamento vibracional na detecção de um defeito.

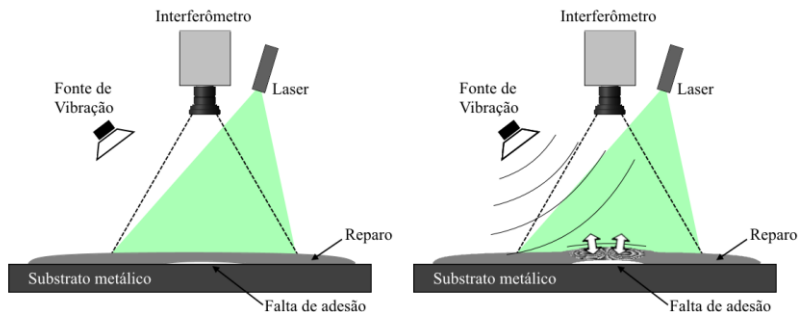


Figura 3.14 – Detecção de falha de adesão por carregamento vibracional.

3.3.2 Aplicação da *shearografia* na indústria

A *shearografia* é um método de ensaios não destrutivos (END) muito atrativo para aplicações industriais, pois mede o gradiente de deformações em superfícies, e não apenas a deformação como os tradicionais métodos de holografia. Portanto, os valores de tensões mecânicas podem ser obtidos diretamente, o que torna essa técnica uma importante ferramenta de medição para ser aplicada na indústria [33].

As significativas vantagens da *shearografia* incluem:

- Possui configurações ópticas simples;
- Grandes comprimentos de coerência do laser não são requeridos;
- Possui menor sensibilidade a vibrações, pois não necessita de um feixe de luz de referência característico dos métodos de holografia;
- Mede diretamente o gradiente da deformação da superfície (primeira derivada do deslocamento da superfície).
- Tem a capacidade de medir grandes áreas.

A indústria da borracha utiliza rotineiramente a *shearografia* para avaliar a qualidade de pneus recauchutados e a indústria aeroespacial realiza END em estruturas de aeronaves, em especial as estruturas de materiais compósitos, conforme apresentado na Figura 3.15

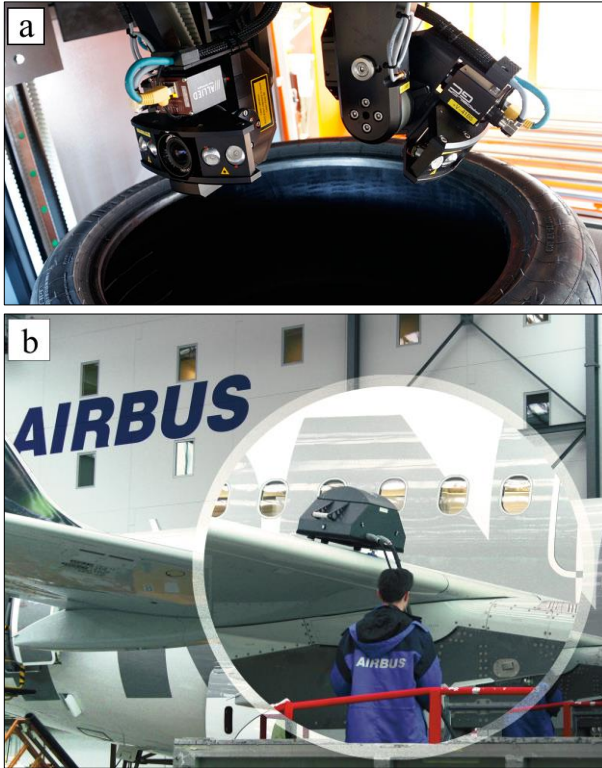


Figura 3.15 – Exemplos de inspeções com *shearografia*. (a) Avaliação da qualidade de pneus na indústria automobilística; (b) Avaliação do bordo de ataque de uma asa na indústria aeronáutica [34].

Atualmente, uma das aplicações importantes da *shearografia* é a detecção de falhas internas em materiais compósitos utilizados na indústria do petróleo e gás, tais como: reparos de compósito em tubulações metálicas; revestimento de tanques de armazenamento; revestimento de costado de navios e uniões adesivadas em tubulações de compósitos. A Figura 3.16 apresenta algumas destas inspeções, realizadas pela equipe do projeto SHIC.



Figura 3.16 – Inspeções de *shearografia* aplicados na indústria do petróleo e gás. (a) Inspeção em uniões adesivadas de tubulações de compósito; (b) e (c) Inspeções em reparos de compósito aplicados em tubulações metálicas; (d) Inspeção em revestimentos de tanques de armazenamento [35].

Outras aplicações de *shearografia* incluem a medição de tensões, propriedades dos materiais, tensões residuais, formas tridimensionais, vibrações, assim como a detecção de vazamentos em vasos de pressão [36].

Uma inspeção com *shearografia* envolve as seguintes etapas:

- a) Posicionamento do sistema na região de inspeção, para que a superfície de interesse seja visualizada e iluminada pelo sistema;
- b) Aplicação de um deslocamento lateral controlado para se obter uma dupla imagem, como mostrado na Figura 3.7;
- c) Aquisição de um mapa de fases correspondente ao estado de referência (superfície sem deformação);
- d) Aplicação de um carregamento predeterminado para promover uma pequena deformação no material;
- e) Aquisição de um mapa de fases correspondente ao estado final;
- f) Processamento das imagens adquiridas e obtenção dos interferogramas resultantes da diferença de fase;
- g) Avaliação qualitativa dos padrões de franjas dos interferogramas para localização de discontinuidades que possam identificar a presença de defeitos.

3.3.3 Configurações ópticas para *shearografia* e seus dispositivos para deslocamento lateral das imagens

Existem diversos dispositivos ópticos utilizados para gerar a dupla imagem característica de uma medição de *shearografia*, cada qual com sua particularidade. Uma breve descrição de alguns dispositivos comumente utilizados é apresentada nos tópicos seguintes.

A primeira delas, baseada no interferômetro de Michelson [22], é a mais utilizada de todas. Uma segunda configuração prevê a utilização de um sistema óptico denominado $4f$, que permite diminuir o tamanho do interferômetro e aumentar o seu ângulo de visão com a utilização de duas lentes intermediárias. A terceira concepção contempla a utilização de uma grade difrativa, em substituição aos elementos ópticos tradicionais, para promover o deslocamento lateral das imagens. A quarta e última configuração tratada neste documento, utiliza um elemento óptico birrefringente denominado prisma de Wollaston que também gera o deslocamento lateral.

3.3.3.1 Configuração com Interferômetro de Michelson Modificado

O arranjo óptico mais empregado em um sistema de *shearografia* é baseado em um interferômetro de Michelson e utiliza dois espelhos de primeira superfície (E_1 e E_2) e um divisor de feixes (DF), conforme ilustrado na Figura 3.17. A inclinação de um dos espelhos, que no caso da Figura 3.15 é o E_2 , promove o deslocamento lateral por meio da modificação de um dos caminhos da luz do interferômetro, resultando em uma dupla imagem no sensor CCD.

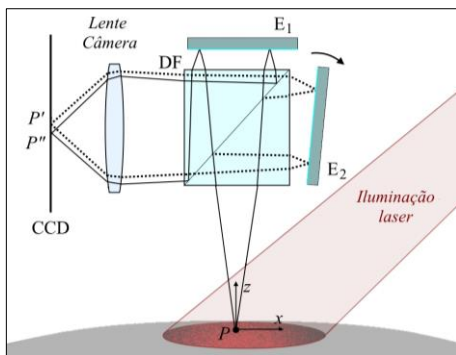


Figura 3.17 – Arranjo óptico tradicional de sistema de *shearografia*, baseado no interferômetro de Michelson modificado.

É importante notar que, ao formar uma dupla imagem da superfície medida, os feixes de luz provenientes de dois pontos distintos da superfície da peça atingem um mesmo ponto no sensor de imagem e interferem entre si. A combinação de todos os pontos de interferência capturados pelo sensor de imagem forma um interferograma de padrões de *speckles*, descrito no item 3.1.

Neste arranjo óptico, como o DF é posicionado em frente à lente objetiva da câmera, a área de medição (L) é definida pela relação entre o tamanho da face (l) do DF e o ângulo de visão (α) da lente objetiva, conforme ilustrado na Figura 3.18. Assim sendo, a utilização de lentes com maiores ângulos de visão para inspeção de grandes áreas necessita de um divisor de feixes com grandes dimensões, promovendo um aumento considerável no tamanho do sistema e desfavorecendo a sua utilização em campo.

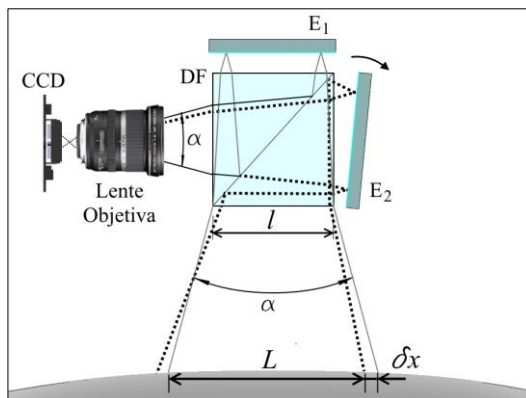


Figura 3.18 – Relação da área medida na superfície do objeto com o tamanho do divisor de feixes do interferômetro de Michelson modificado.

3.3.3.2 Configuração $4f$

A Figura 3.19 mostra o arranjo óptico do sistema denominado de $4f$. Este sistema é uma variação do Interferômetro de Michelson modificado, onde a lente objetiva é afastada da câmera, e duas novas lentes (L_1 e L_2) de mesmo comprimento focal são adicionadas em ambos os lados do interferômetro.

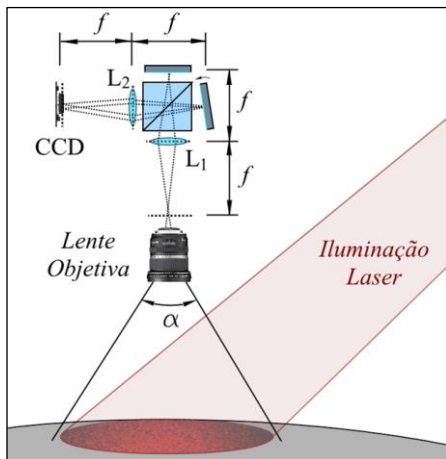


Figura 3.19 – Arranjo óptico de sistema de *shearografia* com configuração 4f.

Esta configuração traz benefícios, pois como o tamanho do divisor de feixe não restringe o campo de visão da lente objetiva, divisores menores podem ser utilizados, permitindo a miniaturização do sistema. Outra vantagem desse arranjo é a conveniência de se controlar o foco e a abertura da íris da lente objetiva, pois ela é posicionada à frente do sistema [37].

3.3.3.3 Configuração com grade difrativa

Dá-se o nome de grade difrativa a um elemento óptico com uma série de elementos repetidos na superfície de uma placa, sejam aberturas ou obstáculos, que promovem alterações periódicas da fase ou da amplitude de uma onda luminosa. Em uma grade difrativa de transmissão, as variações regulares de espessura são responsáveis pela modulação da fase da onda luminosa. O resultado da sobreposição das ondas emergentes equivale a uma distribuição angular simétrica dos máximos de interferência, denominadas ordens de difração [38].

O ângulo de difração da luz θ_m [°] em uma determinada ordem de difração m , pode ser calculado através de

$$\theta_m = \sin^{-1} \left(\frac{m \lambda}{A} - \sin \theta_i \right), \quad (3.11)$$

onde m é a ordem de difração, λ o comprimento de onda do laser, A o passo da grade e θ_i o ângulo de incidência da luz na grade.

O passo da grade (Λ) determina a separação angular das ordens difrativas. Passos pequenos produzem grandes ângulos de abertura, enquanto passos maiores produzem ângulos menores. A Figura 3.20 mostra o resultado da passagem de um feixe de luz através de uma grade difrativa de transmissão em fase.

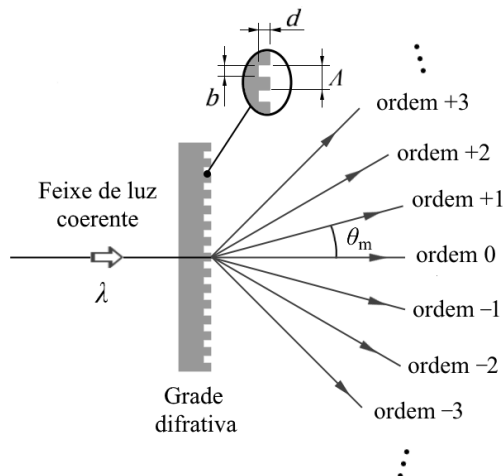


Figura 3.20 – Esquema de uma grade difrativa de transmissão em fase.

Quando a razão de onda da grade (b/Λ) é de 50%, obtém-se uma grade difrativa binária em fase. A diferença de fase ϕ_d entre as ondas emergentes da grade é produzida pelas variações de espessura relativas aos sulcos periódicos, e pode ser calculada através de

$$\phi_d = \frac{2 \pi (n - 1) d}{\lambda}, \quad (3.12)$$

onde n é o índice de refração do material da grade e d a profundidade do sulco.

Se o valor da profundidade do sulco da grade for ajustado para que a diferença de fase ϕ_d seja igual a π , o resultado é o cancelamento da propagação da luz na ordem 0 e nas demais ordens pares. Neste caso, a eficiência de difração (η_m) de cada ordem ímpar, positivas e negativas, pode ser calculada através de

$$\eta_m = \left(\frac{2}{m \pi} \right)^2. \quad (3.13)$$

A propagação mais forte da luz acontece na primeira ordem, onde 40,5% da luz incidente é direcionada. Por simetria, outros 40,5% da luz propagam-se para a primeira ordem negativa [38]. A Tabela 3.1 apresenta as eficiências das ordens de difração de uma grade binária ideal.

Tabela 3.1 – Eficiência das ordens de difração de uma grade binária ideal [38].

Ordens	Eficiência
0	0
+1, -1	40,5%
+2, -2	0
+3, -3	4,5%
+4, -4	0
+5, -5	1,6%
+6, -6	0
(demais ordens)	3,4%

Na concepção do sistema de *shearografia* com óptica difrativa, uma grade difrativa é posicionada na frente da lente objetiva, produzindo um deslocamento lateral da imagem do objeto, conforme ilustrado na Figura 3.21. O valor do deslocamento lateral está relacionado com o período da grade difrativa e com a posição relativa entre esta e o arranjo óptico do sistema. Portanto, o afastamento da grade difrativa em relação ao sistema de aquisição de imagem (direção z) produz deslocamentos laterais maiores, e vice-versa.

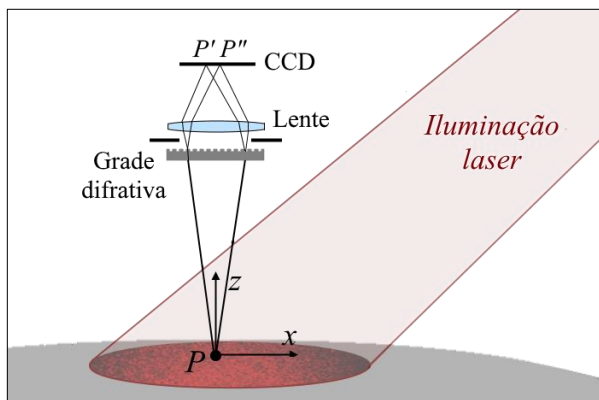


Figura 3.21 – Arranjo óptico de sistema de *shearografia* utilizando grade difrativa.

O arranjo óptico difrativo é uma alternativa atrativa em relação ao interferômetro de Michelson modificado. Além de permitir a compactação da configuração óptica, a alta eficiência de uma óptica difrativa, em torno de 80%, possibilita um melhor aproveitamento da luz incidente, comparado ao do interferômetro de Michelson modificado, que desperdiça mais da metade da luz na passagem da onda luminosa pelo divisor de feixes.

Além disso, na concepção com óptica difrativa, a despolarização da luz provocada pela sua reflexão no objeto não causa redução da visibilidade da franja, como acontece no sistema que utiliza o prisma de Wollaston. Outra grande vantagem do sistema difrativo é o fato de os dois padrões de interferência possuírem a mesma média de intensidade, pois as distribuições de intensidade luminosa nas ordens $+1$ e -1 são muito similares, o que resulta em franjas de alto contraste [39][40].

No caso do interferômetro com óptica difrativa, o deslocamento proposital de fase é promovido pelo movimento lateral da grade, na direção perpendicular às suas estrias. O movimento lateral da ordem de meio passo da grade ($\lambda/2$), em uma grade difrativa binária, produz um deslocamento de fase de 2π rad. Na configuração baseada no interferômetro de Michelson modificado, o deslocamento de fase de 2π rad é realizado pela translação da ordem de meio comprimento de onda do laser ($\lambda/2$) em um de seus espelhos.

Uma grade difrativa com passo λ de $32 \mu\text{m}$ é capaz de produzir um deslocamento lateral (δ_x) tradicionalmente utilizado em uma medição de shearografia. Portanto, o passo de uma grade difrativa capaz de produzir um deslocamento lateral aceitável para medições de *shearografia* é cerca de 60 vezes maior que o comprimento de onda de um laser verde (532 nm), por exemplo. Assim, o sistema difrativo é mais robusto a influências externas quando comparado à configuração baseada no interferômetro de Michelson, pois vibrações que produzam perda de correlação no interferômetro de Michelson tornam-se praticamente imperceptíveis no sistema com grade difrativa.

3.3.3.4 Configuração com Prisma de Wollaston

A utilização de um prisma de Wollaston para obter a dupla imagem deslocada lateralmente é uma solução simples e robusta para ser aplicada em um sistema de *shearografia*. Um prisma de Wollaston consiste em duas cunhas similares, de materiais birrefringentes, unidas de modo a obter uma placa com faces paralelas. Os eixos ópticos nas duas cunhas são paralelos às faces externas do prisma e mutuamente perpendiculares.

A incidência de um feixe de luz com polarização de 45° em um prisma de Wollaston produz dois raios refratados, polarizados ortogonalmente entre si, e com ângulo de divergência (α) simétrico determinado com base no ângulo da cunha (θ), na combinação de materiais do prisma e no comprimento de onda do laser utilizado [41]. A separação angular α dos feixes emergentes é dada pela equação

$$\alpha = 2(n_e - n_o) \tan \theta, \quad (3.14)$$

onde θ é o ângulo da cunha, e n_o e n_e os índices de refração ordinário e extraordinário, respectivamente.

A Figura 3.22 mostra o resultado obtido pela transposição de um feixe de luz em um prisma de Wollaston.

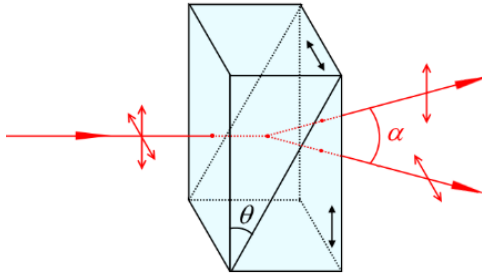


Figura 3.22 – Prisma de Wollaston.

Uma possível configuração óptica de um sistema de *shearografia* utilizando prisma de Wollaston é mostrada na Figura 3.23. Ela é composta por uma placa de atraso (PA), um polarizador (P), um prisma de Wollaston (PW) e uma câmera CCD para captação da imagem. A placa de atraso permite modificar o estado de polarização de uma onda e, desta forma, converter um estado de polarização em outro. Ela é utilizada para transformar as polarizações lineares dos feixes emergentes do prisma de Wollaston em polarizações circulares. Para tanto, uma placa de quarto de onda ($\lambda/4$) é posicionada com seu eixo de atraso coincidente com o plano bissetor entre os eixos ortogonais de polarização do prisma de Wollaston. Nesta configuração, o deslocamento intencional de fase é obtido pela rotação do polarizador em torno do eixo óptico comum a todo o sistema.

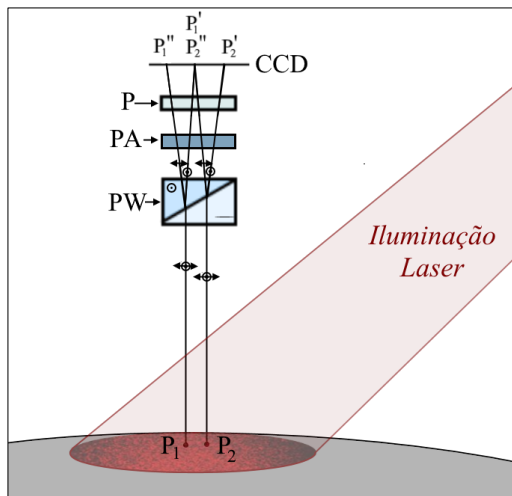


Figura 3.23 – Arranjo óptico de sistema de *shearografia* utilizando prisma de Wollaston.

3.4 INTERPRETAÇÃO DAS FRANJAS DE SHEAROGRAFIA

As franjas visíveis de *shearografia* têm relação com as diferenças de fase originadas pelo campo de deformações ocorrido na superfície de um objeto inspecionado. A deformação ocorre devido à aplicação de um carregamento (térmico, mecânico, a vácuo, entre outros) sobre a superfície do objeto.

Assim, a fase de cada ponto da superfície pode ser obtida através do seguinte produto escalar:

$$\varphi = \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{d} , \quad (3.15)$$

onde \mathbf{k}_s é o vetor sensibilidade e \mathbf{d} o vetor deslocamento em um determinado ponto da superfície.

O vetor deslocamento \mathbf{d} é obtido pela soma vetorial de suas componentes u , v e w , relativas às direções x , y e z , respectivamente. Portanto, obtém-se \mathbf{d} através da equação

$$\mathbf{d} = (u \cdot \mathbf{i} + v \cdot \mathbf{j} + w \cdot \mathbf{k}) , \quad (3.16)$$

onde \mathbf{i} , \mathbf{j} e \mathbf{k} são vetores unitários nas direções x , y e z , respectivamente.

A magnitude do vetor sensibilidade pode ser obtida por

$$k_s = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \cos \left(\frac{\theta_{xy}}{2} \right), \quad (3.17)$$

onde θ_{xy} é o ângulo entre o eixo de iluminação e o eixo óptico de visualização, conforme mostra a Figura 3.24. O comprimento de onda do laser utilizado, λ , também é um fator que compõe a sensibilidade de medição. O vetor sensibilidade \mathbf{k}_s localiza-se no bissetor do ângulo θ_{xy} . A sensibilidade de medição das deformações no eixo z (fora do plano) é aumentada quanto menor for o ângulo θ_{xy} .

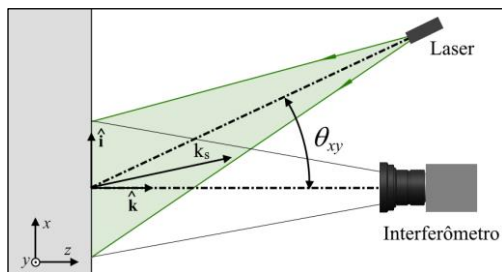


Figura 3.24 – Vetor sensibilidade de um determinado ponto da superfície.

Na *shearografia*, a introdução do deslocamento lateral nas imagens faz com que cada pixel do sensor receba luz de dois pontos distintos da superfície do objeto. Os dois padrões de *speckle* deslocados lateralmente se combinam coerentemente gerando um terceiro padrão, o qual é sensível à taxa de mudança de fase entre os dois padrões combinados [42]. A fase relativa a dois feixes que interferem entre si no sensor da câmera é obtida através de

$$\phi = \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{d}_1 - \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{d}_2 \quad (3.18)$$

$$\phi = \mathbf{k}_s \cdot (u_1 \cdot \mathbf{i} + v_1 \cdot \mathbf{j} + w_1 \cdot \mathbf{k}) - \mathbf{k}_s \cdot (u_2 \cdot \mathbf{i} + v_2 \cdot \mathbf{j} + w_2 \cdot \mathbf{k}) \quad (3.19)$$

$$\phi = \delta u \cdot \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{i} + \delta v \cdot \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{j} + \delta w \cdot \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{k} \quad (3.20)$$

Assim, com a definição da direção preferencial e da magnitude do deslocamento lateral, e através de um rearranjo matemático, o valor da fase relativa, quando aplicado um deslocamento lateral na direção x, pode ser obtido por

$$\phi_x = \frac{2\pi \delta_x}{\lambda} \left(\sin(\theta_{xy}) \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos(\theta_{xy})) \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad (3.21)$$

onde δ_x é o deslocamento lateral na direção do eixo x, e $\partial w/\partial x$ e $\partial u/\partial x$ são as primeiras derivadas parciais dos deslocamentos fora do plano e no plano do objeto deformado, respectivamente.

Similarmente, se o deslocamento lateral for na direção do eixo y, o valor da fase relativa pode ser obtido por

$$\phi_y = \frac{2\pi \delta_y}{\lambda} \left(\sin(\theta_{xy}) \frac{\partial u}{\partial y} + (1 + \cos(\theta_{xy})) \frac{\partial w}{\partial y} \right), \quad (3.22)$$

onde δ_y é o deslocamento lateral na direção do eixo y, e $\partial w/\partial y$ e $\partial u/\partial y$ são as primeiras derivadas parciais dos deslocamentos fora do plano e no plano do objeto deformado, respectivamente.

Quando um objeto é deformado, um ponto arbitrário $P_1(x, y, z)$ na superfície do objeto é deslocado para $P_1'(x + u, y + v, z + w)$, e o ponto vizinho $P_2(x + \delta_x, y + \delta_y, z + \delta_z)$ é deslocado para $P_2'(x + \delta_x + u + \delta u, y + \delta_y + v + \delta v, z + \delta_z + w + \delta w)$, conforme ilustrado na Figura 3.25.

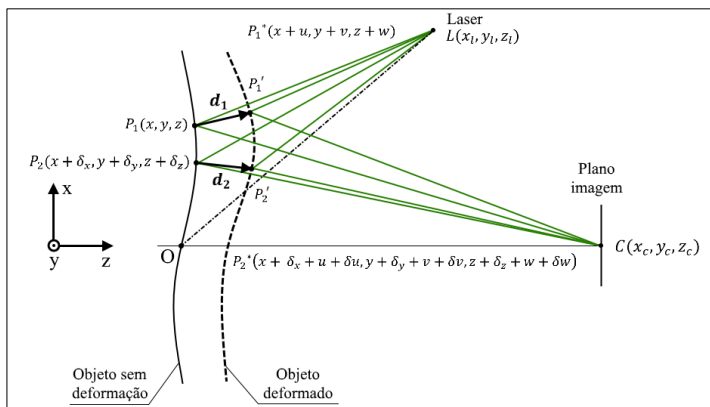


Figura 3.25 – Diferença de trajetória da luz do laser entre dois pontos da superfície após uma deformação do objeto. Adaptado de [33].

A deformação ilustrada na Figura 3.25 é responsável pela mudança de fase entre os dois pontos vizinhos, P_1 e P_2 . Durante uma medição com *shearografia*, um mapa de fases capturado depois de uma deformação é subtraído do mapa de fases de referência, capturado antes da deformação.

O mapa resultante, denominado mapa das diferenças de fase, é relativo aos componentes cartesianos do gradiente de deslocamento [42].

A Figura 3.26 mostra o processo para obtenção do mapa de diferenças de fase através do algoritmo de quatro-passos. No estado inicial, antes do carregamento, quatro imagens defasadas de 90° são adquiridas, $I(0)$, $I(1)$, $I(2)$ e $I(3)$. A fase de cada pixel da imagem é calculada através da Equação 3.9. Na sequência, a peça é submetida a um carregamento. Os mesmos procedimentos de aquisição de imagens e do cálculo de fase são repetidos para o estado final. Com a subtração dos mapas de fase final e inicial, obtém-se o mapa das diferenças de fase referente às derivadas do deslocamento da superfície.

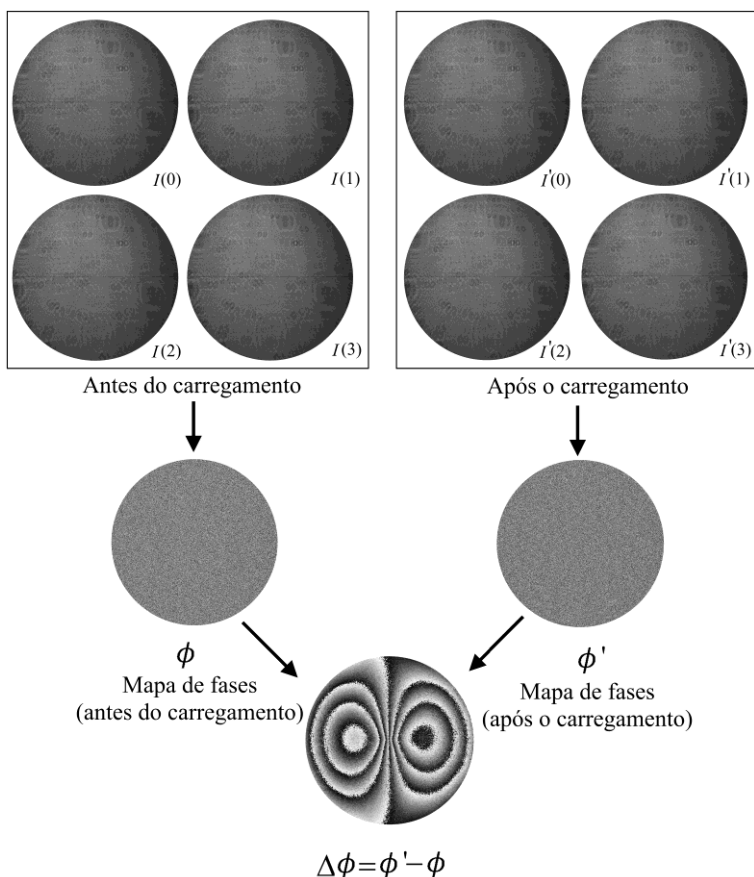


Figura 3.26 – Processo para obtenção do mapa das diferenças de fase característico de *shearografia*, utilizando o algoritmo de quatro passos.

A sensibilidade de uma medição de *shearografia* é influenciada principalmente pelo valor do deslocamento lateral aplicado. O deslocamento lateral é equivalente a um ajuste de ganho da sensibilidade, determinando a densidade de franjas relativas à diferença de fase calculada. A Figura 3.27 mostra dois resultados de medição com *shearografia*. O deslocamento lateral utilizado em (b) tem aproximadamente o dobro do valor do deslocamento lateral utilizado em (a). É possível perceber que apesar da deformação ser a mesma em ambas as medições, o número de franjas é maior em (b) em função do maior valor de deslocamento lateral aplicado.

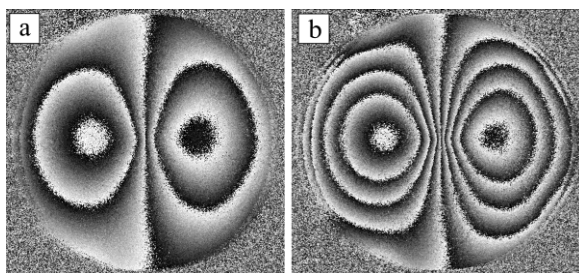


Figura 3.27 – Resultados de medição da deformação de uma membrana metálica com *shearografia*, onde apenas o valor do deslocamento lateral (δ_x) das imagens foi alterado, sendo δ_x em (a) $<$ δ_x em (b) .

4 CONFIGURAÇÃO PROPOSTA

De acordo com os objetivos definidos neste trabalho, o sistema de inspeção foi desenvolvido para aplicações em condições reais de campo. O sistema projetado visa inspecionar primordialmente uniões adesivadas em tubulações de compósito, em particular, juntas do tipo ponta e bolsa. Ao mesmo tempo, o sistema deve ser também capaz de avaliar a qualidade de reparos de materiais compósitos aplicados em superfícies externas de tubulações metálicas.

Normalmente a atividade de inspeção para avaliação da qualidade de uma união adesivada pode acontecer em três etapas distintas: na montagem da tubulação, durante a sua operação ou em uma parada de manutenção. Cada uma dessas etapas possui características distintas, as quais foram identificadas e contribuíram na elaboração da lista de requisitos de projeto.

4.1 REQUISITOS DE PROJETO

A identificação dos requisitos de projeto é uma etapa crucial no processo de criação de um produto. Tanto as características que o produto deve atender como as suas restrições devem estar bem claras nessa etapa. Além disso, um amplo conhecimento das particularidades do ambiente em que o produto será inserido é de suma importância para o efetivo sucesso do mesmo. Embora também sejam aplicados em instalações *onshore*, a demanda para inspeção de uniões adesivadas em tubulações de compósito e também de reparos em tubulações metálicas ocorre predominantemente em plataformas de petróleo, sejam elas unidades fixas, semissubmersíveis ou navios-plataforma tipo FPSO.

As plataformas de petróleo são constituídas por módulos funcionais onde ocorrem o processamento e o tratamento de óleo, gás e água. A maioria dos sistemas operacionais tem seu funcionamento baseado na movimentação de fluidos, que é realizada por um emaranhado de tubulações que interliga esse complexo sistema. O arranjo físico dos equipamentos em uma planta petrolífera, bem como o fluxo sequencial do fluido, determinam o posicionamento ideal dessas tubulações.

O projeto de uma tubulação é desenvolvido para atender os aspectos relacionados à operação, manutenção, segurança e custo da instalação. Portanto, em um projeto desse porte é primordial a otimização dos espaços e das matérias-primas, buscando-se minimizar os custos de implementação do empreendimento. Desta forma, a disposição das tubulações em uma unidade petrolífera delimita os espaços disponíveis

para promover ensaios não destrutivos (END) que avaliem a qualidade de uniões adesivadas ou a adesão de reparos em tubulações metálicas. Por esta razão, o volume do equipamento de inspeção deve ser o menor possível para permitir a sua aplicação em locais de difícil acesso devido à limitação de espaço.

O sistema de inspeção pode ser utilizado na avaliação da qualidade de uma união após sua montagem, a qual antecede à instalação definitiva da tubulação nos módulos funcionais. Essa etapa acontece normalmente em oficinas de campo, adjacentes aos canteiros de obra, denominadas de *pipe shops*. Nesse caso, a característica fundamental para o END é a produtividade e, portanto, o sistema deve ser projetado para promover a sua rápida montagem nas tubulações e, conseqüentemente, minimizar o tempo de inspeção. Esta também é uma característica fundamental em uma inspeção em campo, pois a redução do tempo de inspeção dinamiza a atividade, minimiza o tempo necessário de embarque da equipe executora e maximiza o volume de medição.

Outros fatores inerentes a uma inspeção em campo estão relacionados às características operacionais da plataforma, aos fatores climáticos e também à dinâmica da inspeção. Em uma plataforma em operação é inevitável a presença de vibrações provocadas por diversos agentes, tais como: equipamentos em funcionamento, vazão de insumos nas tubulações, bem como perturbações causadas por correntes de ar, entre outros. Por conseguinte, o sistema projetado deverá ser capaz de realizar inspeções na presença de um nível aceitável de vibrações mecânicas.

Um sistema de medição com poucos elementos, massa e volume reduzidos, centro de gravidade baixo e com configuração espacial que promova uma maior robustez da estrutura é fundamental para minimizar os efeitos da vibração na inspeção. A fixação rígida do sistema na própria tubulação produz um menor movimento relativo entre o sistema e a superfície de medição, tornando-se uma alternativa melhor do que os sistemas montados externamente com tripés. A presença de grande movimento relativo entre o sistema e a superfície de medição gera perda de correlação das imagens adquiridas, degradando ou mesmo inviabilizando a medição com *shearografia*.

O local de inspeção também é um ponto crucial, pois fatores externos como alta luminosidade, temperaturas extremas, elevada umidade (que causa condensação sobre a superfície de medição), agressividade do ambiente marinho, entre outros, podem estar presentes. A seleção correta dos materiais que compõem o sistema de inspeção, bem como, dos tratamentos de superfície adequados é fundamental para

maximizar a vida útil do equipamento em ambientes expostos às intempéries.

Do ponto de vista operacional, a minimização da massa e do volume do sistema é primordial para facilitar a movimentação do equipamento entre os pontos de inspeção. Estes fatores também contribuem para facilitar a montagem do sistema nas tubulações, causando um menor desgaste ao corpo técnico executor.

Em inspeções com *shearografia*, a aplicação de carregamento mecânico adequado em cada área inspecionada é também de grande importância. Estudos anteriores demonstraram que a aplicação de carregamento térmico na inspeção de juntas ponta e bolsa, em tubulações de compósito, não apresentaram bons resultados [43]. O emprego de carregamento mecânico com pressão hidrostática mostrou-se o mais adequado para esta aplicação. Diante disso, definiu-se que o sistema de inspeção desenvolvido neste trabalho utilizará como forma de carregamento a variação da pressão interna na tubulação.

Como nem sempre é viável produzir inúmeras variações da pressão interna de uma tubulação operante, prospectou-se a utilização de um sistema modular com múltiplos sensores, denominado neste trabalho como Colar. A aplicação de múltiplos sensores possibilitará inspecionar todo o perímetro da junta em uma única etapa de carregamento, ou seja, em uma única mudança de pressão interna da tubulação.

De acordo com as demandas apresentadas pela indústria do petróleo e gás, optou-se pelo desenvolvimento de um sistema capaz de inspecionar juntas ponta e bolsa em tubulações de compósito com diâmetros nominais de 6" (150 mm), 8" (200 mm) e 10" (250 mm). Este sistema também possibilitará a inspeção em reparos de compósitos em tubulações metálicas com bitolas de até 30". A Tabela 4.1 resume os requisitos de projeto identificados:

Tabela 4.1 – Resumo dos requisitos de projeto.

Requisitos do cliente	Requisitos de projeto
Restrições de espaço	Volume reduzido
Produtividade	Fácil transporte, manipulação e instalação do sistema
Presença de vibração	Menor número possível de peças móveis.
	Massa e volume reduzidos
	Centro de gravidade baixo
	Elevada robustez da estrutura de fixação
Resistente aos fatores ambientais	Utilização de peças com materiais e tratamentos de superfície adequados ao ambiente onde será aplicado
	Fixação rígida do sistema na própria tubulação
Ergonomia	Massa e volume reduzidos
	Fácil montagem do sistema durante inspeções
Carregamento mecânico	Variação de pressão interna na tubulação
Limitação operacional	Sistema com múltiplos sensores

4.2 SISTEMA DE INSPEÇÃO COM MÚLTIPLOS SENSORES – COLAR

O projeto conceitual do Colar iniciou-se com a definição da quantidade mínima de sensores a serem montados no Colar para que este fosse capaz de inspecionar, em uma única etapa, toda a região perimetral de uniões adesivadas em tubulações de compósito. Para tanto, utilizou-se uma avaliação geométrica da área de medição, onde três principais fatores foram considerados: o campo de visão do sistema (FoV), o volume ocupado e a sensibilidade de medição (conforme apresentado na equação 3.17).

A configuração com quatro sensores se mostrou a mais adequada para inspecionar tubulações de diâmetro nominal de 6” (150 mm). A Figura 4.1 ilustra três características relevantes que foram analisadas, quando comparadas com a alternativa com três sensores:

- a) Menor distância entre a região mais afastada do sensor e a superfície de inspeção, possibilitando tanto a compactação do dispositivo como a aproximação do centro de gravidade em relação aos pontos de apoio da estrutura;

- b) Maior sensibilidade de medição nas extremidades, produzida pelo menor ângulo entre o vetor deformação (\mathbf{d}) e o vetor sensibilidade do sistema (\mathbf{k}_s), comparado aos valores obtidos na concepção com três sensores;
- c) Maior sobreposição entre as áreas de medição vizinhas, facilitando a concatenação via *software* dos resultados de inspeção de áreas adjacentes.

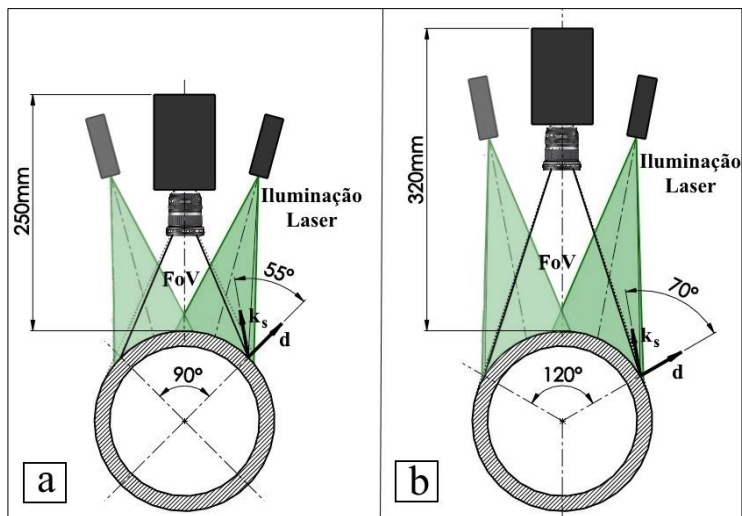


Figura 4.1 – Comparação entre as configurações: (a) com quatro sensores e (b) com três sensores, para inspecionar tubulações de 6”

Para este projeto, utilizou-se como referência as dimensões e tolerâncias especificadas na série de tubulações de epóxi reforçado com fibra de vidro *Bondstrand* 7000M, da empresa Ameron, por ser uma das tubulações de compósito mais utilizadas em campo. Um *spool* (trecho de tubulação pré-montado) com diâmetro nominal de 6” (150 mm), denominado CP3, foi preparado e disponibilizado pelo CENPES/PETROBRAS para testes nas dependências do LABMETRO/UFSC. Este corpo de prova possui quatro uniões tipo ponta e bolsa, nomeadas como J5, J6, J18 e J19, conforme representado na Figura 4.2. Alguns defeitos foram artificialmente inseridos nas uniões para simular um indesejado defeito de fabricação. Uma abordagem mais detalhada desse corpo de prova é apresentada na seção 6.4.1.

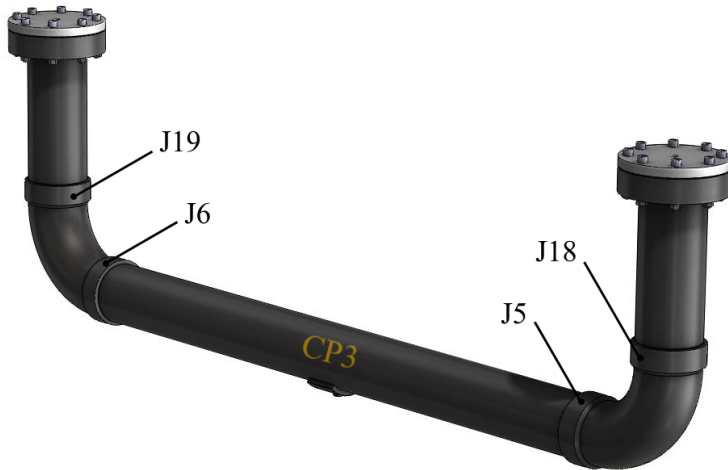


Figura 4.2 – *Spool Bondstrand 7000M CP3* com diâmetro nominal de 6”.

Como o projeto contempla o desenvolvimento de um sistema capaz de medir tubulações de PRFV (Plástico Reforçado com Fibra de Vidro) de diâmetros nominais de 6”, 8” e 10”, a adaptação nas diferentes tubulações ocorrerá pela variação da quantidade de sensores no Colar. A distância entre os sensores e a superfície de medição é a mesma em todas as configurações. Esta prática produz uma montagem mais rápida, dispensando ajustes extras para o posicionamento de cada módulo do sistema. Desta forma, a tubulação de 6” (150 mm) será inspecionada por quatro sensores, a tubulação de 8” (200 mm) por cinco sensores e a de 10” (250 mm) por 6 sensores, conforme ilustrado na Figura 4.3.

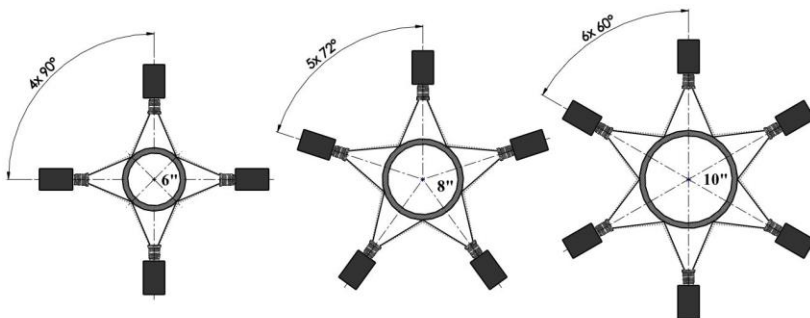


Figura 4.3 – Mudança do número de sensores do sistema de inspeção conforme o diâmetro da tubulação.

Um sistema de inspeção baseado na técnica *shearografia* é composto basicamente por cinco módulos funcionais:

- a) Módulo de formação e aquisição de imagem;
- b) Módulo de iluminação laser;
- c) Módulo de sustentação e fixação;
- d) Módulo de carregamento;
- e) Módulo de controle e potência.

O Colar de inspeção proposto neste trabalho não possui módulo de carregamento, visto que utiliza carregamento mecânico proveniente da variação da pressão interna da própria tubulação de compósito. Quando a aplicação de outro tipo de carregamento for possível, será necessário acoplar o respectivo módulo de carregamento para possibilitar a inspeção. Uma abordagem detalhada de cada módulo do Colar é apresentada nos tópicos seguintes.

4.2.1 Módulo de formação e aquisição de imagem

É composto basicamente por uma câmera de vídeo com sensor digital de captura de imagem, um interferômetro óptico que produza a dupla imagem, um dispositivo para promover o deslocamento de fase e um conjunto de lentes para formação da imagem sobre o sensor da câmera. Para atender às três configurações de medição (6", 8" e 10") o módulo de formação e aquisição de imagem será dimensionado para visualizar, na distância de trabalho s_0 , um objeto de 233 mm x 175 mm. Com essa configuração, a sobreposição entre as inspeções vizinhas, em todas as configurações, é garantida.

4.2.1.1 Óptica geométrica

Através da teoria paraxial da óptica geométrica, um estudo preliminar de lentes finas foi realizado para maximizar o aproveitamento do sensor de imagem. Com o intuito de não produzir uma óptica específica para o sistema, e sim utilizar elementos ópticos comerciais, um estudo mais aprimorado de *ray tracing* não foi necessário. Assim sendo, o principal objetivo dos cálculos foi a seleção da lente objetiva mais adequada. Primeiramente, foram calculados a magnificação M_g do sistema óptico (relação entre o tamanho da imagem y_i [mm] e o tamanho do objeto y_o [mm]) e o comprimento focal f [mm] da lente. A magnificação M_g e o comprimento focal f foram obtidos através das equações a seguir [22]:

$$M_g = \frac{y_i}{y_o} = \frac{z_i}{z_o}, \quad (4.1)$$

e

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{z_o} + \frac{1}{z_i}, \quad (4.2)$$

onde z_o e z_i são as distâncias [mm] entre lente e objeto e entre lente e imagem, respectivamente, conforme mostrado na Figura 4.4.

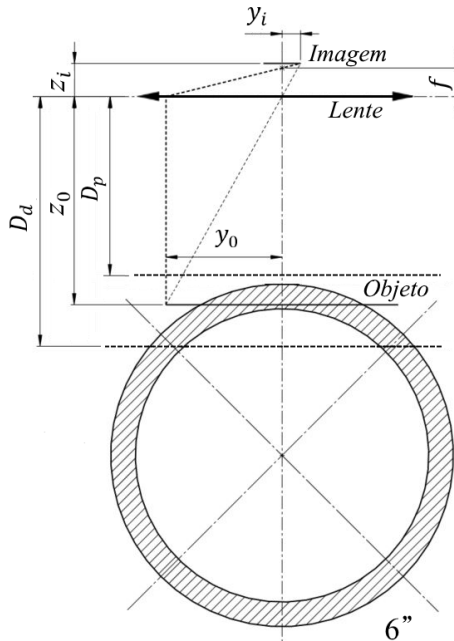


Figura 4.4 – Modelo óptico geométrico.

O tamanho da imagem foi atrelado às dimensões de um sensor CCD de 1/2" (com dimensões de 6,4 mm x 4,8 mm) de uma câmera de vídeo industrial. Para obter uma maior área de medição, a câmera foi orientada com o lado maior do CCD disposto paralelamente ao sentido axial da tubulação, eixo x, conforme ilustrado na Figura 4.5. Portanto, o tamanho definido para imagem y_i foi 4,8 mm e a projeção do tamanho do objeto y_o foi 175 mm. Neste caso o valor obtido para a magnificação necessária foi 0,028.

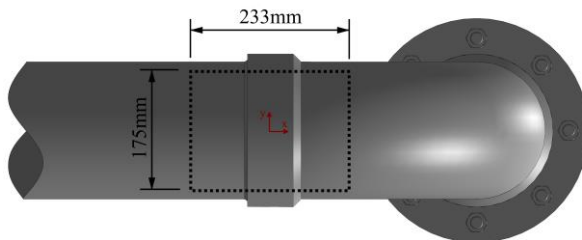


Figura 4.5 – Orientação do sensor de imagem em relação à tubulação.

Em função das restrições de espaço existentes em campo, o raio máximo que define o volume onde o sistema estará contido ficou restrito a uma distância de 250 mm em relação a superfície do tubo inspecionado. Portanto, a altura total do sistema foi limitada a este valor. Definindo-se, portanto, o comprimento máximo efetivo do módulo de formação e aquisição de imagem em 120 mm, a distância z_o utilizada como parâmetro inicial para o estudo foi de 130 mm. Desta forma, os cálculos mostraram que uma lente de comprimento focal f igual a 3,5 mm é a mais adequada para essa aplicação.

Por se tratar de um sistema de interferometria *speckle*, cálculos extras são necessários para o dimensionamento do sistema óptico. Como visto anteriormente, o tamanho do granulado óptico gerado pela iluminação de uma luz laser em uma superfície rugosa é afetado pela abertura imposta pela íris do sistema óptico. Menores aberturas da íris produzem padrões granulares mais grosseiros (*speckles* maiores) e, em contrapartida, maiores aberturas proporcionam padrões granulares mais finos (*speckles* menores). Deste modo, o sistema foi dimensionado para obter um grão de *speckle* equivalente ao tamanho do *pixel* do sensor.

Como a dimensão lateral do pixel do sensor selecionado é $4,6 \mu\text{m}$, e considerando a utilização de um laser de cor verde, com comprimento de onda λ de 532 nm, o tamanho calculado para a abertura da íris, utilizando a Equação 3.3, foi 0,51 mm. Normalmente, a indicação do ajuste da abertura da íris em uma lente objetiva é especificada pela relação entre o comprimento focal e o tamanho da abertura da íris ($f/\#$). Portanto, a abertura para uma lente com f igual a 3,5 mm deve ser ajustada para um valor próximo de $f/7$.

Outro fator importante que deve ser considerado no projeto do módulo de formação e aquisição de imagem é a profundidade de campo (DoF), ou profundidade de foco, que é faixa de distância na qual o sistema consegue focalizar um objeto, ou seja, produzir uma imagem

nítida. Um dos fatores que alteram consideravelmente a profundidade de campo é a abertura da íris. Quanto menor for a abertura, maior será a profundidade de campo, ou seja, o sistema será capaz de captar uma imagem nítida ao longo de uma maior distância. Porém, quanto menor a abertura da íris, menor será a luminosidade captada pelo sensor [44].

A profundidade de campo é então definida pelos limites próximo (D_p) e distante (D_d) em que o sistema consegue captar uma imagem nitidamente aceitável, ilustrados previamente na Figura 4.4. Um cálculo analítico desses limites não é uma prática trivial. Vários métodos são propostos, cada qual com suas simplificações. Neste trabalho, utilizou-se a óptica geométrica [26] para estimar os valores de D_p e D_d , obtida por

$$D_p = \frac{f z_0 (D + c)}{(f D + z_0 c)}, \quad (4.3)$$

e

$$D_d = \frac{f z_0 (D - c)}{(f D - z_0 c)}, \quad (4.4)$$

onde c é o menor círculo que será percebido como um ponto identificável pelo sistema, denominado de círculo de confusão e estimado em $9\mu\text{m}$, D o diâmetro de abertura da íris e f o comprimento focal da lente.

Os valores obtidos foram: $D_p=80$ mm e $D_d=370$ mm. Como o foco foi inicialmente ajustado para uma distância nominal $z_0=130$ mm, o sistema será capaz de adquirir imagens nítidas na faixa de 80 a 370 mm, ou seja, 50mm antes e 240mm depois do plano de foco ajustado. Portanto, a profundidade de campo calculada atende aos requisitos de projeto.

4.2.1.2 Configurações escolhidas para o projeto

Com base nos requisitos previamente discutidos para o sistema de inspeção, o projeto conceitual priorizou cinco características básicas: robustez, simplicidade, funcionalidade, compactação e confiabilidade.

Portanto, a análise das potencialidades de cada configuração mostrou que a configuração mais promissora para atender todos os requisitos foi a opção que utiliza a grade difrativa como elemento gerador da dupla imagem. Como essa configuração utiliza, na sua forma simplificada, um deslocamento lateral fixo, optou-se também pelo desenvolvimento de um segundo sistema óptico com deslocamento lateral ajustável. A configuração óptica escolhida para contemplar o ajuste do deslocamento lateral foi aquela denominada $4f$. O deslocamento lateral

ajustável permite, de acordo com a necessidade do inspetor, aumentar ou diminuir a sensibilidade de medição das deformações na superfície do objeto.

4.2.1.2.1 Sistema de Inspeção $4f$

O arranjo óptico proposto é uma variação do interferômetro de Michelson, combinado com o sistema $4f$. Este sistema consiste na introdução de duas lentes de mesmo comprimento focal, com um espaçamento entre elas equivalente ao dobro deste comprimento focal. Como o sistema prevê neste espaço a inserção de um cubo divisor de feixes com índice de refração maior que 1, no momento da montagem óptica a distância entre as lentes será um pouco menor [37]. Por ser uma opção compacta com excelente qualidade óptica e de baixo custo, optou-se pela utilização de um par de microlentes objetivas ao invés da utilização de lentes objetivas de tamanho normal. Uma terceira lente objetiva disposta na frente de todo o arranjo óptico permite o ajuste de foco e da abertura da íris de modo rápido e fácil.

Para um posicionamento preciso das microlentes no interior do interferômetro, visto que as especificações técnicas do fabricante não forneciam dados suficientes, um aparato experimental foi utilizado para a obtenção da curva de foco característica da microlente. Esta curva define as posições relativas entre lente-objeto e lente-imagem. Utilizou-se para tanto um trilho graduado, onde foram montados os suportes da microlente e do anteparo para projeção da imagem, conforme ilustrado na Figura 4.6.



Figura 4.6 – Aparato para obtenção da curva característica da microlente.

Na região frontal ao trilho, um feixe luminoso, incidindo em uma superfície translúcida contendo um padrão de linhas e letras, produziu uma imagem que simulou um objeto bem definido no espaço. No procedimento realizado, a microlente foi posicionada a uma distância

conhecida do objeto e o anteparo traseiro foi movimentado até se obter uma imagem nítida na sua superfície milimetricamente graduada, conforme ilustrado na Figura 4.7. Os valores das distâncias entre os elementos e o tamanho da imagem formada foram registrados. Na seqüência, alterou-se a posição da microlente, repetindo-se o procedimento até que toda a faixa de interesse fosse varrida.

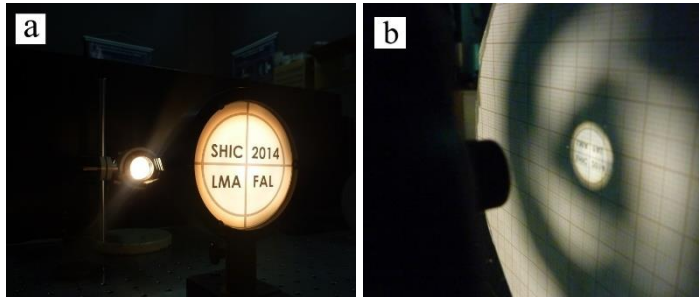


Figura 4.7 – (a) Feixe luminoso projetado em uma superfície translúcida simulando um objeto; (b) Anteparo utilizado para projeção da imagem.

É imperativo ressaltar que os valores z_o' e z_i' , obtidos no procedimento experimental, foram medidos entre a face traseira do suporte da lente e os planos objeto e imagem, respectivamente. De posse deles, a curva característica de focalização da lente foi obtida, conforme representado na Figura 4.8.

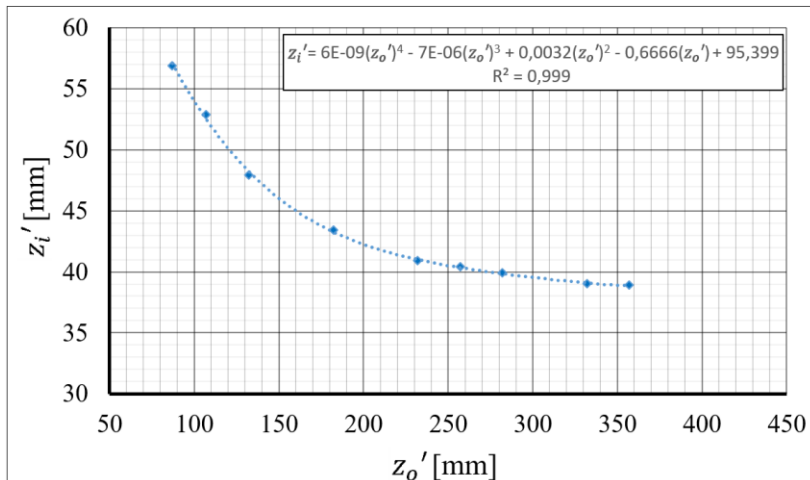


Figura 4.8 – Curva de focalização característica da lente.

A curva auxiliou na montagem dos elementos no interior do interferômetro, pois o referencial para o posicionamento das lentes passou a ser a face traseira da carcaça da lente. Conforme mostrado na Figura 4.9.

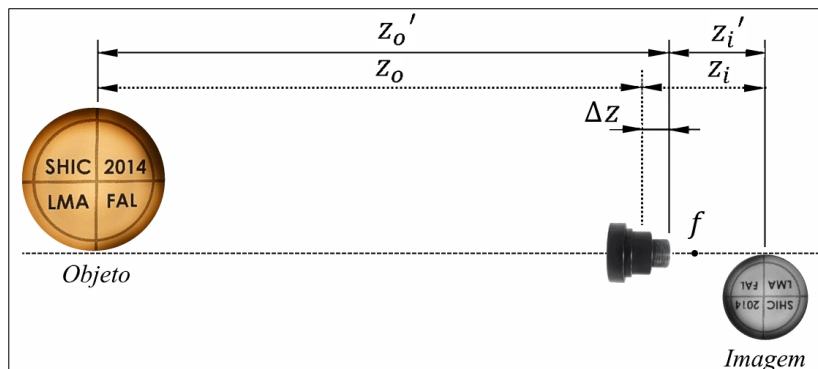


Figura 4.9 – Identificação do plano característico da microlente.

Com uma pequena modificação na equação 4.2, onde os valores de z_o e z_i foram substituídos por $z_o' - \Delta z$ e $z_i' + \Delta z$, respectivamente, obteve-se

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{z_o' - \Delta z} + \frac{1}{z_i' + \Delta z}, \quad (4.5)$$

onde Δz é a distância relativa entre a face traseira do suporte e o plano da lente, conforme mostrado na Figura 4.9. Como o comprimento focal teórico da lente é conhecido, calculou-se os valores de Δz .

O arranjo óptico do interferômetro $4f$, composto por: lente objetiva ($L_{Objetiva}$) com f igual a 3,5 mm, microlentes (L_1 e L_2) com f igual a 35 mm e sensor de imagem (CCD), foi montado em bancada para obter o posicionamento global dos elementos. Com a inserção de dois divisores de feixe (DF) com índice de refração 1,5195 para simular o caminho de ida e de volta da luz após ser refletida nos espelhos, pôde-se ajustar a distância entre as lentes L_1 e L_2 , aproximando-as para compensar o efeito do atraso da luz. A disposição dos elementos está representada na Figura 4.10.

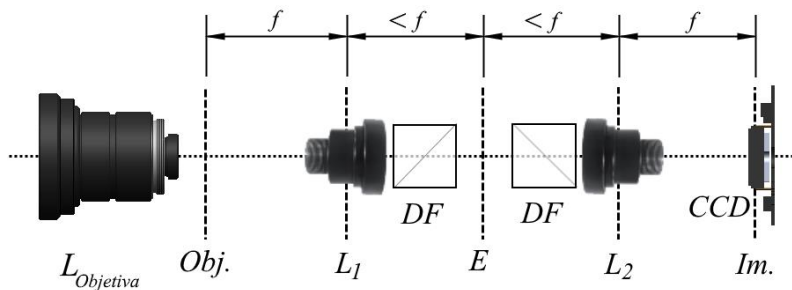


Figura 4.10 – Arranjo óptico do sistema $4f$.

Para introduzir o deslocamento de fase característico do processo de medição utilizou-se um atuador piezoelétrico especial, o qual é composto por uma estrutura metálica flexível, pré-tensionada, que promove um movimento amplificado e perpendicular ao sentido do movimento do cristal piezoelétrico. Com este dispositivo, obtém-se um deslocamento de $80\ \mu\text{m}$, ocupando-se um pequeno volume no cabeçote.

Uma pequena plataforma com ajuste angular foi utilizada para gerar o deslocamento lateral das imagens. Esta estrutura é composta por uma base fixa, onde são montados três parafusos, cada qual com rosca micrométrica e uma esfera acoplada à extremidade frontal. Estes parafusos são posicionados adequadamente para produzir o movimento angular e translacional de uma base móvel. As esferas, assentadas em um conjunto de apoios isostáticos (plano, vê e cone) localizados na face traseira da base móvel, garantem o excelente reposicionamento do aparato. Um conjunto de molas de alta rigidez auxiliam no acoplamento cinemático entre as bases, a fim de eliminar folgas e também pequenas movimentações da base que podem ser causadas por influências externas.

O projeto mecânico do módulo de *shearografia* com configuração $4f$ foi elaborado de forma a minimizar a quantidade de elementos do sistema. Além disso, as medições das distâncias focais reais, previamente realizadas em bancada, minimizaram a necessidade de ajustes mecânicos durante a montagem dos componentes ópticos do cabeçote. O sistema óptico $4f$ projetado está representado na Figura 4.11.

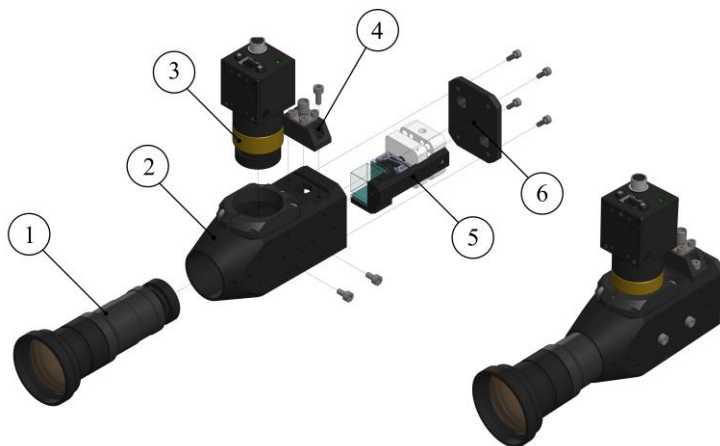


Figura 4.11 – Sistema óptico 4f. (1) Tubo metálico para suporte da lente objetiva; (2) Corpo principal; (3) Suporte câmera; (4) Suporte do conector elétrico do PZT; (5) Suporte do interferômetro com PZT e mecanismo para deslocamento lateral; (6) Tampa traseira.

4.2.1.2.2 Sistema de inspeção com grade difrativa

A solução proposta para o sistema de *shearografia* com grade difrativa é composta basicamente por quatro elementos principais: câmera para captura de imagem, lente objetiva, atuador piezoelétrico para promover o deslocamento de fase e grade difrativa para produzir a dupla imagem. Desta forma, com a utilização de uma menor quantidade de elementos opto-mecânicos, a concepção proposta resultou em um sistema ainda mais compacto, simples, leve e robusto.

Devido à dificuldade de se encontrar no mercado uma grade difrativa de transmissão de baixo custo e com intensidades predominantes nas ordens de difração $+1$ e -1 , uma grade difrativa com distribuição luminosa de 41% e 32%, nas ordens de difração 0 e $+1$, respectivamente, foi adquirida para testes preliminares.

O arranjo óptico foi elaborado buscando-se obter o menor volume possível para o sistema. Deste modo, a câmera digital foi desmontada e a grade difrativa foi alocada no espaço disponível entre a lente objetiva e o sensor da câmera. De acordo com a equação 3.11, considerando o passo da grade A igual a $14\ \mu\text{m}$ e a utilização de um laser diodo vermelho com comprimento de onda λ igual a $652\ \text{nm}$, o ângulo de difração da ordem $+1$ calculado foi de $2,6^\circ$. Portanto, o posicionamento da grade em relação ao sensor foi ajustado para promover um deslocamento lateral de

aproximadamente 7,5 mm, medido na superfície de inspeção, localizada a aproximadamente 200 mm da lente objetiva da câmera. Esta configuração óptica foi avaliada em uma bancada experimental, ilustrada na Figura 4.12.

Nesta bancada, utilizou-se um simulador de deformações composto por um disco de metal delgado (membrana) engastado nas extremidades, apoiado a um parafuso micrométrico posicionado na sua região central traseira. O deslocamento deste parafuso produz microdeformações controladas na placa, capazes de serem medidas pelo sistema de *shearografia*.

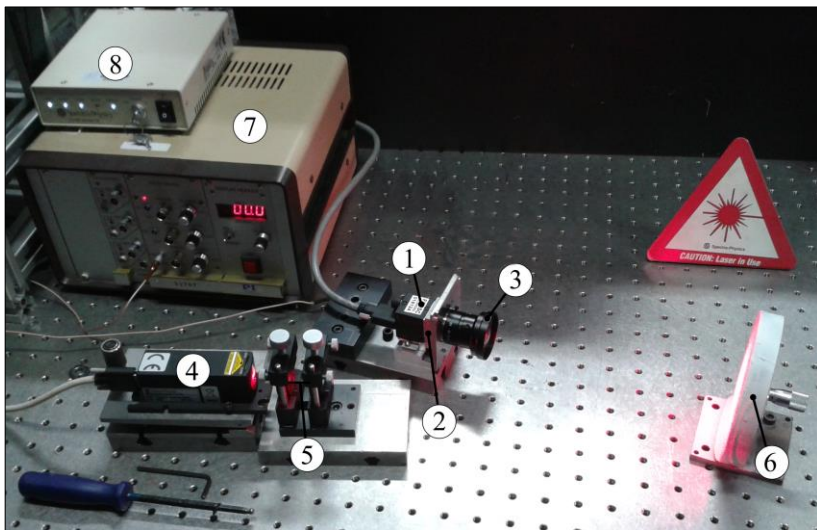


Figura 4.12 – Aparato experimental para avaliação da configuração óptica com grade difrativa. (1) Câmera CCD; (2) Conjunto grade difrativa e PZT; (3) Lente objetiva; (4) Laser diodo vermelho; (5) Conjunto de lentes para expansão do feixe luminoso; (6) Simulador de deformações; (7) *Driver* do PZT; (8) *Driver* do laser diodo.

Na primeira etapa dos testes, a câmera foi posicionada com seu eixo óptico normal à superfície da placa e a iluminação laser incidindo em um ângulo de aproximadamente 15° em relação ao eixo óptico. Os primeiros resultados comprovaram a capacidade de medição do sistema difrativo, porém as imagens de *shearografia* resultantes da diferença de fase apresentaram variações de contraste entre as regiões esquerda e direita de cada imagem, conforme ilustrado na Figura 4.13.

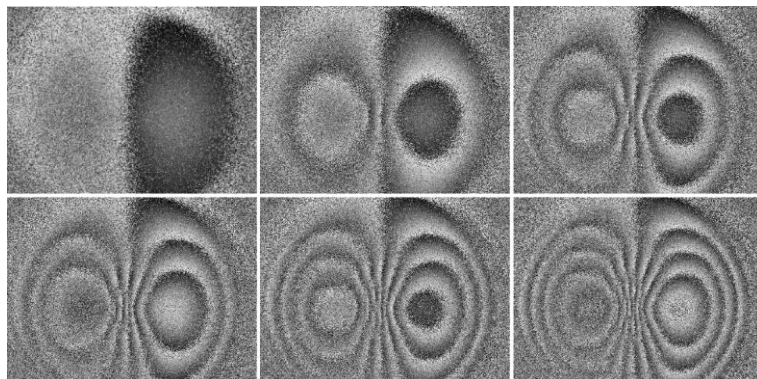


Figura 4.13 – Diferenças de contraste apresentadas na primeira etapa dos experimentos com o sistema difrativo.

Para avaliar uma possível causa desse efeito, alterou-se o lado de posicionamento da fonte de luz laser e a medição foi refeita. A Figura 4.14 mostra o resultado provocado pela mudança da direção da iluminação em relação à orientação do deslocamento lateral da imagem gerado pela grade difrativa. A região de menor contraste aparece sempre do lado oposto ao da incidência da iluminação. Portanto, o resultado deste experimento comprovou empiricamente que a direção com que a iluminação incide na superfície do objeto afeta a qualidade da imagem para este tipo de módulo de formação e aquisição de imagem.

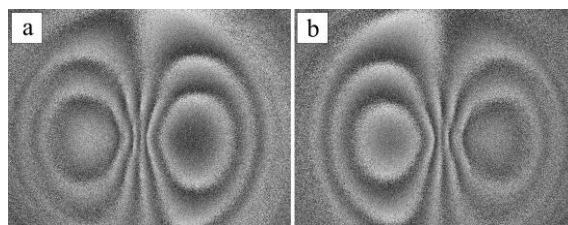


Figura 4.14 – Perda de contraste devido à orientação do laser em relação à grade difrativa. (a) Iluminação pelo lado esquerdo; (b) Iluminação pelo lado direito.

Face a isto, modificou-se a configuração dos elementos para que o eixo de propagação do laser não ficasse inclinado em relação à direção do deslocamento lateral, e sim na direção perpendicular a ela. Desta maneira o eixo óptico do laser ficará contido em um plano normal ao eixo do deslocamento lateral e, para isso, o laser foi fixado a um trilho inclinado sobre a câmera, conforme mostrado na Figura 4.15.

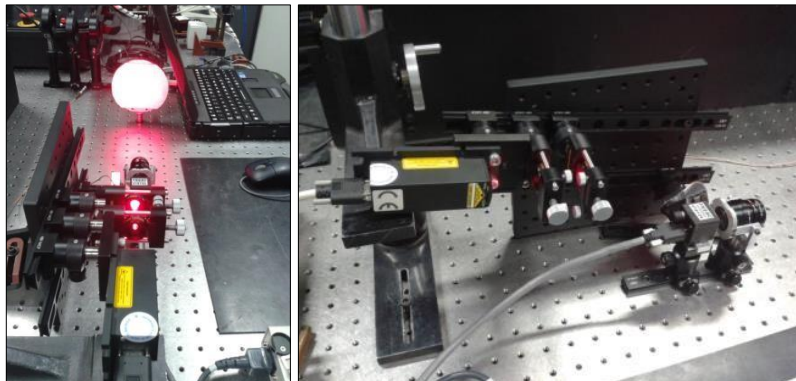


Figura 4.15 – Configuração com laser inclinado na direção perpendicular ao sentido do deslocamento lateral.

Com o novo posicionamento do laser, as imagens resultantes apresentaram uniformidade, conforme mostrado na Figura 4.16. Assim sendo, o posicionamento do módulo de iluminação no projeto ficou atrelado à orientação da grade difrativa no cabeçote óptico, ou seja, com ângulo de incidência perpendicular à direção do deslocamento lateral produzido pela grade.

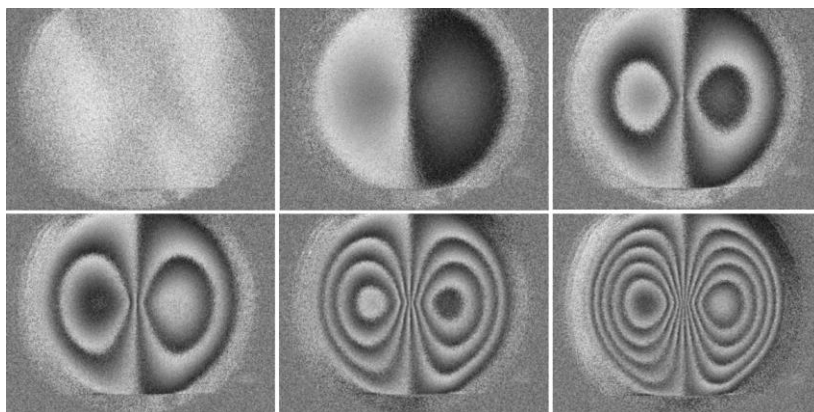


Figura 4.16 – Resultados da medição com a nova orientação da iluminação.

O projeto mecânico do sistema difrativo foi desenvolvido com enfoque no suporte da grade difrativa, o qual agregou duas funções: sustentação do elemento difrativo e mecanismo de deslocamento de fase. Para o desempenho destas funções, o suporte foi concebido com um

mecanismo flexível, dimensionado adequadamente para trabalhar na região elástica do material [45][46].

Uma análise de elementos finitos foi realizada para otimizar a estrutura. A liga de alumínio 6351-T6 foi utilizada em função de sua disponibilidade no mercado e por atender ao comportamento mecânico requerido. Para evitar uma deformação excessiva que promovesse a plastificação das hastes, o suporte foi desenhado para que o deslocamento fosse limitado pela própria estrutura.

O suporte é composto por uma região central, sustentada por duas hastes delgadas, onde é montada a grade difrativa. As hastes foram dimensionadas para produzir, quando defletidas, uma pré-carga de (0 a 11) N no atuador piezoelétrico, minimizando folgas e influências externas. A regulagem da pré-carga é feita através de um parafuso localizado na lateral da estrutura, conforme mostrado na Figura 4.17.

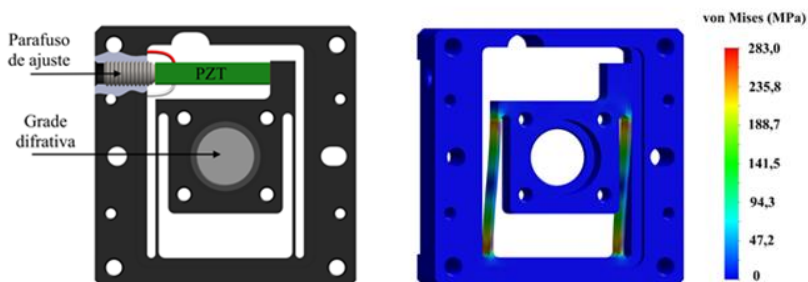


Figura 4.17 – Suporte flexível da grade difrativa.

Este mecanismo flexível traz os seguintes benefícios: resolução infinitesimal; movimentos suaves e contínuos; não apresenta folgas e atritos; não necessita de lubrificação; fabricação e montagem descomplicadas, uma vez que é composto de uma única peça. A configuração final do módulo de formação e aquisição de imagem difrativo é apresentada na Figura 4.18.

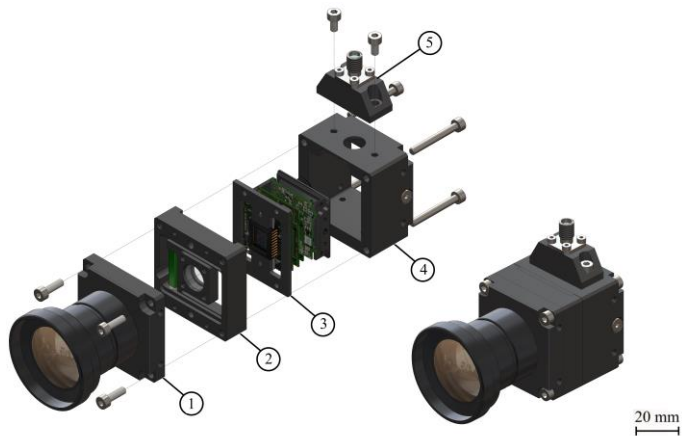


Figura 4.18 – Módulo de formação e aquisição de imagem difrativo. (1) suporte da lente objetiva; (2) suporte da grade difrativa; (3) suporte do sensor CCD de imagem; (4) carcaça da câmera e (5) suporte do conector elétrico do PZT.

4.2.1.3 Comparação entre os módulos de formação e aquisição de imagem

Após fabricação e montagem dos módulos de formação e aquisição de imagem, algumas características físicas foram avaliadas e o módulo de formação e aquisição de imagem difrativo apresentou ótimos resultados quando comparado ao módulo de formação e aquisição de imagem $4f$. A Figura 4.19 mostra os dois módulos lado a lado.



Figura 4.19 – Comparação entre os módulos de formação e aquisição de imagem difrativo e $4f$.

Conforme mostrado na Tabela 4.2, a relação entre as massas dos sistemas foi de aproximadamente 53%, e a de volume cerca de 31%.

Tabela 4.2 – Valores comparativos entre os módulos de formação e aquisição de imagem.

	Módulo difrativo	Módulo 4f
Massa (g)	273	513
Volume (mm ³)	82x53x41	156x100x37

4.2.2 Módulo de iluminação laser

O módulo de iluminação laser tem a função de iluminar uniformemente a superfície de medição com uma luz coerente. Através da expansão de um feixe de laser por meio de um conjunto de lentes, a condição necessária para a medição é obtida. Procurando maximizar o vetor sensibilidade do sistema de *shearografia* e minimizar perdas de contraste nas franjas em função da variação deste vetor, uma análise geométrica mostrou que o emprego de dois módulos de iluminação seria mais adequado.

Utilizou-se para o projeto um laser de estado sólido verde, operado em TEM₀₀, modo simples, com comprimento de onda λ igual a 532 nm (cor verde) e 40 mW de potência.

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 esféricas de comprimento focal 2 mm foram selecionadas para promover a expansão.

Um estudo simplificado de *ray tracing* (caminho dos raios luminosos) foi elaborado na mesma plataforma CAD (Desenho Assistido por Computador) utilizada para o desenvolvimento do projeto mecânico do sistema, o que possibilitou prever tanto o posicionamento das lentes como o trajeto percorrido pela luz, minimizando indesejadas obstruções.

Este módulo de iluminação 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, onde a combinação de movimentos dos excêntricos gera tanto o cancelamento como a soma dos efeitos de desalinhamento.

O valor da excentricidade está diretamente relacionado com a sensibilidade de ajuste do mecanismo. Uma excentricidade de 0,5 mm em cada acoplamento excêntrico produz um ajuste contido em um círculo com 2 mm de diâmetro, promovendo a correção de desalinhamento do laser de ± 1 mm em relação ao eixo óptico do módulo de iluminação.

Apesar de pequenos, estes valores de excentricidade foram suficientes para corrigir os desalinhamentos encontrados e proporcionaram uma maior sensibilidade de ajuste. Porém, para que os desalinhamentos decorrentes de erros de fabricação sejam eliminados por meio dos excêntricos, é necessária uma etapa de pré-alinhamento, detalhada no Apêndice A. A Figura 4.20 mostra os componentes do módulo de iluminação.

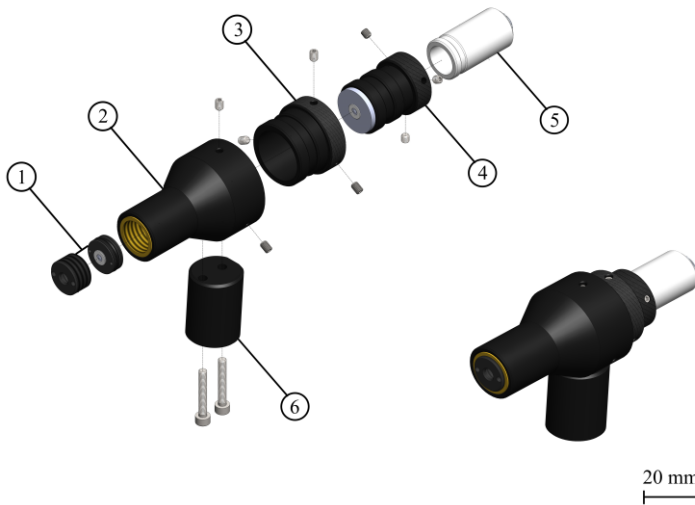


Figura 4.20 – Módulo de iluminação laser. (1) Suporte da lente de expansão frontal; (2) Carcaça externa; (3) Excêntrico externo; (4) Excêntrico interno; (5) Suporte do conector laser; (6) Barra de fixação.

4.2.3 Módulo de sustentação e fixação

O módulo de sustentação e fixação tem a função de sustentar e posicionar, de forma robusta, tanto o módulo de formação e aquisição de imagem como os módulos de iluminação utilizados. O módulo de fixação

é a unidade básica do Colar e pode ser comparado ao elo de uma corrente. Este módulo foi dimensionado para que atendesse todas as configurações de montagem, de acordo com o diâmetro da tubulação inspecionada (6", 8" e 10").

A base desta estrutura foi projetada para ter apenas três pontos de apoio na tubulação, a fim de se obter uma maior estabilidade no acoplamento. Para compensar a variação de diâmetro das tubulações, utilizou-se o conceito de dois pontos fixos e um ajustável. Um estudo geométrico auxiliou a definição dos três pontos de apoio e dos pivôs de conexão entre os elos da estrutura do Colar. O espaçamento entre os apoios fixos foi ajustado em 110 mm, com ângulo de 60° entre eles. Já o posicionamento dos pivôs foi determinado pelo encontro dos ângulos (relativos à quantidade de elos definida para cada tubulação), resultando na distância de 173 mm entre pivôs, e na altura de 23 mm dos pivôs em relação aos pontos de apoio, conforme Figura 4.21.

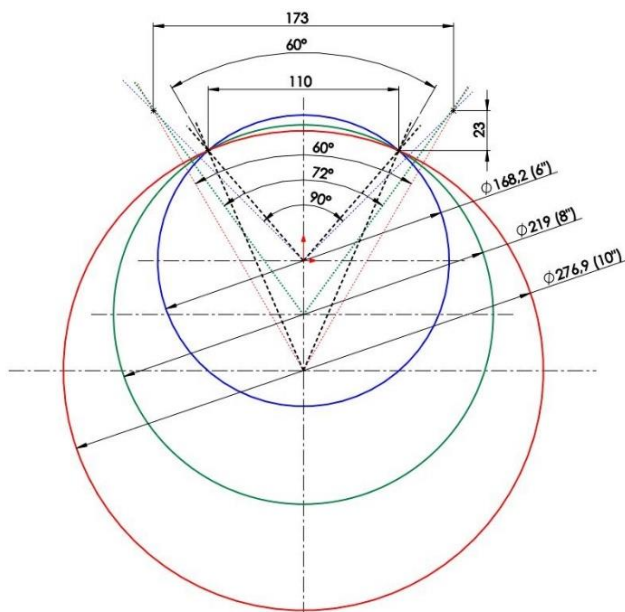


Figura 4.21 – Estudo geométrico dos pontos de apoio e dos pivôs da estrutura de sustentação e fixação do sistema de *shearografia*.

De posse destes valores e daqueles determinados no dimensionamento dos módulos óptico e de iluminação, o projeto mecânico foi desenvolvido. Optou-se pela utilização de chapas metálicas

dobradas na estrutura dos elos, devido à disponibilidade, baixo custo de fabricação, simplicidade construtiva, possibilidade de desmontagem para facilitar o transporte do sistema, além da alta relação rigidez/massa com a utilização de uma geometria espacial adequada.

A configuração da estrutura foi baseada em uma forma prismática que priorizasse os requisitos de projeto: robustez, funcionalidade, compactação e operacionalidade. Alívios de massa nas chapas produziram uma estrutura treliçada mais leve. A Figura 4.22 ilustra o projeto mecânico desenvolvido, com alguns elementos funcionais especificados.

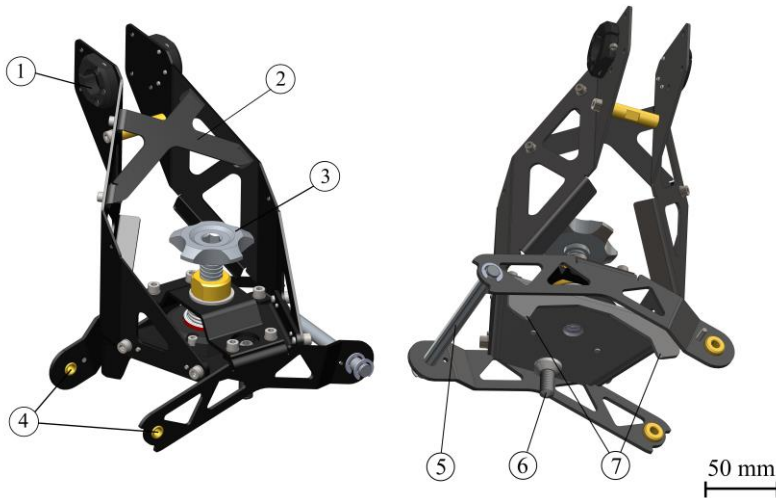


Figura 4.22 – Estrutura de sustentação e fixação. (1) Suporte do módulo de iluminação; (2) Placa tensionadora; (3) Manopla para ajuste/aperto do Colar ao corpo da tubulação; (4) Buchas dos pivôs; (5) Eixo para fechamento da estrutura; (6) Apoio ajustável; (7) Apoios fixos.

A fim de desacoplar as funções de fixação e sustentação, a estrutura foi dividida em dois submódulos, interligados entre si por uma junta esférica responsável pela natural acomodação dos apoios na superfície de medição. O eixo de aplicação do carregamento mecânico produzido pela manopla foi orientado para coincidir com o baricentro dos três pontos de apoio da base, maximizando a estabilidade do sistema. Os dois submódulos funcionais estão representados na Figura 4.23. Este carregamento serve para sujeitar rigidamente o Colar em torno da tubulação sob análise.

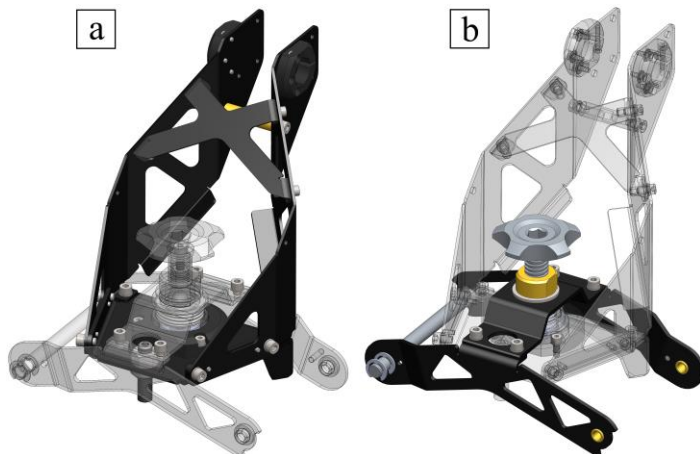


Figura 4.23 – Submódulos funcionais: (a) de sustentação; (b) de fixação.

Para promover uma maior adaptabilidade do Colar nas tubulações, um mecanismo de avanço foi desenvolvido. Através dele, uma faixa de diâmetros é atendida em cada configuração do Colar, conforme apresentado na Tabela 4.3. O dispositivo é composto por um fuso de perfil quadrado acoplado a uma manopla. A manipulação desse mecanismo produz um movimento relativo entre os submódulos de sustentação e fixação, conforme ilustrado na Figura 4.24. Seu funcionamento é explicado a seguir.

A manopla (1) é conectada ao submódulo de sustentação através de uma junta esférica (2). Desse modo, o mecanismo promove o avanço do submódulo de sustentação sem transmitir rotação ao mesmo. Uma mola helicoidal de compressão (3) foi projetada para produzir uma pré-carga de estabilização entre os submódulos [47]. Desta forma, a aproximação e acomodação entre o submódulo de sustentação e a superfície da tubulação torna-se mais suave, minimizando a ocorrência de impactos indesejados e facilitando a sua montagem durante a operação em campo.

Tabela 4.3 – Faixa de adaptação da estrutura do Colar.

	Dmin [mm]	Dmax [mm]	ΔD [mm]
6" (167,2 mm)	154	176	22
8" (219,8 mm)	208	232	24
10" (276,9 mm)	264	289	25

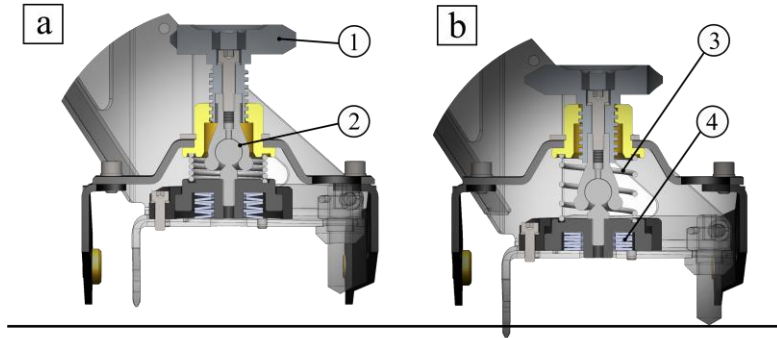


Figura 4.24 – Sistema de ajuste e fixação. (a) Sistema retraído, com mola helicoidal (3) comprimida e molas prato (4) relaxadas; (b) Sistema avançado, com mola helicoidal (3) relaxada e molas prato (4) comprimidas.

O mecanismo de fixação dispõe ainda de um dispositivo de limitação da força, que permite avaliar o aperto imposto ao elo do Colar, de modo que o mesmo não ultrapasse de forma excessiva o esforço mínimo necessário para fixar o Colar de modo rígido, sem causar danos à superfície da tubulação a ser inspecionada. Um aperto demasiado pode também comprometer a estrutura do sistema. O controle da força de aperto é realizado por um conjunto de molas prato (4), conforme mostrado na Figura 4.24.

O componente mecânico onde as molas estão alojadas foi dimensionado para restringir a deformação máxima destas, ficando, portanto, o regime de trabalho restrito a região elástica do material das molas. Após o deslocamento máximo permitido, o alojamento entra em contato com a superfície da chapa de apoio, eliminando o efeito elástico intermediário provocado pelas molas entre os submódulos (Figura 4.24b).

Em um primeiro momento, o deslocamento produzido pelo giro da manopla promove apenas a aproximação do submódulo de sustentação à tubulação, até que os três pontos de apoio da estrutura entrem em contato com a superfície da tubulação. Após isso, a continuação do giro da manopla promove um deslocamento extra que comprime as molas prato, impondo uma força de afastamento entre os submódulo do elo. Consequentemente, a força gerada pelas molas prato também empurra os apoios do submódulo de sustentação contra a superfície da tubulação, o que fixa rigidamente o Colar à tubulação.

O conjunto de molas prato foi dimensionado para promover uma carga mínima de 500N na estrutura e uma faixa vermelha localizada na lateral do disco apoiado sobre as molas permite monitorar seu valor.

Conforme as molas são deformadas, a faixa vermelha torna-se menos visível, e o indicativo de que a força mínima de fixação foi atingida é feito pelo desaparecimento total dessa faixa, conforme ilustrado na Figura 4.25. Portanto, o desaparecimento da faixa vermelha indica que o sistema está fixado de forma segura à estrutura a ser inspecionada.

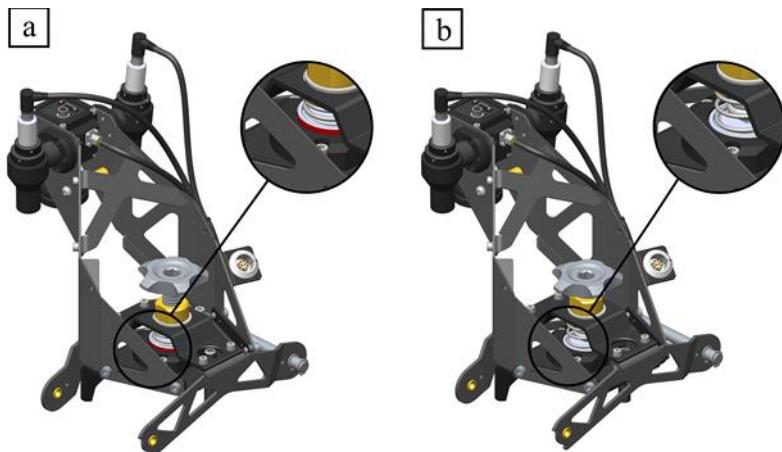


Figura 4.25 – Indicador de carregamento do sistema. (a) Sem carregamento; (b) Carga mínima atingida.

4.2.4 Integração dos módulos

O Colar é um sistema de inspeção modular formado pela união de múltiplos sensores de *shearografia*. Cada elo do Colar é um sensor independente, composto pelos três módulos desenvolvidos. Os sensores são unidos através de pequenos eixos, e os módulos das extremidades possuem um sistema de encaixe que permite o fechamento desta estrutura ao redor da tubulação de forma rápida e segura. Para possibilitar a adaptação entre os diferentes diâmetros, inclui-se novos módulos nas posições intermediárias, mantendo sempre os das extremidades. Um único operador é necessário para executar a montagem do sistema na tubulação.

A Figura 4.26 mostra como é realizada a fixação do Colar com quatro sensores em tubulações de diâmetro nominal de 6". Medições com apenas um sensor podem ser realizadas com a fixação do sistema por meio de uma cinta de carga, conforme mostra a Figura 4.27. Tanto o sistema de inspeção difrativo como o $4f$ podem ser montados sobre tripés, conforme apresentado na Figura 4.28.

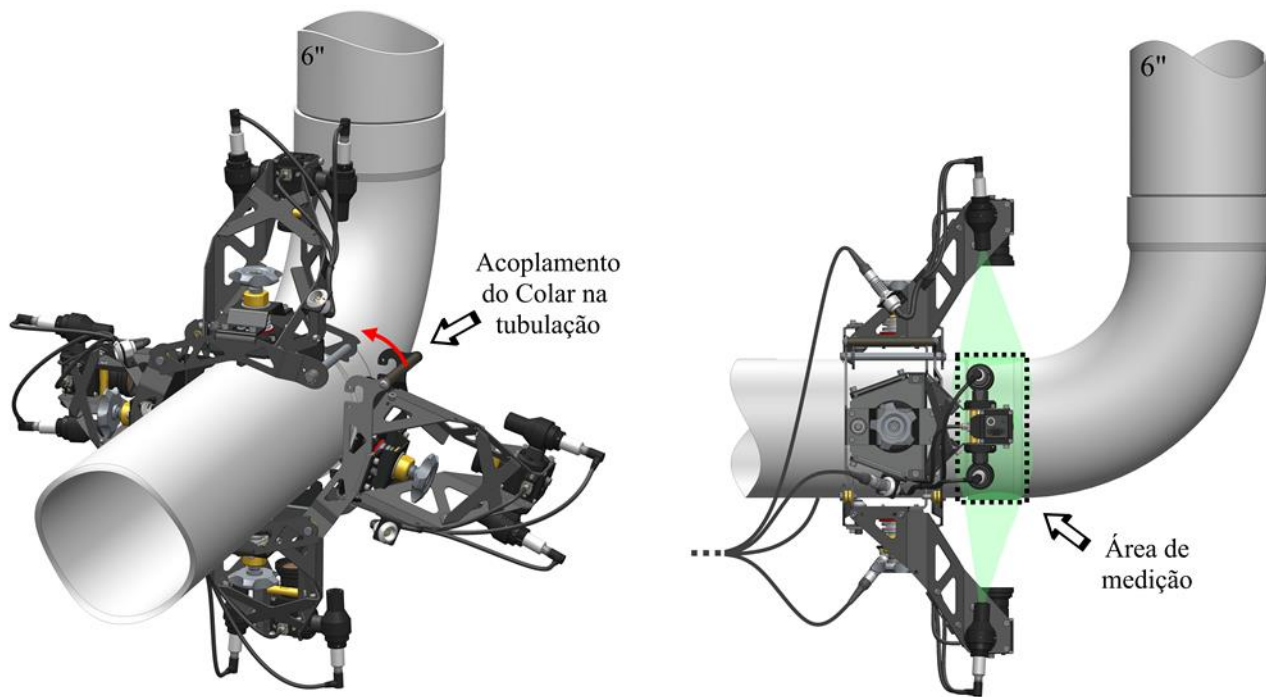


Figura 4.26 – Acoplamento do Colar em uma tubulação de 6" de diâmetro.

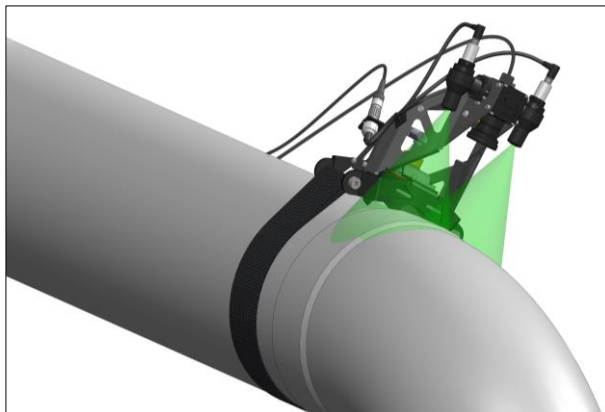


Figura 4.27 – Acoplamento de um único sensor em uma tubulação de 6” de diâmetro.

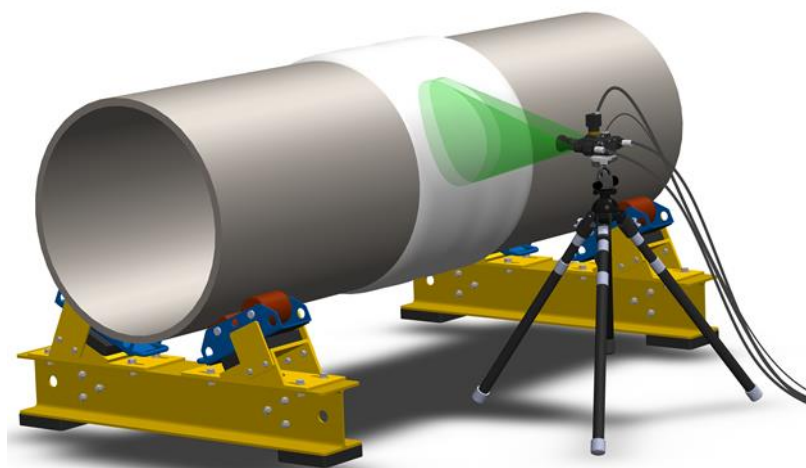


Figura 4.28 – Montagem do sistema de inspeção 4f com tripé.

Os sistemas desenvolvidos obtiveram reduções significativas de massa e volume em relação ao sistema precursor (Michelson modificado) do projeto SHIC. A Tabela 4.4 mostra os valores correspondentes a cada sistema. A redução de massa do sistema difrativo foi a mais expressiva, cerca de 90%. A compactação deste sistema também foi a mais relevante, em torno de 65%. A Figura 4.29 ilustra a significativa diferença de volume entre os sistemas Difrativo e Michelson modificado.

Tabela 4.4 – Valores comparativos entre os sistemas de inspeção de shearografia do projeto SHIC

	Sistemas de inspeção de <i>shearografia</i>		
	Michelson modificado	4f	Difrativo
Massa (kg)	25,0	3,0	2,45
Volume (mm ³)	300x300x400	210x215x315	210x215x270

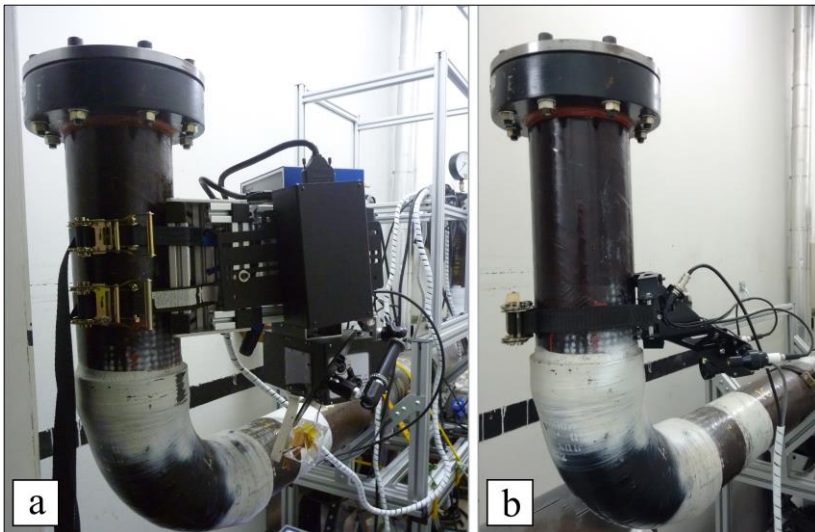


Figura 4.29 – Comparação volumétrica entre os sistemas de *shearografia* do projeto SHIC. (a) Sistema de inspeção precursor, baseado no interferômetro de Michelson modificado; (b) Sistema de inspeção difrativo.

5 CALIBRAÇÃO E AJUSTES

5.1 DESLOCAMENTO DE FASE

A aplicação de passos não uniformes no deslocamento de fase é uma importante fonte de erros em uma medição de interferometria. Portanto, a calibração do dispositivo promotor do deslocamento torna-se imprescindível. Ambos os sistemas de inspeção, difrativo e $4f$, utilizam um atuador piezoelétrico para produzir o deslocamento de fase. Dentre as características que este atuador possui pode-se citar: resolução subnanométrica de posicionamento, alta velocidade de resposta e tamanho reduzido.

O efeito piezoelétrico é uma interação eletromecânica que produz dilatação ou compressão em um material piezoelétrico, na conversão de energia do campo elétrico para o mecânico [48]. A alimentação em tensão produz uma microdeformação controlada do cristal piezoelétrico e a expansão ou contração do PZT é relativa à polaridade da tensão de alimentação.

Os procedimentos de calibração de cada sistema estão descritos a seguir.

5.1.1 Calibração do PZT do sistema de inspeção $4f$

Como o sistema de inspeção $4f$ é baseado no interferômetro de Michelson, a calibração do PZT é realizada diretamente pelo sistema, não sendo necessários equipamentos adicionais. O controle do deslocamento de fase do sistema é realizado através da conexão de um dos espelhos do interferômetro ao cristal piezoelétrico. A mudança do comprimento de um dos braços do interferômetro produz uma variação da intensidade produzida pela superposição dos feixes de luz coerente, e desta forma a variação da fase relativa.

O procedimento de calibração consiste em variar a tensão do PZT de forma gradual e controlada por toda a sua faixa de alimentação, o que promove, concomitantemente, a movimentação de um dos espelhos do interferômetro. Por meio de um *software*, a média das intensidades luminosas de uma região de interesse (ROI) na imagem é monitorada, enquanto pequenos incrementos na tensão de alimentação do PZT são aplicados até que toda faixa positiva de alimentação seja varrida. Obtém-se, assim, uma curva senoidal onde cada período de 2π rad é relativo a um deslocamento de meio comprimento de onda ($\lambda/2$) do laser utilizado.

Para obter a curva tensão-intensidade luminosa, utilizou-se o *software* para inspeções com *shearografia* denominado SILICCOM, criado pela equipe de desenvolvimento de *softwares* do projeto SHIC – *Shearografia* para a Inspeção de Compósitos do LABMETRO/UFSC.

Dois diferentes métodos de calibração estão disponíveis neste *software*. Um deles é o método simplificado, onde, após executada a varredura de toda a faixa de tensão do PZT, apenas um período é selecionado na curva, conforme ilustrado na Figura 5.1. Obtêm-se nesse procedimento os valores, inicial e final, de tensão relativos ao deslocamento de fase de 2π rad. De acordo com o algoritmo para determinar a fase utilizado, os valores de tensão intermediários são definidos. No caso do algoritmo de cinco-passos, três pontos equidistantes de tensão são utilizados, relativos a uma variação de π rad na fase. Após essa calibração, o sistema de *shearografia* fica condicionado a medir apenas na região calibrada do PZT, onde um mapa de fases é obtido em cada aquisição.

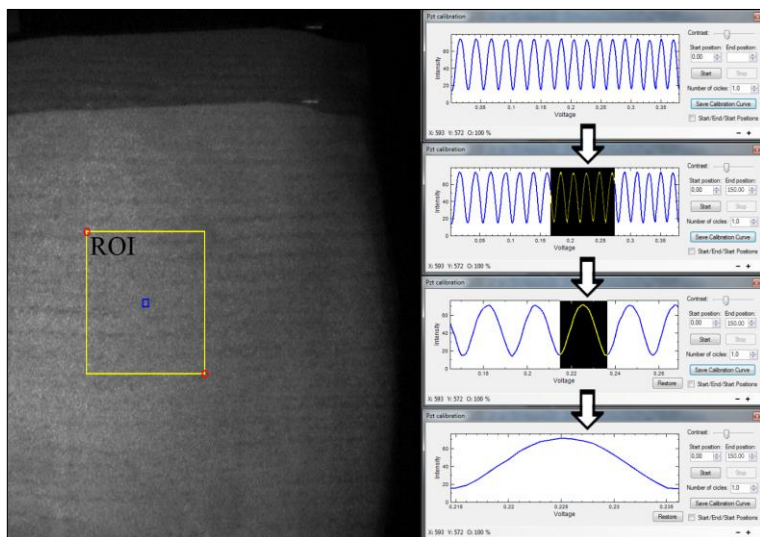


Figura 5.1 – Procedimento de calibração do PZT do sistema de inspeção 4f.

No segundo método de calibração, a curva tensão-intensidade luminosa em toda faixa positiva de alimentação do PZT é obtida, onde apenas a região de expansão do PZT (deslocamento positivo) é utilizada. Através da identificação dos picos e vales desta curva, relativos a um

deslocamento de um quarto do comprimento de onda do laser ($\lambda/4$), a curva de calibração do PZT pode ser determinada, conforme mostra a Figura 5.2. A grande vantagem deste método é a possibilidade de obter uma aquisição contínua de mapas de fase ao longo do curso do PZT, e não somente em uma faixa restrita, como no método de calibração anterior.

Para obter a curva mostrada na Figura 5.2, a varredura da faixa de tensão foi repetida doze vezes. O cálculo da repetibilidade foi feito para uma probabilidade de 95,45%. O coeficiente t de *Student* utilizado foi 2,255.

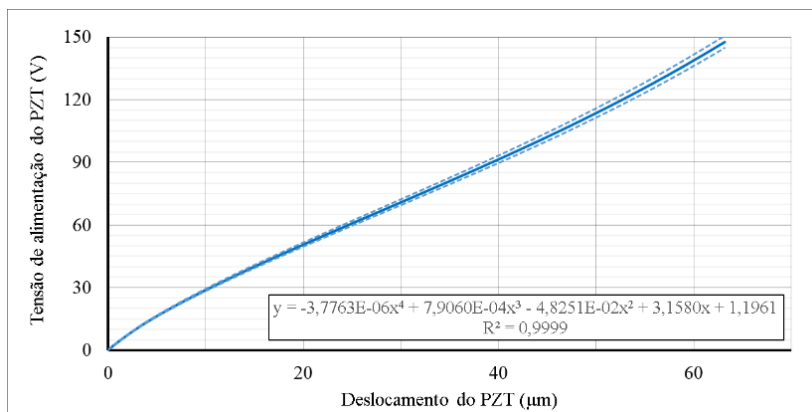


Figura 5.2 – Curva de calibração do PZT, do sistema 4f, com a repetibilidade obtida nas medições com nível de confiança de 95,45%.

Uma calibração periódica deve ser realizada para verificar a deriva temporal deste transdutor. O procedimento de calibração foi feito após um período de dois meses e não apresentou variações significativas na curva de calibração, as quais permaneceram dentro da faixa de incerteza de medição calculada. Com o histórico de calibrações, esse período pode ser aumentado gradativamente.

5.1.2 Calibração do PZT do sistema de inspeção difrativo

O deslocamento de fase neste sistema é obtido pelo movimento lateral da grade difrativa em um valor proporcional ao passo da grade (Λ). Desta forma, o deslocamento de fase de 2π rad é obtido pelo movimento lateral relativo a meio passo ($\Lambda/2$) nas grades +1-1 e um passo (Λ) nas grades 0+1. Neste experimento, utilizou-se um interferômetro de

Michelson para aumentar a sensibilidade de calibração do PZT, como mostra a Figura 5.3.

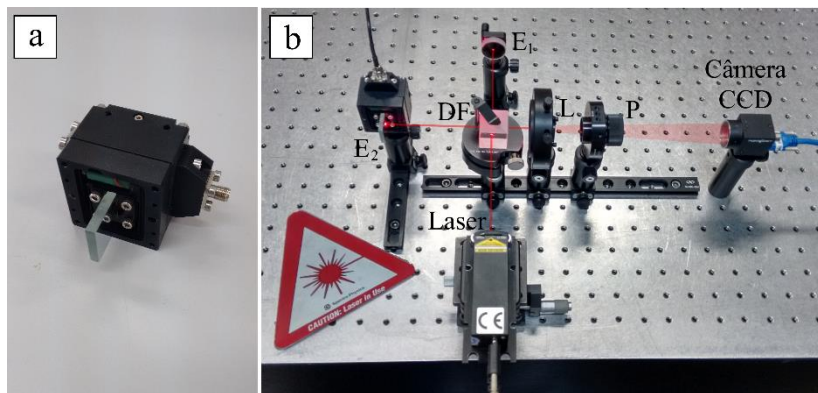


Figura 5.3 – Bancada para calibração do PZT do sistema com grade difrativa. (a) Espelho de calibração fixo ao suporte da grade difrativa; (b) Montagem com Interferômetro de Michelson.

Para monitorar o deslocamento do PZT, um espelho de primeira superfície E_2 foi fixado ao suporte da grade difrativa, com a face espelhada disposta perpendicularmente à orientação do seu deslocamento. Este conjunto foi inserido em um dos braços do interferômetro de Michelson. A sobreposição dos feixes provindos de E_1 e E_2 produz franjas de interferência no sensor da câmera CCD. A lente L promove a expansão dos feixes para que toda a área do sensor da câmera seja iluminada e o polarizador P controla a intensidade luminosa para não haver saturação do CCD. Uma pequena inclinação entre os feixes gera o padrão senoidal de franjas paralelas e que será utilizado na calibração do movimento do PZT. O movimento do espelho E_2 produz o deslocamento deste padrão sobre o CCD, onde a variação de 2π rad nas franjas é equivalente ao deslocamento do PZT relativo a meio comprimento de onda do laser ($\lambda/2$).

Através do *software* SILICCOM, a intensidade luminosa de uma ROI selecionada na imagem foi monitorada e registrada. Simultaneamente, a tensão de alimentação do PZT foi variada em pequenos incrementos, em toda a faixa positiva de alimentação do PZT, compreendida entre (0 e 150) V. Obteve-se assim os gráficos que correlacionam os valores de intensidade luminosa com os de alimentação do PZT, conforme mostra os itens (a) e (b) da Figura 5.4.

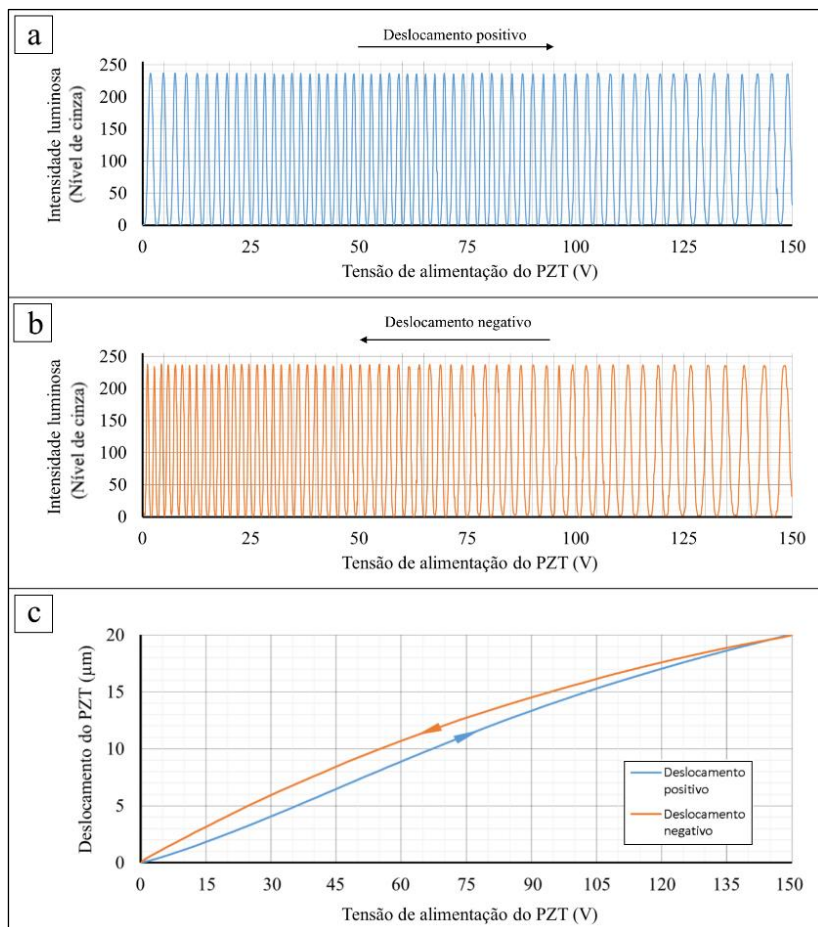


Figura 5.4 – Procedimento de obtenção da curva tensão x deslocamento do PZT.

A curva tensão x deslocamento do PZT foi obtida pela correlação dos seus picos e vales com incrementos relativos a $1/4$ do comprimento de onda do laser vermelho utilizado ($\lambda=660$ nm), ou seja, para cada espaçamento entre picos e vales foi atribuído o valor de 165 nm. O ítem (c) da Figura 5.4 mostra a curva de histerese do PZT. A medição também foi repetida doze vezes. Novamente, o cálculo da repetibilidade foi feito para uma probabilidade de 95,45% e o coeficiente t de *Student* utilizado foi 2,255.

Utilizou-se apenas a região de expansão do PZT (deslocamento positivo) para gerar a curva de calibração, conforme mostra a Figura 5.5. Deste modo, os deslocamentos de fase do sistema difrativo devem ocorrer apenas no sentido progressivo da curva.

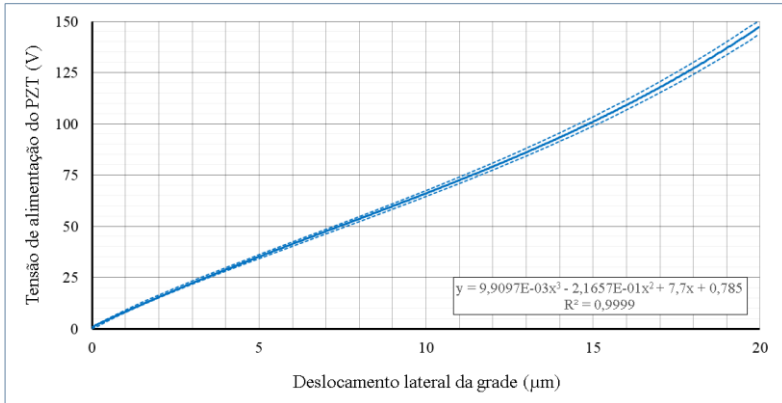


Figura 5.5 – Curva de calibração do PZT, do sistema difrativo, com a repetibilidade obtida nas medições com nível de confiança de 95,45%.

5.2 AJUSTE ÓPTICO DOS CABEÇOTES DIFRATIVO E $4f$

O ajuste dos parâmetros ópticos (foco e f -number) dos cabeçotes é fundamental para a obtenção de interferogramas de boa qualidade. Como as distâncias entre os módulos de formação e aquisição de imagem e a superfície de medição são predefinidas pelos módulos de sustentação e fixação, o ajuste do foco pôde ser realizado preliminarmente. Assim sendo, não é necessário um ajuste antes de cada inspeção.

Cada um dos módulos de formação e aquisição de imagem, difrativo e $4f$, tem seu procedimento específico de ajuste de foco. O princípio utilizado para a produção do deslocamento lateral das imagens, característico de uma medição de *shearografia*, é o fator que delimita o procedimento de ajuste. No caso do módulo de formação de imagem $4f$, o deslocamento lateral é variável. Dessa forma, é possível eliminar o deslocamento lateral através da sobreposição das duas imagens, o que facilita o ajuste de foco do sistema e nenhum aparato especial é necessário. Por outro lado, o deslocamento lateral do sistema difrativo é fixo e a imagem observada é sempre duplicada, o que dificulta o ajuste de foco pelo excesso de detalhes.

Alguns dos valores obtidos nos cálculos da seção 4.2.1.1 (z_0 , D_p , D_d) foram reproduzidos numa bancada para auxiliar o ajuste fino do foco. Para facilitar este procedimento utilizou-se uma fina linha laser projetada em um anteparo opaco. Como o índice de refração de um meio depende da frequência da luz [22][49], utilizou-se um laser de mesmo comprimento de onda do empregado no módulo de iluminação, para que o efeito da dispersão cromática não afetasse o ajuste do foco. A linha foi produzida pela incidência de um laser verde em uma lente específica. A Figura 5.6 apresenta a configuração da bancada utilizada nesse procedimento.

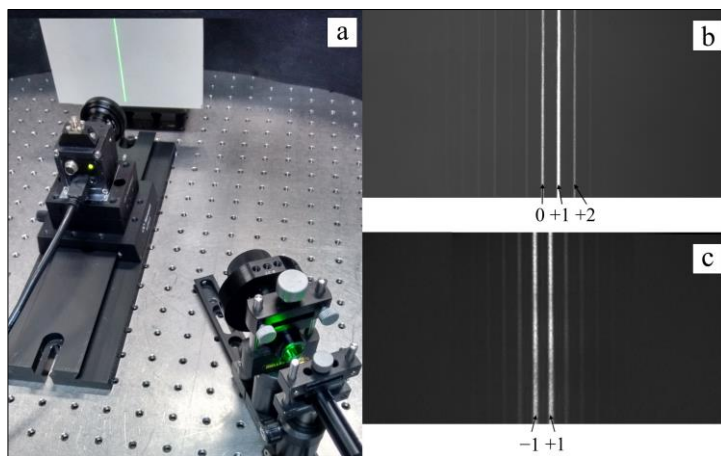


Figura 5.6 – Bancada para ajuste óptico dos sistemas. (a) Projeção de uma linha laser no plano objeto. (b) Imagem obtida pelo sistema com grade difrativa 0+1; (c) Imagem obtida pelo sistema com a grade difrativa -1+1.

Os cabeçotes foram posicionados a uma distância de 130mm do anteparo para reproduzir a distância s_0 de projeto. Com a íris da lente objetiva totalmente aberta ($f/2,4$) o foco foi ajustado para obter uma imagem nítida da linha laser. Após isso, conforme cálculos preliminares, a abertura da íris foi pré-ajustada em $f/7$, a fim de se obter o granulado óptico (*speckle*) com tamanho equivalente ao do pixel. Em seguida, os cabeçotes foram aproximados e afastados do anteparo para avaliar a profundidade de campo dos sistemas, a qual se mostrou adequada à aplicação, pois estava de acordo com a profundidade de campo calculada anteriormente. Também foi possível avaliar o tamanho dos deslocamentos laterais obtidos pelas grades difrativas 0+1 e -1+1, os quais ficaram próximos de 7,5 mm e 3,5 mm, respectivamente.

6 AVALIAÇÃO DO SISTEMA

Alguns experimentos foram planejados e executados para permitir a avaliação de cada um dos módulos funcionais desenvolvidos. A avaliação de cada um deles é apresentada nos tópicos seguintes.

6.1 MÓDULO DE ILUMINAÇÃO

Duas avaliações foram realizadas com o módulo de iluminação. A primeira delas em bancada e a segunda através de uma simulação numérica. Ambas estão descritas a seguir.

6.1.1 Influência térmica no desempenho do laser

Para analisar a influência da temperatura no desempenho operacional do módulo de iluminação laser, uma bancada experimental foi montada. Utilizou-se para tanto uma estufa com controle de temperatura, composta por uma seção tubular de alumínio e aquecida externamente por uma resistência elétrica de mica, do tipo coleira.

O ajuste de temperatura da estufa foi feito pelo controlador programável GEFAN 400. Através de um controle proporcional integral derivativo (PID), um interruptor eletromecânico (relé de estado sólido) comutava a alimentação da resistência elétrica instalada ao redor do tubo, a fim de produzir uma temperatura pré-definida. Esta temperatura foi medida por um termopar tipo T, cobre-constantan, instalado na superfície interna do tubo. O aquecimento gerado na parede do tubo era transmitido por convecção ao seu interior, criando assim a atmosfera com temperatura controlada necessária para os testes com o módulo de iluminação.

Inicialmente, o módulo laser foi inserido no interior da tubulação. Dois termopares adicionais, interligados a um módulo de aquisição I/O ADAM-6018 da marca Advantech, monitoravam as temperaturas ambiente e do laser. O módulo de aquisição foi interligado ao computador por uma conexão Ethernet e os dados foram adquiridos automaticamente por um *software* da própria Advantech. Os dois termopares foram previamente calibrados em banho termostático, por comparação com instrumento padrão, conforme mostra a Figura 6.1.

Um pequeno orifício permitiu a passagem do feixe de laser pela tampa da estufa, o qual incidiu diretamente no sensor de potência luminosa PowerMax PM-10, da marca Coherent. As leituras de potência luminosa do laser também foram realizadas de maneira automatizada através do medidor FieldMax II, também da marca Coherent, conectado

a uma porta USB do computador. A Figura 6.2 mostra a bancada utilizada e apresenta o esquema de ligação empregado no experimento.

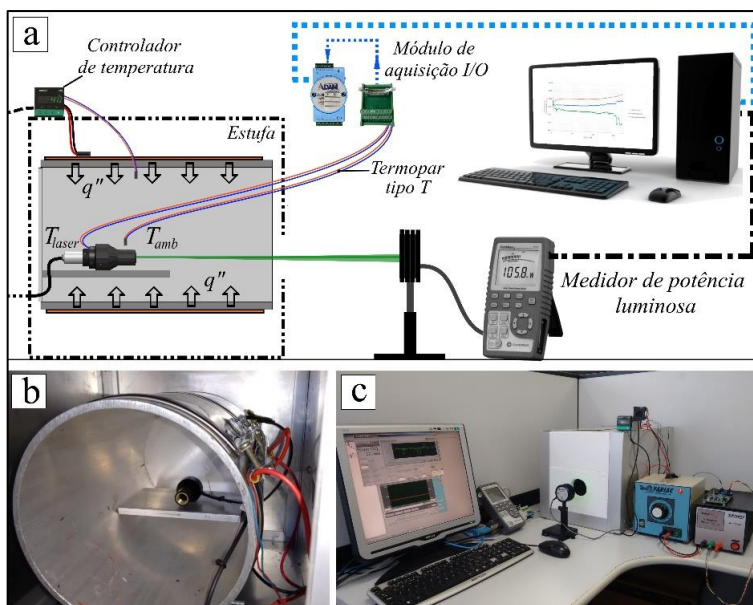
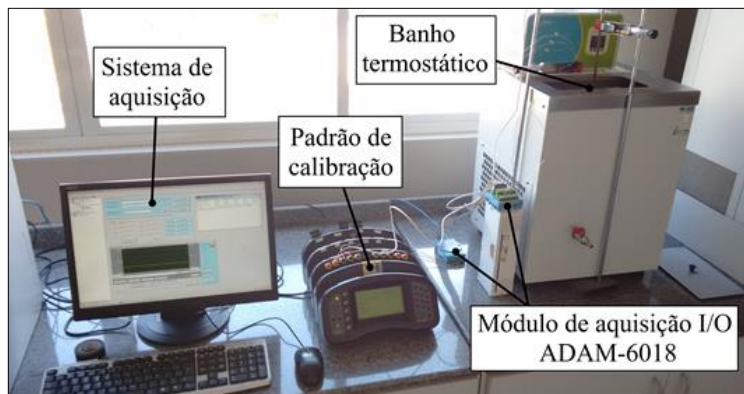


Figura 6.2 – Bancada para avaliação da influência térmica no desempenho do módulo de iluminação. (a) Esquema de ligação da bancada; (b) Laser localizado no interior do tubo, com resistência elétrica tipo coleira para aquecimento; (c) Disposição física da bancada.

A primeira avaliação da potência luminosa do laser foi realizada na temperatura ambiente de 18 °C. Após um período de 1 hora a temperatura do laser estabilizou-se em 23 °C, e o valor de potência registrado foi de 70 ± 2 mW.

Após essa etapa, a temperatura ambiente (no interior da estufa) foi controlada indiretamente pelo ajuste da temperatura da superfície do tubo de alumínio, pré-definida em 36 °C no controlador. Após um período de aproximadamente 1 hora, a temperatura ambiente estabilizou-se em 23 °C.

Na sequência, iniciou-se a aquisição dos dados de potência luminosa, temperatura ambiente e temperatura do laser, nos respectivos *softwares*, com taxa de amostragem de uma aquisição por segundo. Em seguida o laser foi acionado e as curvas foram monitoradas. A Figura 6.3 apresenta os gráficos obtidos em dois experimentos, onde dois módulos de iluminação foram avaliados.

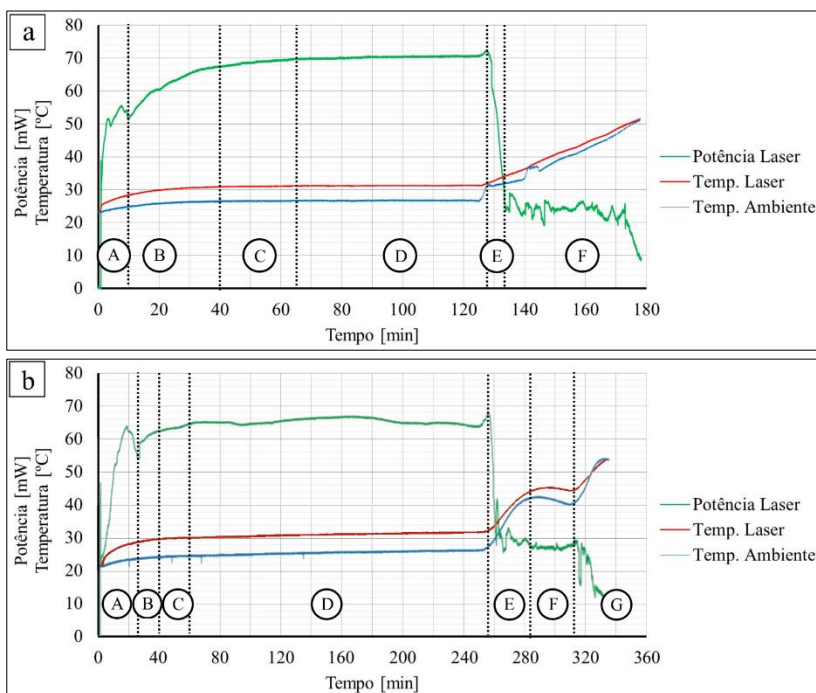


Figura 6.3 – Gráficos de avaliação da influência térmica na potência do laser. Tempos de análise: (a) 180 min; (b) 335 min.

No primeiro deles, Figura 6.3 (a), seis comportamentos distintos foram identificados. Na região A, o laser apresentou instabilidade luminosa, com oscilação aleatória de sua potência. Na região B, as variações de temperatura foram menos expressivas e a potência luminosa aumentou de forma mais comportada.

A temperatura do laser estabilizou-se em 32 °C, após um período de 40 min. Já a temperatura ambiente, neste mesmo intervalo de tempo, sofreu um pequeno acréscimo devido à dissipação do calor gerado pelo próprio laser e estabilizou-se em aproximadamente 26 °C. Portanto, a diferença de temperatura entre o laser e o ambiente foi de 6 °C.

Na região C não ocorreram mudanças de temperatura, mas percebeu-se um pequeno acréscimo na potência do laser, a qual se estabilizou em 70 ± 2 mW.

Na região D, o laser se manteve estável, tanto na temperatura como na intensidade luminosa emitida, por um período de uma hora. Um aumento proposital na temperatura ambiente produziu um acréscimo na temperatura do laser, o que gerou um decaimento abrupto na potência, representado na região E. Após isso, o laser apresentou um comportamento instável, onde a potência oscilou de forma aleatória em torno de 25 ± 1 mW, representado na região F.

O segundo experimento diferiu no tempo de análise e no controle da temperatura ambiente. O laser se comportou de forma estável por um período de pouco mais de três horas, região D. Quando submetido a uma variação acentuada de temperatura, região E, apresentou a mesma instabilidade já identificada no primeiro experimento, porém, na região onde a variação de temperatura era menos expressiva, região F, a variabilidade da intensidade do laser foi menor. Observou-se, portanto, que a instabilidade percebida na potência do laser é mais sensível às variações acentuadas de temperatura, e não à magnitude dela, a qual tem relação apenas com a potência transmitida.

Para avaliar esta consideração, um novo experimento foi preparado, e seu resultado está apresentado na Figura 6.4. Neste experimento, a temperatura ambiente inicial foi aumentada e mantida em 32 °C. Nesta condição, o laser estabilizou-se termicamente em 40,5 °C, após um período de 30 min, com potência luminosa de 27 ± 1 mW (início da Faixa B). Em seguida, aumentou-se a temperatura ambiente, de forma gradual, até o valor de 38 °C, em um período de 150 min (final da Faixa B), e a resposta na potência luminosa foi um pequeno decréscimo no seu valor. Posteriormente, como esperado, uma variação brusca na temperatura ambiente voltou a produzir uma grande instabilidade do laser.

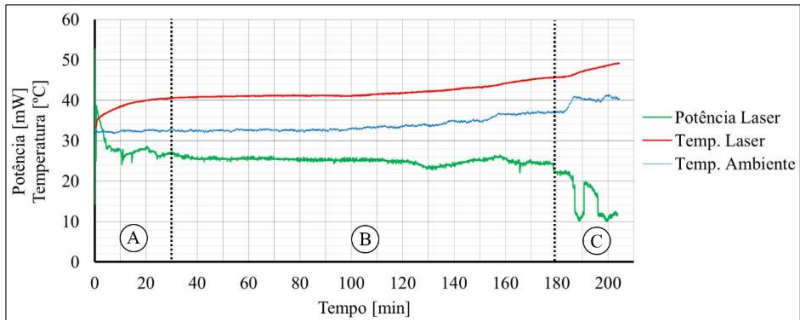


Figura 6.4 – Gráfico de avaliação da influência térmica na potência do laser com temperatura acentuada.

Portanto, com base nos experimentos realizados, deve-se criar meios para evitar as variações acentuadas de temperatura no instante da medição, para que a potência do laser não sofra variações bruscas e se mantenha o mais estável possível. É possível também perceber que quanto maior a temperatura ambiente, menor será a potência luminosa do laser disponível para a inspeção. A Tabela 6.1 apresenta a faixa de temperatura de trabalho onde o laser apresentou melhor estabilidade luminosa, dentro da faixa de temperatura avaliada.

Tabela 6.1– Temperatura de trabalho com melhor estabilidade luminosa do laser, dentro da faixa de temperatura avaliada.

Temperatura de trabalho [°C]		Potência luminosa [mW]
Ambiente	Laser	
18 a 32	23 a 40	70 a 27

6.1.2 Avaliação da condutividade térmica da carcaça do módulo de iluminação

Visto que a temperatura é um fator de grande influência para o laser, a capacidade de dissipação de calor da carcaça do módulo de iluminação foi avaliada através de uma simulação numérica computacional de transferência de calor.

Com base nos resultados obtidos no estudo térmico anterior, alguns parâmetros foram realimentados na simulação para que o estudo ficasse mais fidedigno aos dados reais. A temperatura ambiente utilizada foi de

32 °C, a máxima temperatura de trabalho sugerida no estudo anterior, conforme apresentado na Tabela 6.1.

O resultado da simulação, apresentado na Figura 6.5, mostra que a carcaça de alumínio projetada para o módulo dissipa bem o calor produzido pelo laser diodo. A maior temperatura registrada na superfície do suporte do laser foi próxima de 33 °C. Portanto, alternativas para aumentar a transferência de calor, tais como a utilização de aletas e simples ventoinhas apenas aumentariam a complexidade de fabricação mecânica e não trariam benefícios nesse caso. No entanto, a avaliação térmica anterior mostrou também que as instabilidades de temperatura são indesejáveis para o comportamento do laser. Um sistema de arrefecimento um pouco mais complexo capaz de produzir uma condição térmica estável seria apropriado a esta aplicação, porém, este desenvolvimento não fez parte do escopo deste trabalho.

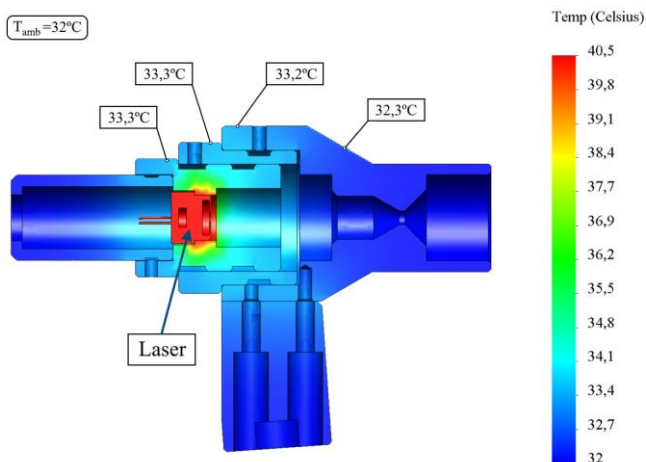


Figura 6.5 – Simulação térmica do módulo de iluminação laser.

6.2 MÓDULO DE SUSTENTAÇÃO E FIXAÇÃO

Uma modelagem vibracional de elementos finitos é uma ferramenta eficaz para prever o comportamento dinâmico de determinadas estruturas. No entanto, devido à complexidade e incerteza existente, é irrealista esperar que um modelo de elementos finitos preliminar do sistema de sustentação e fixação seja fielmente representativo [50]. Uma análise modal experimental pode ser utilizada para compensar esses fatores, onde os dados obtidos no experimento

podem ser realimentados no modelo computacional para produzir resultados mais condizentes com o comportamento real da estrutura. Uma análise modal experimental através de um vibrômetro laser foi realizada para obter as características dinâmicas das estruturas metálicas de sustentação e fixação dos sistemas. Os procedimentos realizados e resultados obtidos são apresentados a seguir.

6.2.1 Análise modal experimental com vibrômetro laser

A análise modal é o processo de determinação das características inerentes da dinâmica de um sistema na forma de frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração. Ela engloba tanto as técnicas teóricas como as experimentais. Em síntese, uma análise modal experimental abrange três fases constituintes: preparação do teste, medição de resposta em frequência e identificação dos parâmetros modais. A preparação do teste envolve a seleção do suporte da estrutura, do tipo de força de excitação, da localização da excitação, do *hardware* para medição da força e da resposta, da determinação do modelo geométrico estrutural (que consiste nos pontos de resposta a serem medidos) e, por fim, a escolha do princípio de medição [50].

Nos experimentos descritos nesta seção, as estruturas de sustentação e fixação de ambos os sistemas, *4f* e difrativo, foram submetidas a uma análise modal com vibrômetro laser. Os experimentos foram realizados nas dependências do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Um vibrômetro laser executa a medição de vibração sem a necessidade de contato com a peça, onde por meio do efeito Doppler, os níveis de vibração de um corpo são medidos. Portanto, não existe influência da massa dos transdutores nas medições. O sistema é composto por um interferômetro que mede, com alta precisão, as diferenças de fase e frequência entre os feixes emitido e recebido. Dessa forma, tanto a velocidade como o deslocamento do objeto podem ser medidos diretamente pelo sistema.

Conforme ilustrado na Figura 6.6, o sistema de inspeção foi montado sobre um segmento de tubo metálico com diâmetro nominal de 6". A excitação do sistema foi realizada através de um *shaker* eletrodinâmico, o qual foi suspenso por um cabo de aço e conectado a uma estrutura metálica a fim de evitar a introdução de restrições físicas durante a excitação.

Este atuador gera movimentos lineares, com amplitudes e frequências definidas pelo sinal elétrico aplicado. Para que o experimento reproduzisse com maior fidelidade uma condição de campo, o *shaker* foi acoplado lateralmente à parede do tubo através de uma haste flexível (*stinger*) interligada a um sensor de força. Com o atuador acoplado desta forma, a força de excitação é transmitida, através do tubo, à estrutura do sistema de *shearografia*.

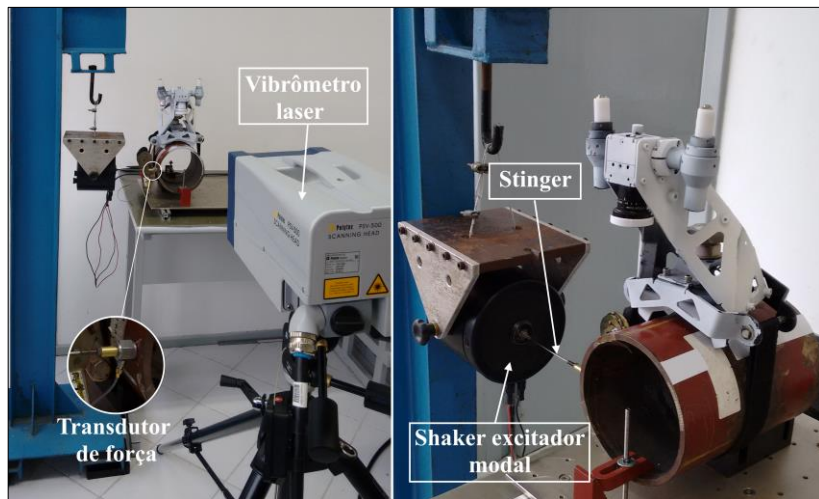


Figura 6.6 –Configuração da bancada para análise modal experimental com vibrômetro laser.

O vibrômetro laser utilizado foi o modelo PSV-500 da empresa Polytec. Como este sensor tem a capacidade de medir em uma dimensão (1-D), duas medições foram realizadas para cada sistema. Uma delas foi executada com o vibrômetro posicionado frontalmente ao sistema de inspeção, e a outra lateralmente, conforme mostra a Figura 6.7. As malhas frontal e lateral, com aproximadamente 400 e 270 pontos, respectivamente, foram cuidadosamente ajustadas sobre as estruturas metálicas. Alguns pontos na superfície do tubo também foram medidos para auxiliar na análise dos resultados.

A Figura 6.8 mostra a análise das formas de deflexão operacional, do inglês *Operating Deflection Shapes* (ODS), da estrutura do sistema de inspeção difrativo, na frequência de 12,5 Hz.

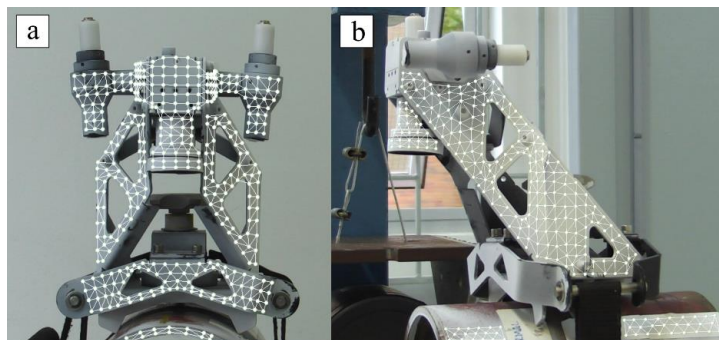


Figura 6.7 –Malha gerada para a análise modal da estrutura metálica na direção frontal (a) e lateral (b) do sistema de inspeção.

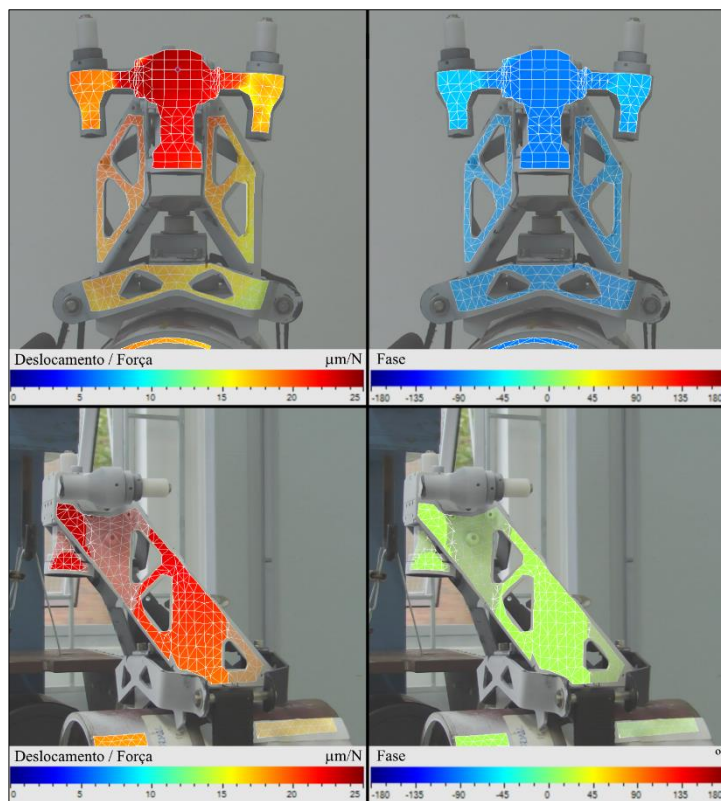


Figura 6.8 –Modo de deflexão operacional da estrutura do sistema de inspeção difrativo na frequência de 12,5 Hz.

Como o módulo de formação e aquisição de imagem difrativo possui massa e volume reduzidos, comparado ao módulo $4f$, e centro de massa mais próximo dos pontos de apoio da base, sua estrutura apresentou melhor performance quando submetida à vibração induzida. As amplitudes de deslocamento registradas para o sistema difrativo foram menores, e os movimentos relativos entre sistema e tubo foram predominantemente em fase, na faixa de frequência de (0 a 100) Hz. A Figura 6.9 apresenta alguns dos modos de vibração da estrutura do sistema difrativo, onde movimentos com defasagem superior a 180° foram observados apenas em frequências acima de 190 Hz.

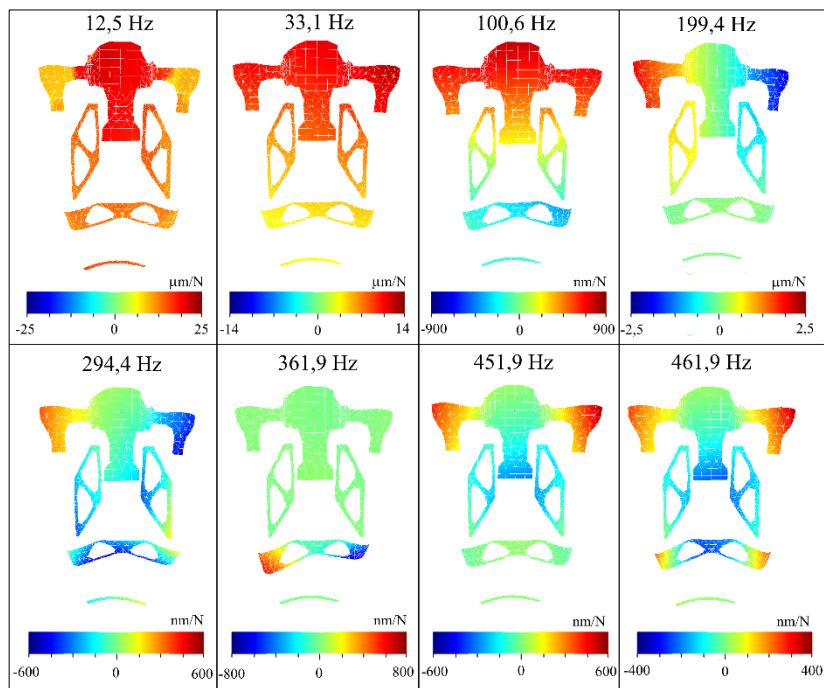


Figura 6.9 – Modos de vibração da estrutura de sustentação e fixação do sistema difrativo, na faixa de frequência de (0 a 500) Hz.

Já a estrutura metálica do sistema $4f$ apresentou um maior número de frequências naturais e de movimentos defasados em toda a faixa de frequência analisada. A Figura 6.10 mostra a análise das formas de deflexão operacional da estrutura do sistema de inspeção $4f$, na frequência de 23,1 Hz.

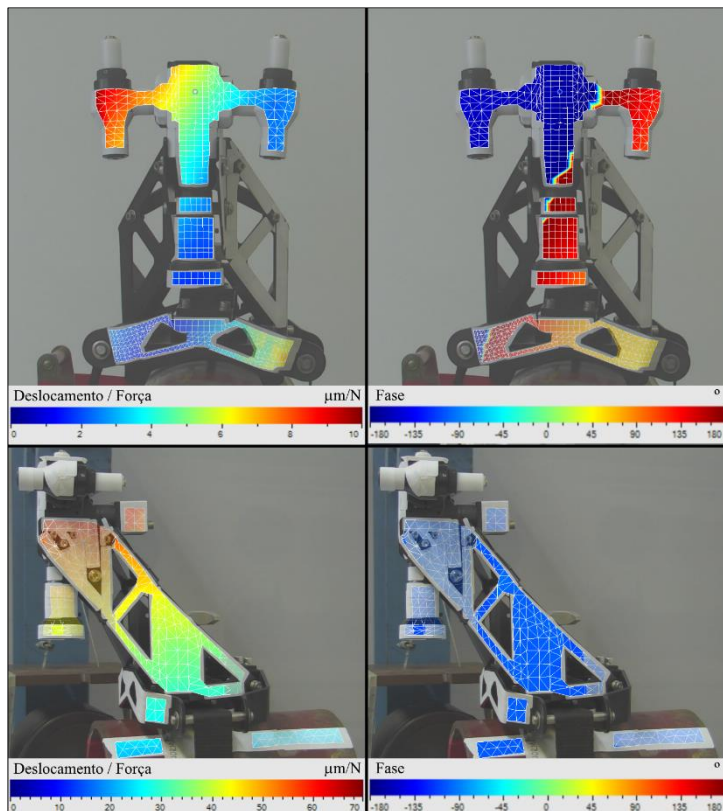


Figura 6.10 – Modo de deflexão operacional da estrutura do sistema de inspeção $4f$ na frequência de 23,1 Hz.

Caso futuramente seja necessário alterar a rigidez da estrutura com acréscimo de massa ou de reforços estruturais, uma análise dos dados obtidos auxiliará na identificação das regiões com menor rigidez, onde o intertravamento da estrutura produzirá ganhos mais expressivos. Os dados coletados também poderão ser utilizados em um reprojeto das estruturas. Neste caso, a realimentação de alguns parâmetros obtidos nessa análise em um modelo de elementos finitos produzirá resultados mais representativos do comportamento real das estruturas.

6.3 MÓDULOS DE FORMAÇÃO E AQUISIÇÃO DE IMAGEM

Os módulos de formação e aquisição de imagem desenvolvidos neste trabalho empregam diferentes mecanismos para obtenção da dupla imagem característica da *shearografia*. Uma variação do interferômetro de Michelson e uma grade difrativa são os mecanismos utilizados, conforme exposto nas seções 3.3.3 e 4.2.1.2. A qualidade dos interferogramas resultantes da inspeção é influenciada por diversos fatores, tais como: qualidade dos elementos ópticos, nível de ruídos (eletrônicos e ópticos), erros de calibração, influência de fatores externos, entre outros. Assim sendo, os dois módulos de formação e aquisição de imagem foram submetidos a análises experimentais a fim de avaliar seus desempenhos operacionais.

6.3.1 Avaliação da grade difrativa

A grade difrativa é o principal elemento utilizado no módulo de formação e aquisição de imagem difrativo. Através dela, obtêm-se tanto o deslocamento lateral da imagem como o deslocamento de fase do padrão de interferência. Duas grades difrativas foram avaliadas para esta aplicação. Ambas maximizam a eficiência em duas de suas ordens difrativas. A primeira grade utilizada é assimétrica, com as maiores eficiências concentradas nas ordens 0 e +1. Essa grade foi utilizada nos testes preliminares de viabilidade do sistema difrativo, descritos na seção 4.2.1.2.2. Posteriormente, uma grade simétrica com alta eficiência nas ordens -1 e +1 foi adquirida e testada.

Pequenas variações na geometria periódica das grades provocam alterações tanto no ângulo de difração como na eficiência das ordens difrativas. Por limitações tecnológicas dos prestadores de serviço de fabricação, raramente consegue-se grades difrativas que atendam as tolerâncias definidas no projeto, em virtude dos erros inerentes ao processo de fabricação [38].

Alguns cálculos analíticos permitem avaliar os efeitos dos erros de fabricação na performance dos elementos ópticos difrativos [51]. Porém, a geometria do padrão periódico da grade deve ser conhecida. Um microscópio eletrônico de varredura (MEV) pode ser utilizado para avaliar esta geometria. Porém, como o material das grades não é condutor elétrico, uma deposição ultrafina de material eletricamente condutivo deve ser realizada na superfície de análise, o que inviabilizaria seu uso no sistema de inspeção após sua passagem pelo MEV.

Optou-se, então, por avaliar o desempenho da grade utilizando outro método de análise. Uma bancada de testes para medir a eficiência das grades foi montada utilizando o sensor de potência luminosa PowerMax PM-10, conforme mostra a Figura 6.11.

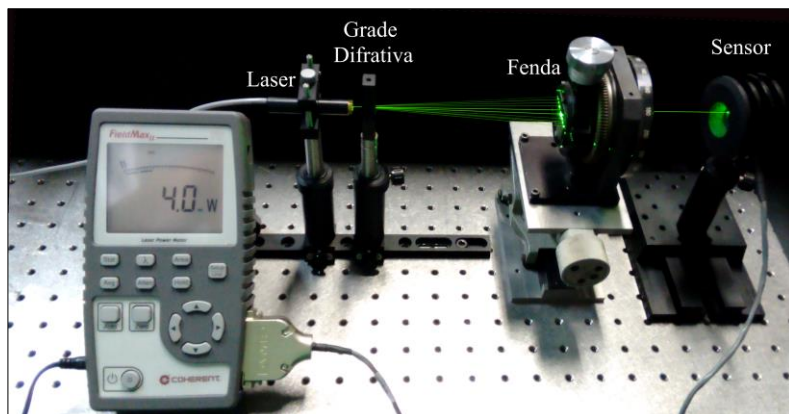


Figura 6.11 – Bancada para avaliação da eficiência das grades difrativas.

Inicialmente, avaliou-se a intensidade luminosa do laser, a qual foi utilizada como referência para o cálculo da eficiência de cada ordem. Em seguida, uma fenda ajustável foi posicionada entre a grade difrativa e o sensor de potência a fim de selecionar o feixe difratado cuja intensidade seria avaliada. A Tabela 6.2 apresenta os resultados obtidos nesta medição.

Tabela 6.2 – Eficiência de cada ordem de difração das grades analisadas.

Ordem de difração	Eficiência (% I_{laser})	
	Grade 0+1	Grade -1+1
-4	<1	<1
-3	<2	3
-2	<1	<1
-1	<2	39
0	29	<1
+1	40	39
+2	9	<1
+3	<1	3
+4	<1	<1

Nota-se que os valores obtidos pela grade $-1+1$ apresentaram uma pequena variação comparados aos valores teóricos da Tabela 3.1. Já a ordem $+2$ da grade $0+1$ apresentou uma eficiência maior que a esperada e, neste caso, a aplicação dessa grade no módulo de formação e aquisição de imagem produz uma interferência tripla, o que degrada a qualidade da imagem.

Com base nos resultados obtidos nas medições de intensidade, as Figura 6.12 e Figura 6.13 apresentam duas simulações, realizadas com o intuito de ajudar o leitor a entender os efeitos das sobreposições das imagens com a utilização de ambas as grades, $0+1$ e $-1+1$, respectivamente, caso fossem utilizadas como dispositivo de deslocamento lateral.

Nestas simulações, é possível notar, além das distâncias dos deslocamentos laterais, os percentuais de intensidade fornecidos por cada ordem de difração. Analisando a interferência produzida pela grade $0+1$ (Figura 6.12), percebe-se a formação de uma tripla imagem relativa as ordens 0 , $+1$ e $+2$.

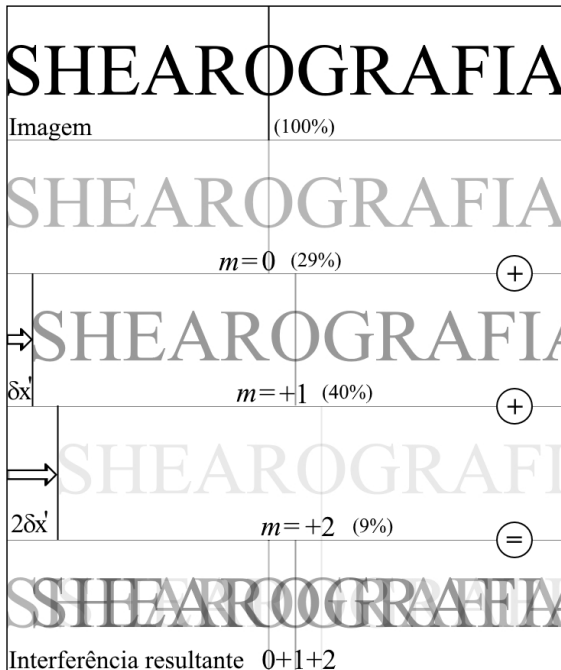


Figura 6.12 – Efeito da sobreposição das imagens geradas pela grade $0+1$.

Já no caso da grade $-1+1$ (Figura 6.13), a interferência predominante é relativa as ordens -1 e $+1$. A contribuição das demais ordens ímpares são irrelevantes pois possuem intensidades muito baixas.

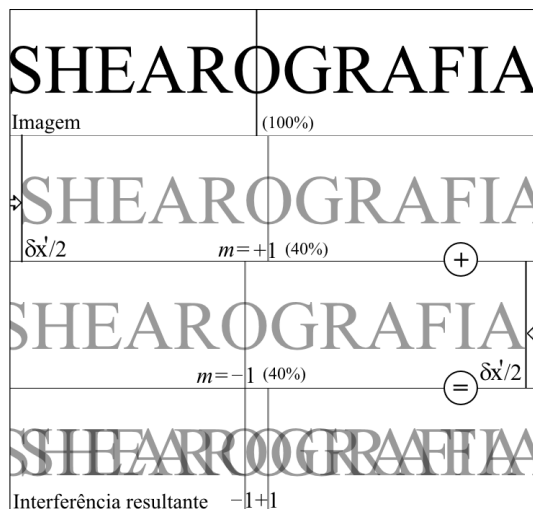


Figura 6.13 – Efeito da sobreposição das imagens geradas pela grade $-1+1$.

Além da medição das intensidades das ordens difrativas, os tamanhos dos passos das grades foram medidos através de uma máquina de medição óptica 3D, conforme mostra a Figura 6.14. Neste procedimento, a distância relativa a dez passos foi medida em cada grade, reduzindo assim a incerteza do valor médio do passo. Os valores medidos foram alimentados na curva de calibração do PZT obtida na seção 5.1.2, e assim, as tensões de alimentação do PZT, relativas aos passos dos deslocamentos de fase, foram definidas.

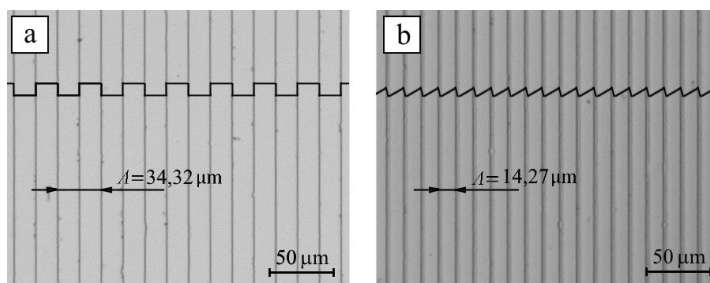


Figura 6.14 – Medição dos passos das grades utilizando uma máquina de medição óptica 3D. (a) Passo da grade $-1+1$; (b) Passo da grade $0+1$.

Com as curvas de calibração ajustadas, um corpo de prova metálico revestido de material compósito e com um defeito artificialmente inserido foi inspecionado pelo sistema óptico difrativo.

Primeiramente a grade $-1+1$ foi utilizada e posteriormente a $0+1$. A Figura 6.15 mostra os resultados obtidos pelos dois sistemas. Como o efeito da tripla imagem ficou bem evidente na medição com a grade $0+1$, Figura 6.15 (b), optou-se por utilizar apenas a grade $-1+1$ nos testes subsequentes.

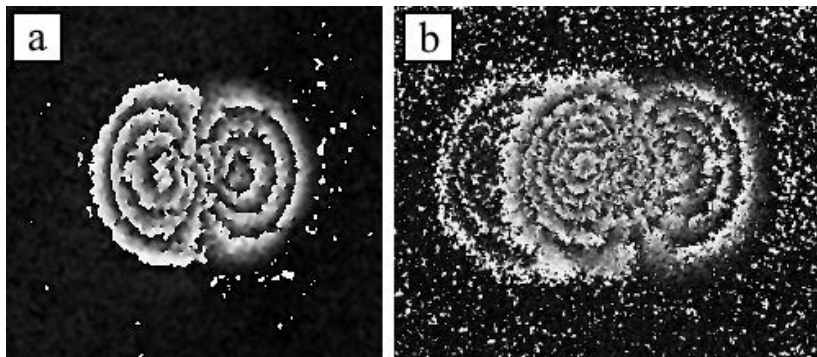


Figura 6.15 – Comparativo entre as medições obtidas pelo módulo de formação e aquisição de imagem difrativo: (a) grade $-1+1$; (b) grade $0+1$.

6.3.1 Avaliação dos interferogramas

Para avaliar a qualidade dos interferogramas obtidos pelos sistemas de inspeção difrativo e $4f$, utilizou-se o simulador de deformações fora do plano já aplicado nos testes preliminares com o sistema difrativo (Seção 4.2.1.2.2). Este mecanismo é composto por uma membrana metálica delgada, engastada nas extremidades, e deformada de maneira controlada pelo avanço de um parafuso micrométrico apoiado no centro da face traseira da membrana. A Figura 6.16 mostra o simulador utilizado.

Os dois sistemas de inspeção foram posicionados logo à frente do simulador, e algumas microdeformações produzidas por deslocamentos de (0 a 8) μm na parte central da membrana foram medidas. Os interferogramas obtidos por ambos os sistemas foram muito similares, conforme mostra a Figura 6.17.

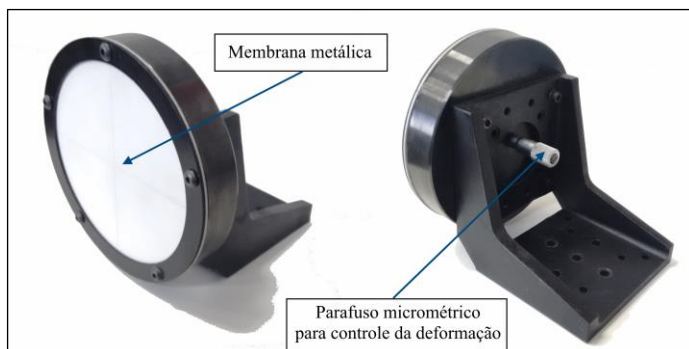


Figura 6.16 – Simulador de deformações fora do plano acionado por parafuso micrométrico.

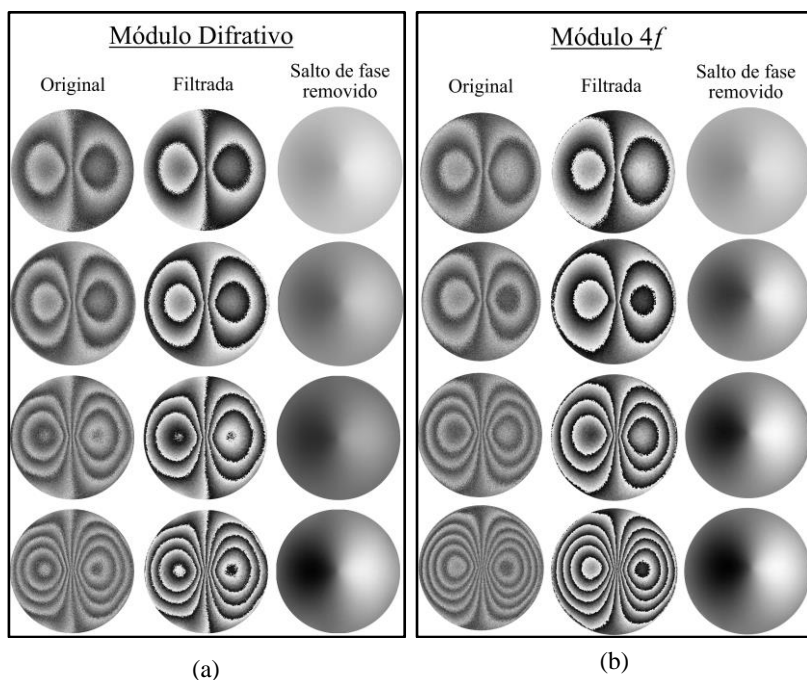


Figura 6.17 – Comparação entre os resultados de medição dos módulos (a) difractivo e (b) $4f$.

A primeira coluna de cada quadro mostra os mapas de diferença de fase originais de cada sistema. Ambos apresentaram baixo ruído e ótimo

contraste das franjas de interferência. A segunda coluna de cada quadro apresenta os mapas de diferença de fase após aplicação de filtros digitais passa-baixas, minimizando os ruídos das imagens.

Através da aplicação de um algoritmo de remoção de saltos de fase, preferencialmente em imagens já filtradas, obtêm-se interferogramas contínuos (terceira coluna de cada quadro) que podem ser correlacionados numericamente com os valores de deformação do objeto inspecionado [28][33]. A intensidade da deformação aplicada cresce de forma proporcional ao número de franjas. O mesmo efeito ocorre nas imagens com salto de fase removido, onde as maiores deformações aplicadas correspondem às variações mais intensas na escala de cinza, e vice-versa.

Entretanto, como o principal objetivo deste trabalho é produzir um sistema que indique a presença de defeitos internos nas estruturas de compósito, uma análise qualitativa já é suficiente. Portanto, a calibração do sistema para a análise quantitativa de deformação não foi necessária.

6.3.2 Avaliação da decorrelação do *speckle*

Como visto anteriormente, a deformação do objeto provoca a mudança de fase entre os dois padrões obtidos, os quais devem ser relativos a uma mesma posição na superfície do objeto. Desta maneira, um dos fatores essenciais que deve ser garantido para a obtenção de bons resultados com interferometria *speckle* é a correlação dos interferogramas registrados antes e depois da deformação do objeto inspecionado. O efeito da decorrelação entre os interferogramas é percebido pela perda de visibilidade dos padrões de franjas. No limite, quando a decorrelação é total, há o total desaparecimento destas.

Dois principais tipos de decorrelação podem ocorrer: (a) decorrelação por translação e (b) decorrelação por rotação fora do plano. A primeira delas acontece através do deslocamento lateral do objeto ao longo do plano normal ao eixo óptico do módulo de formação de imagem, produzindo o correspondente deslocamento lateral do *speckle* no plano imagem. Já a segunda acontece quando o objeto produz uma inclinação em relação ao eixo óptico do módulo de formação e aquisição de imagem. Neste caso, a inclinação do objeto resulta na deflexão do cone de formação da imagem produzido pela íris da lente objetiva do sistema. Desta forma, o cone de entrada de luz relativo aos dois instantes, anterior e posterior à inclinação do objeto, não são rigorosamente os mesmos. Portanto, tanto as intensidades como as fases do padrão *speckle* projetado no plano imagem são alterados. A partir de um nível aceitável de inclinação do objeto, a estrutura do padrão *speckle* formado no sensor da

câmera difere do padrão de referência, destruindo por completo a correlação entre os dois padrões *speckles* registrados [40].

A ocorrência da decorrelação por translação pode ser parcialmente corrigida através de um subsequente processamento de imagens, pois o padrão que se desloca no plano do sensor da câmera não muda, e sim é projetado nos *pixels* vizinhos. Já uma decorrelação por rotação dificilmente pode ser corrigida, visto que o padrão *speckle* é deformado ao longo da imagem.

Uma análise experimental de decorrelação foi realizada com o intuito de avaliar o limite de deslocamento lateral aceitável, entre o objeto e o sistema de inspeção difrativo, sem perda expressiva na visibilidade das franjas. Para tanto, o simulador de deformações (Figura 6.16) foi montado sobre uma mesa micrométrica para produzir um deslocamento lateral controlável. O sistema de inspeção foi posicionado à frente do simulador e o mapa de fases de referência foi adquirido. Posteriormente, uma deformação foi produzida no simulador, e um novo mapa de fases adquirido a cada deslocamento lateral de $2\ \mu\text{m}$.

A Figura 6.18 apresenta o resultado obtido no experimento, onde perdas mais acentuadas de visibilidade das franjas aconteceram a partir do deslocamento lateral de $16\ \mu\text{m}$. Portanto, para as condições ensaiadas, o máximo deslocamento relativo entre o sistema difrativo e a superfície de inspeção não deve ultrapassar $16\ \mu\text{m}$ para que a correlação entre o mapa de fase final e o de referência seja garantida.

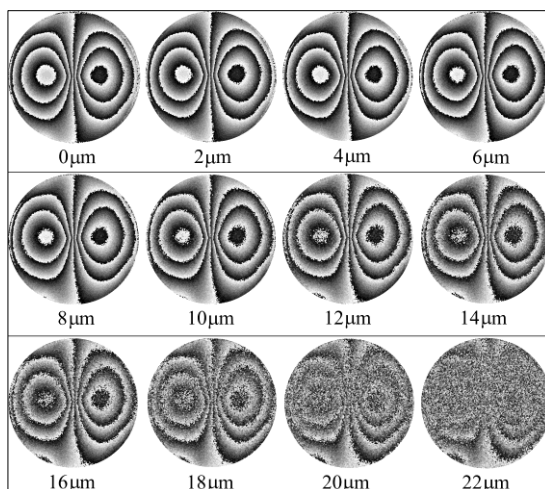


Figura 6.18 – Resultados da avaliação de decorrelação por translação do sistema difrativo.

Com base no valor da magnificação M_g do módulo de formação e aquisição de imagem, definida na seção 4.2.1.1, verifica-se que o deslocamento do objeto de $16\ \mu\text{m}$ produz um deslocamento lateral de $0,45\ \mu\text{m}$ na imagem, o que é proporcional a 10% do tamanho do *pixel* do sensor da câmera. Assim sendo, deslocamentos da imagem maiores que 10% do tamanho do *pixel* provocam decorrelação do *speckle* inaceitáveis. A Figura 6.19 apresenta a curva de conversão de deslocamentos do objeto em deslocamentos do *speckle* na imagem, e vice-versa.

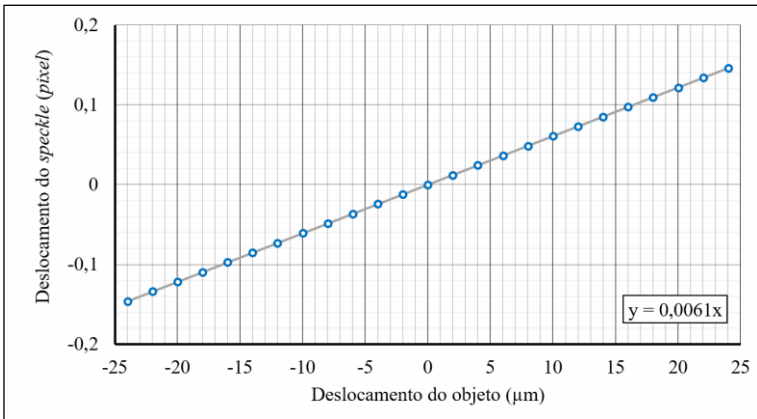


Figura 6.19 – Curva de conversão de deslocamentos do objeto em deslocamentos do *speckle* na imagem.

Algumas aplicações de interferometria *speckle* utilizam tamanhos de *speckles* menores que o tamanho do *pixel*, denominados de *speckles* não resolvidos. Neste caso, a intensidade luminosa registrada por cada *pixel* resulta da combinação dos *speckles* nele concentrados. Esta configuração torna o sistema mais robusto à decorrelação do *speckle*, e maiores valores de deslocamento lateral da imagem, próximos ao tamanho do *pixel*, já são possíveis [40][52].

Vale lembrar que a obtenção de *speckles* menores é conseguida com maiores aberturas da íris, o que resulta em redução da profundidade de campo do sistema de inspeção. Assim sendo, como o sistema foi dimensionado para realizar inspeções em tubulações, o compromisso de obtenção de imagens nítidas em uma maior profundidade de campo prevaleceu, e a utilização do *speckle* resolvido (com dimensão maior ou igual ao tamanho do *pixel*) foi mantida.

6.3.3 Avaliação em ambiente com vibração

A inspeção com *shearografia* em campo está sujeita a perturbações vibracionais geradas por diversos fatores, principalmente pelo funcionamento de máquinas e equipamentos instalados nas proximidades da tubulação a ser inspecionada. Diante disso, o projeto do sistema de inspeção por *shearografia* foi concebido buscando minimizar a influência vibracional, a fim de permitir a presença de um nível aceitável de vibração durante o processo de inspeção.

Uma bancada experimental foi desenvolvida para produzir vibrações similares àquelas encontradas em campo, normalmente causadas por máquinas rotativas, tais como bombas e compressores de ar. Utilizou-se um motor elétrico com disco desbalanceado para gerar uma vibração harmônica controlada. O motor foi acoplado a uma mesa metálica apoiada sobre quatro isoladores de vibração tipo mola, conforme representado na Figura 6.20. Deste modo, os movimentos predominantes aconteceram na direção do eixo x.

A amplitude de vibração da bancada é ajustada pela variação, na direção radial, da posição da massa de desbalanceamento em relação ao eixo de rotação do motor. Um inversor de frequência é responsável pelo controle da frequência rotacional do motor. O nível de vibrações produzido foi restrito à faixa de frequência de (0 a 60) Hz, por questões de segurança, para que o eixo do motor e seus mancais não fossem sobrecarregados e por ser a faixa de frequência mais significativa encontrada em campo.

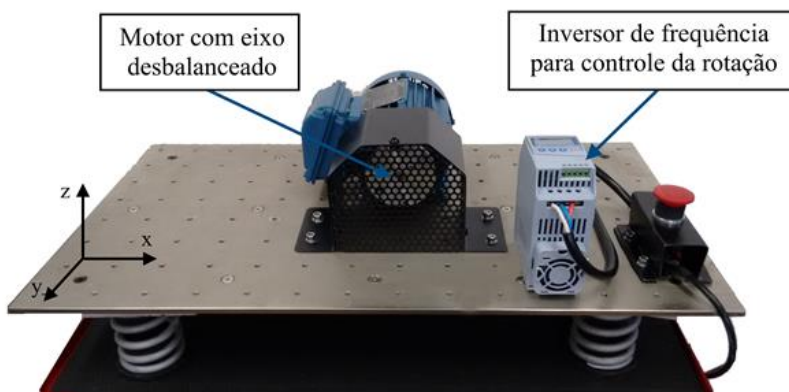


Figura 6.20 – Bancada experimental de vibrações.

Utilizou-se a bancada para avaliar o desempenho operacional dos módulos de formação e aquisição de imagem, $4f$ e difrativo, em um ambiente com vibrações. Neste experimento, os dois módulos foram acoplados rigidamente à bancada para possibilitar uma análise simultânea dos sistemas. Para a geração da deformação controlada, utilizou-se o dispositivo composto por disco metálico e parafuso micrométrico. Os dois sistemas foram direcionados para este dispositivo, e configurados para ter a mesma sensibilidade de medição (deslocamento lateral) e os mesmos parâmetros ópticos (abertura da íris, ajuste de ganho, *shutter* e ampliação da imagem). A configuração do experimento é apresentada na Figura 6.21.

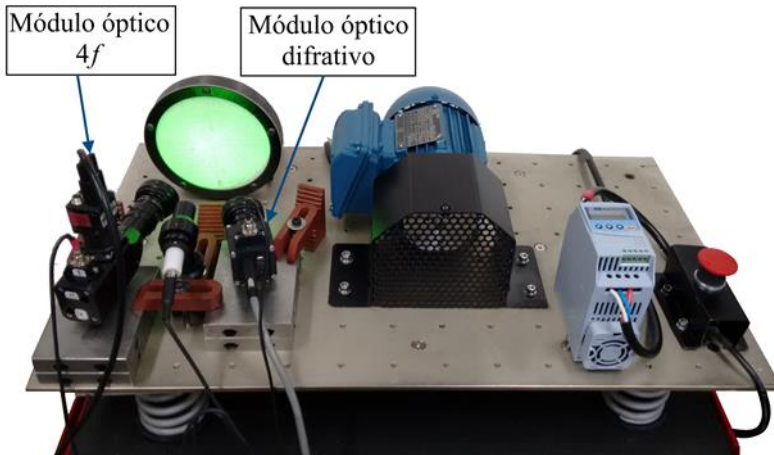


Figura 6.21 – Avaliação dos módulos de formação e aquisição de imagem em ambiente com vibrações.

Foram realizadas diversas medições de *shearografia* com aquisição simultânea de imagens dos dois módulos de inspeção. A frequência rotacional do motor foi variada entre (10 e 60) Hz para promover diferentes níveis de vibração. A Tabela 6.3 apresenta um resumo com a qualificação dos resultados obtidos por cada módulo. A Figura 6.22 mostra um quadro comparativo entre alguns resultados obtidos pelos módulos.

Uma análise dos resultados obtidos nas medições revelou que os dois sistemas tiveram comportamentos similares na maior parte das medições. Porém, o sistema difrativo apresentou melhor desempenho global comparado ao sistema $4f$. Como o simulador de deformações

também foi submetido às mesmas vibrações, parte das medições ruins, onde ambos os sistemas não mediram, podem ter sido induzidas pela ressonância do corpo de prova, e não por limitações operacionais dos sistemas.

Tabela 6.3 – Avaliação das medições dos módulos em ambiente com vibrações.

Qualidade das medições	Percentual obtido	
	4f	Difrativo
Boas	65%	65%
Razoáveis	23%	30%
Ruins	12%	5%

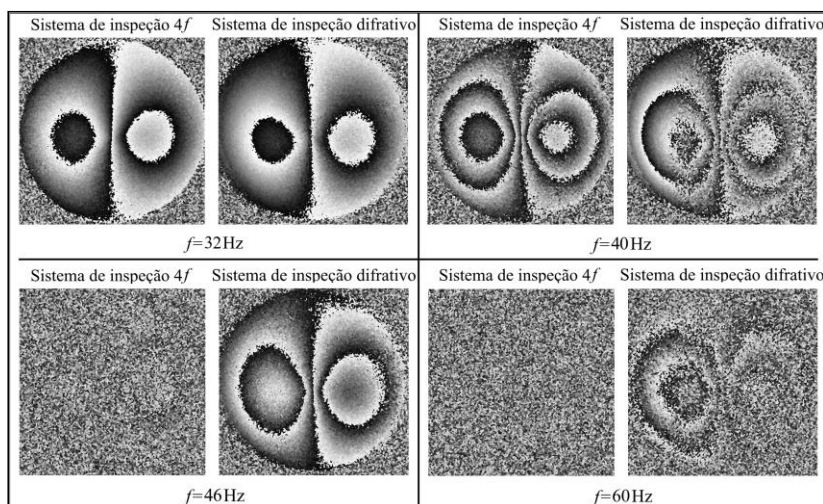


Figura 6.22 – Quadro comparativo da qualidade das medições obtidas pelos módulos de formação e aquisição de imagem em ambiente com vibração.

6.4 SISTEMA DE INSPEÇÃO COM MÚLTIPLOS SENSORES – COLAR

O Colar de inspeção de *shearografia* foi submetido a diferentes experimentos em laboratório para avaliar tanto a qualidade de suas medições como o seu desempenho operacional quando aplicado em condições adversas, ou seja, em condições similares às encontradas em campo. Uma descrição mais detalhada de cada experimento é apresentada nos tópicos seguintes.

6.4.1 Medição do *spool* CP3

Conforme apresentado na seção 4.1, o Colar de inspeção emprega como forma de carregamento a variação da pressão hidrostática da tubulação. Assim sendo, utilizou-se o corpo de prova CP3, já representado anteriormente na Figura 4.2, para realizar os primeiros experimentos deste equipamento. Vale lembrar que este corpo de prova é constituído inteiramente de material compósito (PRFV) e suas uniões adesivadas são do tipo ponta e bolsa. Durante o procedimento de montagem do *spool*, pela equipe do CENPES/PETROBRAS, defeitos foram artificialmente inseridos nas interfaces das juntas. Marcações na cor amarela identificam as posições, tamanhos e tipos dos defeitos inseridos, como mostra a Figura 6.23.



Figura 6.23 – Identificação das posições, tamanhos e tipos de defeitos inseridos nas interfaces das juntas ponta e bolsa do corpo de prova CP3.

As extremidades do *spool* foram fechadas por dois flanges cegos, após o tubo ter sido preenchido com água. Uma bomba hidráulica manual, conectada a um dos flanges cegos foi utilizada para pressurizá-lo. Para a medição, o Colar foi posicionado na região adjacente às juntas e fixado rigidamente à tubulação, como mostra a Figura 6.24 (a). As quatro juntas ponta e bolsa do CP3, identificadas como J5, J6, J18 e J19 (conforme apresentado na Figura 4.2), foram inspecionadas.

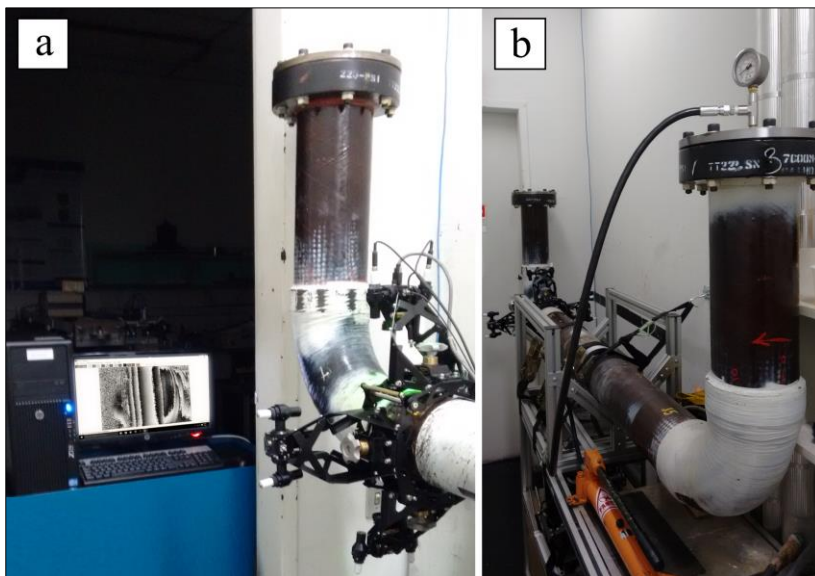


Figura 6.24 – Medição das juntas ponta e bolsa do CP3. (a) Colar montado na tubulação e computador para aquisição de dados. (b) Sistema de pressurização do tubo: bomba hidráulica manual e manômetro.

A diferença de pressão aplicada durante os testes foi de aproximadamente 800 kPa. Inspeções de *shearografia* podem ser realizadas tanto na variação ascendente da pressão como na descendente. Os resultados são similares em ambos os casos, apenas ocorrendo uma inversão do sinal da derivada do deslocamento. No mapa das diferenças de fase resultante da medição de *shearografia*, esse fenômeno se manifesta através da inversão dos tons de cinza dos mapas de fase. Se na variação ascendente da pressão as franjas mudam do branco para o preto, no caso oposto, com a variação descendente da pressão, a mudança ocorrerá do preto para o branco.

Nestes experimentos, para que todas as inspeções tivessem o mesmo procedimento, optou-se por realizar as medições utilizando-se apenas a variação negativa de pressão, ou seja, a aquisição do mapa de fases do estado inicial foi realizada com o tubo pressurizado em 800 kPa. Após isso, um mapa de fases foi adquirido a cada decréscimo de 100 kPa, até a pressão interna do tubo se igualar à pressão atmosférica. Um resumo dos resultados das inspeções das quatro juntas ponta e bolsa é exposto

na Figura 6.25. Os resultados completos de cada medição são apresentados no APÊNDICE B.

A partir da análise dos resultados obtidos, foram identificadas algumas anomalias nos padrões de franjas obtidos. Atualmente, a identificação das anomalias nos padrões de *shearografia* é feito por comparação. No caso de juntas ponta e bolsa, um padrão característico de uma região sem defeitos é constituído de franjas paralelas entre si, como pode ser facilmente percebido na posição 270° da junta J19 (Figura 6.25). A posição 180° da junta J18 também é um bom exemplo de uma região livre de defeitos.

O aparecimento de franjas não paralelas nos resultados de *shearografia*, realizados em juntas ponta e bolsa, indica a presença de defeitos internos, como falta de adesivo e/ou falta de adesão. As regiões defeituosas mais evidentes foram identificadas na Figura 6.25 pelos retângulos pontilhados na cor vermelha, e as juntas J19 e J6 foram aquelas que apresentaram as maiores anomalias nos padrões. A maioria das anomalias correspondeu perfeitamente às posições e dimensões dos defeitos artificialmente inseridos, comprovando a eficiência dessa técnica de inspeção na avaliação da qualidade de adesão deste tipo de juntas adesivadas. Já as juntas J5 e J18 não apresentaram grandes deformidades nos padrões que reportassem à presença de algum defeito preocupante.

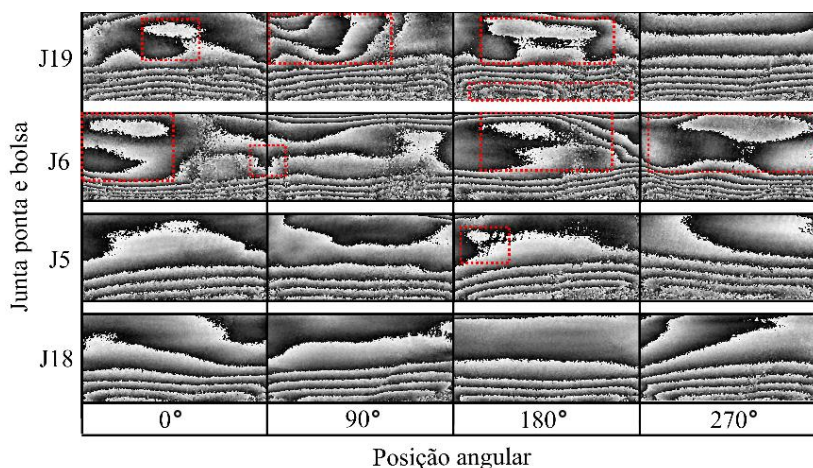


Figura 6.25 – Resumo dos resultados das inspeções das juntas ponta e bolsa adesivadas, do corpo de prova CP3, obtidos com uma variação de pressão hidrostática de 600 kPa.

6.4.2 Caracterização dos resultados de *shearografia*

Com o intuito de aprofundar as avaliações já realizadas anteriormente, e assim correlacionar os padrões resultantes de *shearografia* com dimensões e características de defeitos identificados, uma junta adesivada, com defeitos artificialmente inseridos, foi novamente preparada, desta vez pela própria equipe do projeto SHIC. Utilizou-se parte de um corpo de prova, disponibilizado pelo CENPES/PETROBRAS, para produzir um novo *spool*, denominado CP0. Conforme mostra a Figura 6.26, três defeitos foram inseridos em uma das juntas ponta e bolsa do CP0.

Utilizou-se lâminas de teflon para produzir dois defeitos: um em formato retangular (1) com dimensões de 110 mm x 30 mm, orientado na direção circunferencial do tubo; e outro circular (2) com diâmetro aproximado de 25 mm. Para o terceiro defeito aplicou-se uma fina camada de parafina em formato elíptico (3), sobre a superfície do rebaixo preparado no tubo.



Figura 6.26 – Tamanho, forma e tipo de defeito inserido na região da junta ponta e bolsa. (1) Defeito retangular com lâmina de teflon; (2) Defeito circular com lâmina de teflon; (3) Defeito elíptico com parafina.

Os defeitos aplicados nesta junta, denominada J0, simulam tanto defeitos de colagem inadequada (no inglês denominado de *kissing bond*), onde ocorre falta de adesão entre as faces, sem a ocorrência de espaços vazios; como também defeitos de inclusão, que é a presença de material estranho no laminado [13][53].

Após a preparação dos defeitos, aplicou-se o adesivo estrutural PSX-60, da empresa Ameron, sobre a região da junta. Este é um adesivo bi-componente a base de resina epóxi, com aditivo condutor de eletricidade, normalmente utilizado nas tubulações Ameron *Bondstrand*

7000M. A Figura 6.27 apresenta algumas etapas de montagem do corpo de prova CP0, executada nas dependências do LABMETRO/UFSC.



Figura 6.27 – Montagem do corpo de prova CP0, com os defeitos artificialmente inseridos na região da união.

Decorrido o tempo de cura do adesivo, utilizou-se um flange cego para fechar a extremidade do trecho horizontal do *spool*, e após isso o mesmo foi preenchido com água. Em seguida, a extremidade do trecho vertical do *spool* foi fechada por outro flange cego, onde foi conectada a bomba hidráulica para variação da pressão interna do tubo.

Utilizou-se apenas um módulo do Colar, fixado no tubo por meio de uma cinta de carga, para realizar as medições. Ambas as juntas adesivadas, J11 (preparada pelo CENPES/PETROBRAS) e J0, foram inspecionadas. A Figura 6.28 mostra a configuração da bancada elaborada para a inspeção das juntas adesivadas do CP0.

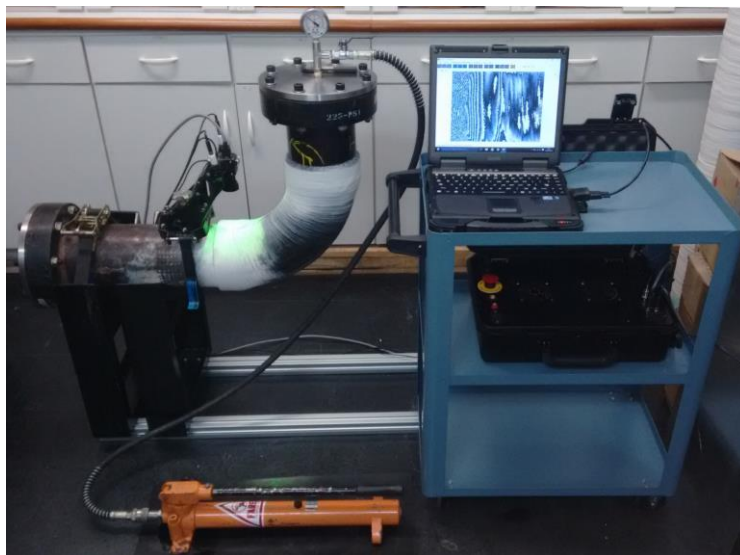


Figura 6.28 – Bancada experimental para avaliação de junta ponta e bolsa com defeitos inseridos.

Adicionalmente, as juntas foram submetidas a uma tomografia computadorizada (TC). Para tanto, a etapa subsequente à inspeção de *shearografia* foi a de corte do *spool* para separar as juntas adesivadas em partes menores, viabilizando a sua inserção na região de inspeção do tomógrafo. A Figura 6.29 apresenta os cortes realizados no CP0.

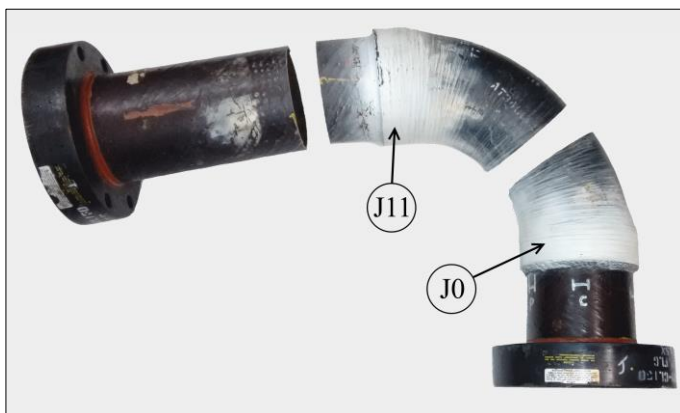


Figura 6.29 – Preparação do CP0 para tomografia computadorizada.

As tomografias das juntas adesivadas J0 e J11 foram realizadas pela equipe da Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras – CERTI, através do tomógrafo ZEISS METROTOM 500, disponibilizado pelo projeto “Implantação de Infraestrutura Laboratorial para P&D em Soluções de Medição e Instrumentação Avançadas para o Setor Petróleo e Gás – LAMIA”, custeados pela Rede Temática de Metrologia da PETROBRAS. O item (a) da Figura 6.30 mostra a junta J0 inserida no interior do tomógrafo para realização da inspeção, e o (b) apresenta alguns exemplos dos resultados obtidos na inspeção de TC.

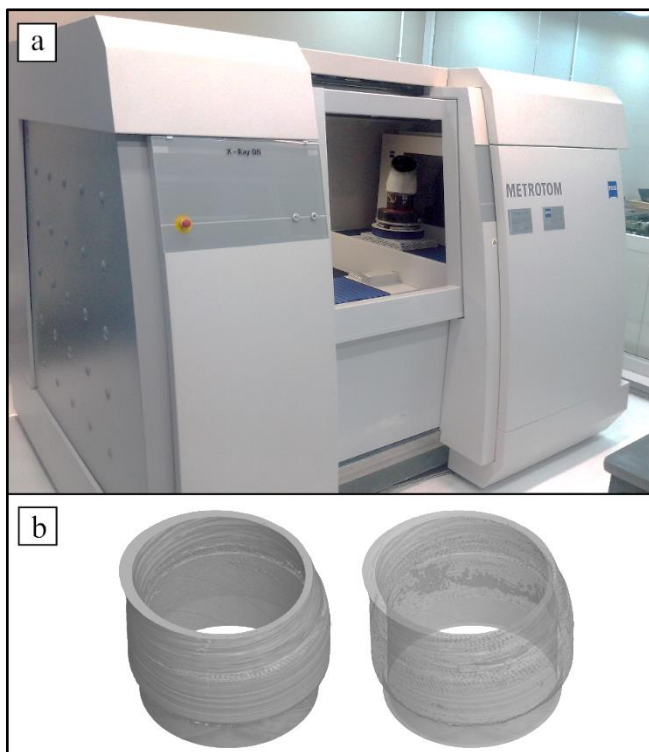


Figura 6.30 – Tomografia computadorizada das juntas adesivadas do CP0.
(a) Junta J0 inserida no interior do tomógrafo para realização da inspeção;
(b) Exemplos de resultados obtidos na tomografia da junta J0.

As Figuras 6.31 e 6.32 apresentam uma comparação entre os resultados obtidos nas inspeções de *shearografia* e tomografia computadorizada, das juntas J0 e J11, respectivamente.

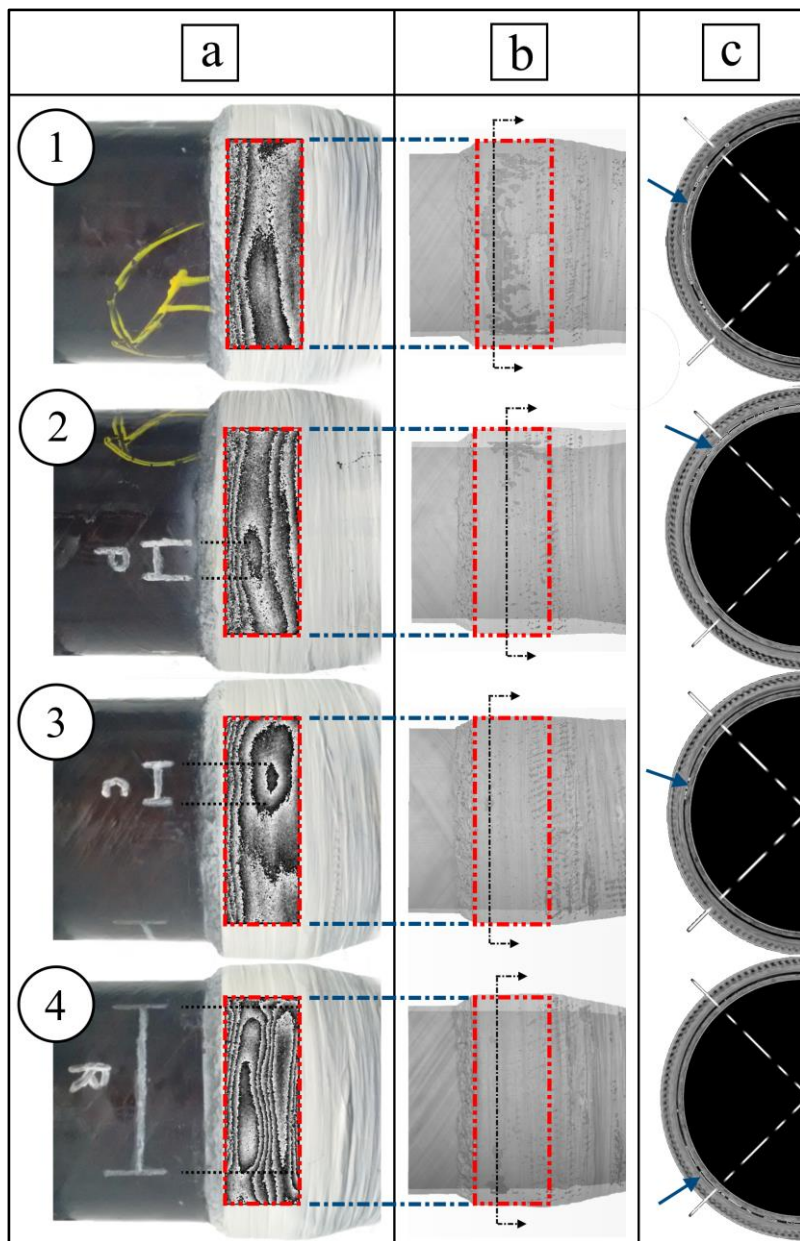


Figura 6.31 – Comparação entre resultados de *shearografia* e tomografia computadorizada, obtidos nas inspeções da junta J0, do corpo de prova CP0.

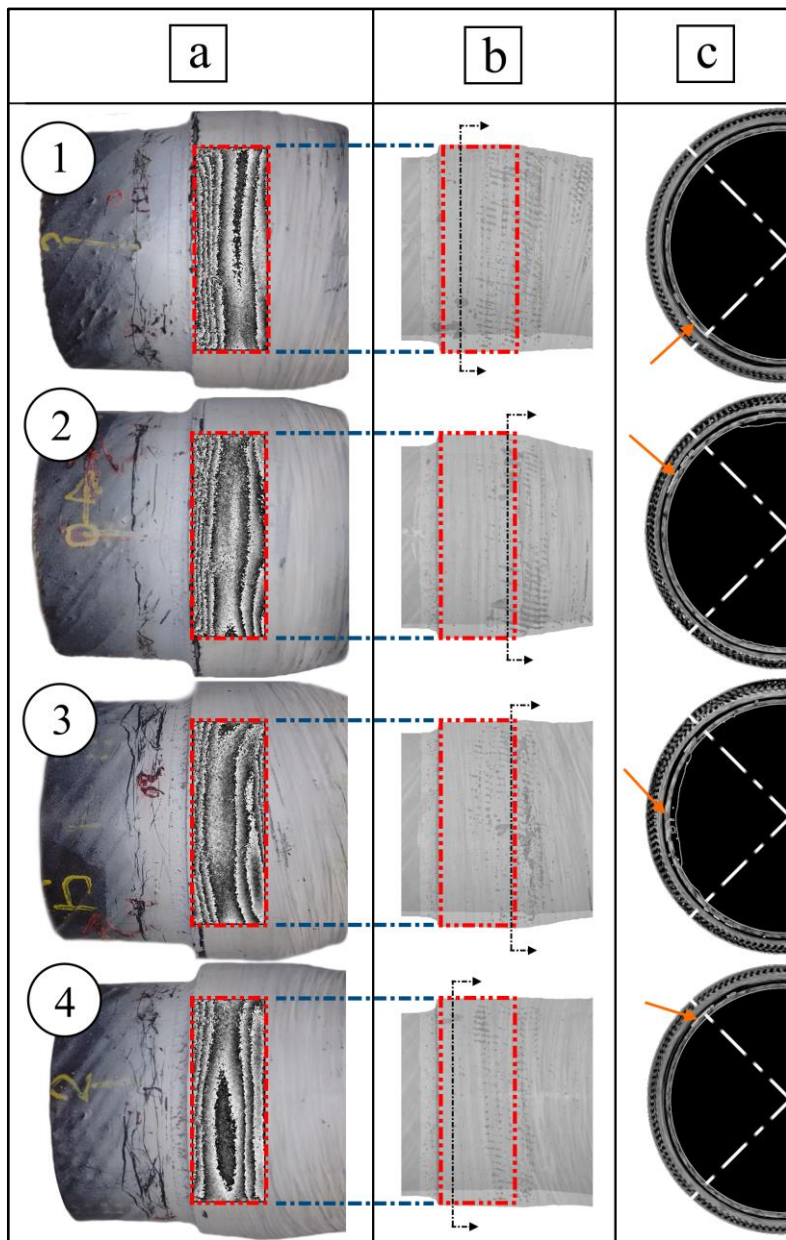


Figura 6.32 – Comparação entre resultados de *shearografia* e tomografia computadorizada, obtidos nas inspeções da junta J11, do corpo de prova CP0.

Os resultados obtidos pela *shearografia* demonstraram novamente a capacidade do método na identificação de defeitos em uniões adesivadas de tubulações de PRFV. Todos os defeitos inseridos na junta J0 foram identificados, conforme mostra a coluna (a) da Figura 6.31. No caso da seção 1 desta figura, os resultados da tomografia computadorizada, coluna (b) e (c), identificaram a presença de vazios, os quais são típicos defeitos de falta de adesivo, e ocorreram de forma natural, não sendo um dos propositalmente inseridos. Este defeito também foi identificado na inspeção de *shearografia*, conforme mostra a seção 1 da coluna (a).

Por outro lado, alguns dos defeitos identificados pela *shearografia*, tanto na junta J0 como na J11, não foram visualizados nos resultados da tomografia. Tal fenômeno está associado ao fato da *shearografia* medir deformações na peça através da aplicação de um carregamento (seção 3.3.1), e nesse caso, são perceptíveis os efeitos tanto dos vazios quanto das regiões contínuas, porém sem adesão (*kissing bonds*). No caso da tomografia, por se tratar de uma avaliação geométrica/composicional estática, apenas as zonas de densidades distintas e com presença de vazios seriam identificadas como possíveis defeitos.

O princípio de medição que a tomografia utiliza é baseado na emissão de raios-X sobre a peça em análise, os quais se propagam através desta e são posteriormente capturados por um detector. A intensidade de energia emitidas nos raios-X é atenuada ao atravessar o material da peça, de acordo com sua composição e densidade. A peça é rotacionada e diversas medições são realizadas. A composição das diversas medições com algoritmos apropriados promove a reconstrução tridimensional de todo o volume analisado da peça, com elevado nível de detalhamento, tanto geométrico como da composição física do material [54]. Diante disso, a possível razão da tomografia não ter detectado os defeitos artificialmente inseridos é a similaridade de características físicas dos materiais dos defeitos e do adesivo da junta, e também por não haver espaços vazios entre estes e a superfície externa onde foram aplicados.

Algumas normas regulamentadoras sobre tubulação de compósito [13][53][55] definem critérios para rejeição de juntas adesivadas em tubulação de PRFV. O critério mais rigoroso define que a ocorrência de área de descolamento maior que 30% da área total adesivada e/ou de comprimento axial da área descolada maior que 20% do comprimento axial total da junta é um fator de reprovação. Os resultados de ambas as inspeções (J0 e J11) de *shearografia* identificaram defeitos com dimensões maiores que os limites determinados pelas normas regulamentadoras. Neste caso, ambas as juntas foram reprovadas nestas inspeções.

6.4.3 Medição em ambientes sujeitos a vibrações

A avaliação do desempenho do sistema em ambiente com vibração foi realizada em duas etapas, uma delas em bancada e a outra diretamente sobre o *spool* de compósito. No experimento em bancada, um segmento de tubo foi acoplado à mesa metálica com o objetivo de reproduzir uma condição similar àquela encontrada em campo. Dessa forma, foi possível observar a resposta operacional do sistema em determinados níveis de vibração e identificar os limites de medição, em termos de deslocamento, velocidade e aceleração. Uma descrição mais detalhada de cada etapa é apresentada a seguir.

6.4.3.1 Avaliação em bancada

Com base nos resultados obtidos na análise modal dos módulos de sustentação e fixação, seção 6.2.1, e na avaliação dos módulos de formação e aquisição de imagem com vibração, seção 6.3.3, verificou-se que o sistema de inspeção difrativo apresentou melhor desempenho quando aplicado em ambientes com vibrações. Isso se deve, principalmente, ao fato do módulo difrativo ser mais leve, compacto e por admitir maior movimento relativo da grade difrativa, que é o único elemento móvel, sem degradar a imagem. Por conseguinte, optou-se por aprofundar a avaliação com vibração apenas com esse sistema.

Para reproduzir uma condição ainda mais similar à encontrada em campo, um segmento de tubo metálico de diâmetro nominal de 6” foi fixado rigidamente à bancada. A fixação à mesa foi realizada por meio de grampos e um apoio em “v”, com o eixo do tubo orientado perpendicularmente à direção de excitação do motor. Esta orientação foi escolhida em função das vibrações em campo acontecerem predominantemente no sentido radial da tubulação, levando-se em conta que a ancoragem das tubulações restringe movimentos axiais. A montagem é apresentada na Figura 6.33.

Esta bancada foi instrumentada com três acelerômetros uniaxiais com o objetivo de registrar os níveis de vibração da tubulação e do sistema de inspeção. Um dos acelerômetros foi acoplado à superfície do tubo, com o seu eixo de medição coincidente com a orientação de excitação do motor (direção x). Os outros dois acelerômetros monitoraram os níveis de vibração do sistema de inspeção nas direções x e y. Os níveis de vibração avaliados foram novamente restritos à faixa de frequência de (10 a 60) Hz. Uma variação incremental de 0,5 Hz foi utilizada para varrer toda a faixa de análise.

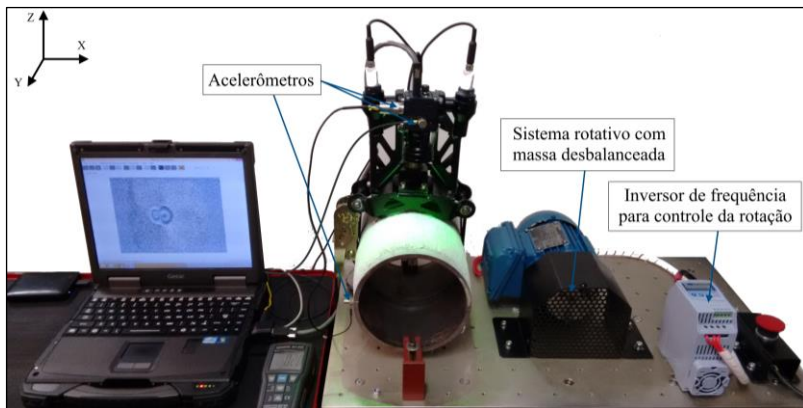


Figura 6.33 – Bancada experimental de vibrações com tubo acoplado à mesa metálica.

Paralelamente à avaliação dos níveis de vibração do tubo e do sistema de inspeção, foram realizadas diversas inspeções com *shearografia*, uma para cada frequência. Para tanto, um reparo com material composto foi aplicado ao tubo, e um defeito simulado foi introduzido na interface do reparo e do tubo. Um parafuso micrométrico acoplado na parte interna do tubo produziu, através de um furo passante na parede do tubo, uma deformação controlada nesse defeito, conforme ilustrado na Figura 6.34.



Figura 6.34 – Defeito com controle de deformação por parafuso micrométrico.

Em análises de vibração em frequência, há várias formas de apresentação do sinal. Alguns dos parâmetros de medição mais utilizados são aceleração, velocidade e deslocamento. A escolha do melhor parâmetro para o diagnóstico depende da faixa de frequência analisada e da característica mecânica sob investigação. As medições de deslocamento enfatizam as baixas frequências. A análise de aceleração é mais utilizada nos estudos em altas frequências, acima de 1 kHz. Já as medições em termos de velocidade fornecem aproximadamente igual atenção aos níveis de vibração em toda a faixa de frequência [56].

Uma das características mais importantes em uma medição com *shearografia* é a correlação dos valores adquiridos, antes e depois de um carregamento imposto à superfície sob inspeção. Portanto, um movimento relativo entre o sistema e a superfície de inspeção, superior a um limite aceitável, faz com que as imagens inicial e final percam correlação entre si, inviabilizando a medição.

Diante disso, um dos principais objetivos desta análise de vibrações é a avaliação do deslocamento relativo entre o sistema de inspeção e a tubulação, a fim de determinar qual o valor máximo de deslocamento relativo que o sistema pode sofrer e ainda obter boas imagens de *shearografia*.

A Figura 6.35 mostra as curvas de aceleração, velocidade e deslocamento obtidas no experimento, as quais caracterizaram a resposta vibracional do sistema a uma excitação harmônica. Nesta figura, $X_{SI}(\omega)$ e $Y_{SI}(\omega)$ representam as respostas do sistema nas direções x e y, respectivamente, e $X_T(\omega)$ indica a resposta do tubo na direção x.

Como o sistema de inspeção difrativo está fixado sobre o tubo, as curvas $X_{SI}(\omega)$ e $Y_{SI}(\omega)$ são compostas tanto pelo movimento da estrutura como do tubo. Este efeito fica evidente em determinadas frequências, tais como 12,5 Hz, 37,5 Hz e 45 Hz. Deste modo, a análise de vibração pode ter duas abordagens distintas: (a) com referencial global de movimento, externo à bancada, e (b) com a transposição do referencial para a superfície do tubo, a fim de avaliar apenas o movimento relativo entre o sistema e o tubo.

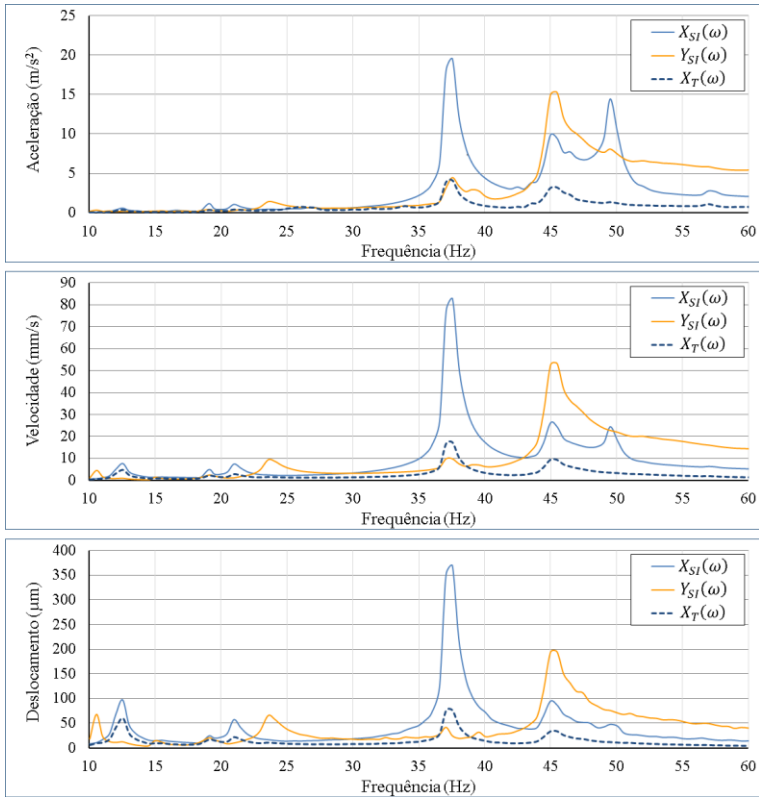


Figura 6.35 – Curvas de vibração do tubo e do sistema de inspeção.

Para minimizar o efeito produzido pelo movimento acoplado entre o sistema de inspeção e o tubo, o parâmetro utilizado nesta análise foi a denominada transmissibilidade de deslocamento, que é definida como a razão entre as amplitudes de deslocamentos do sistema de inspeção e do tubo [57]. Em outras palavras, a transmissibilidade de deslocamento é a resposta do módulo de sustentação e fixação do sistema difrativo ao movimento do tubo. Desta forma, duas funções de resposta em frequência (FRF) foram obtidas, $H_x(\omega)$ e $H_y(\omega)$, relativas aos deslocamentos do sistema de inspeção nas direções x e y, respectivamente, e determinadas por

$$H_x(\omega) = \frac{X_{Sf}(\omega)}{X_T(\omega)}, \quad (6.1)$$

e

$$H_y(\omega) = \frac{Y_{SI}(\omega)}{X_T(\omega)}, \quad (6.2)$$

onde, $X_{SI}(\omega)$ é o deslocamento do sistema de inspeção na direção x, $Y_{SI}(\omega)$ o deslocamento do sistema de inspeção na direção y e $X_T(\omega)$ o deslocamento do tubo na direção x.

A Figura 6.36 apresenta as funções de resposta em frequência obtidas.

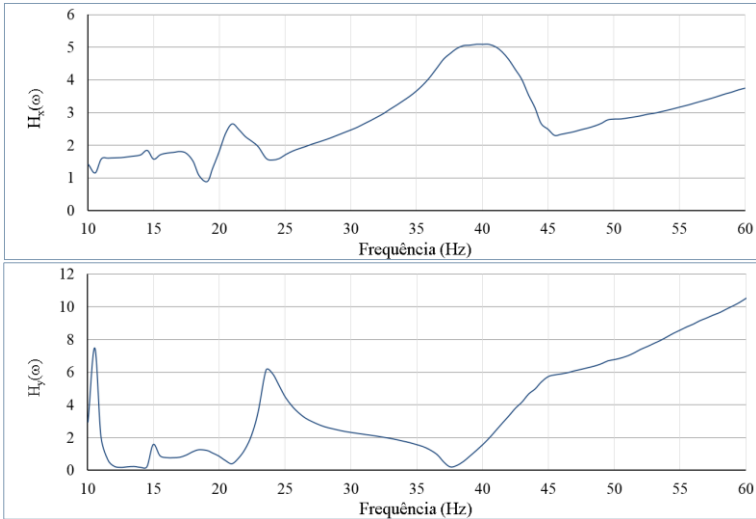


Figura 6.36 – Funções de resposta em frequência do sistema de inspeção difrativo: (a) FRF na direção x; (b) FRF na direção y.

Como parte do deslocamento registrado pelo acelerômetro no sistema de inspeção é relativo ao deslocamento do tubo, uma compensação nos valores deve ser realizada para se obter apenas o deslocamento relativo entre o sistema e o tubo, e, para isso, a fase relativa entre eles deve ser também levada em consideração. Portanto, quando os dois elementos estão se movendo em fase, deve-se subtrair o valor do deslocamento do tubo do valor de deslocamento registrado no sistema de inspeção. Por outro lado, quando os elementos se movem defasados de π rad, o valor do deslocamento do tubo deve ser somado ao do sistema de inspeção. A Figura 6.37 apresenta as fases relativas entre os deslocamentos em x do sistema de inspeção e do tubo.

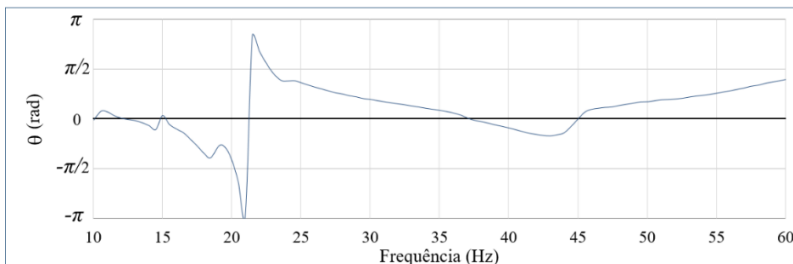


Figura 6.37 – Fase relativa entre os deslocamentos em x do sistema e do tubo.

O deslocamento relativo em x foi obtido através de

$$X_{rel_x}(\omega) = X_{SI}(\omega) - X_T(\omega) \cos \theta . \quad (6.3)$$

A Figura 6.38 mostra o gráfico com os valores dos deslocamentos relativos, nas direções x e y. Como o deslocamento do tubo acontece predominantemente na direção x, em função das ancoragens das tubulações, a compensação foi feita apenas nesta direção. A direção y foi plotada sem compensações.

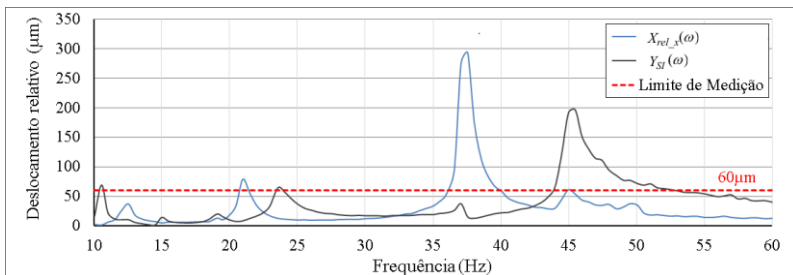


Figura 6.38 – Deslocamento relativo entre o tubo e o sistema de inspeção.

Com os resultados de *shearografia* feitos simultaneamente à análise de vibrações, tornou-se possível identificar o deslocamento máximo relativo para que não haja perda de correlação entre os mapas de fase inicial e final da medição. O valor de deslocamento relativo máximo encontrado foi 60 μm.

Substituindo-se a Equação 6.3 na 6.1, o valor máximo de deslocamento do tubo em que a medição é viável pode ser calculado por

$$X_{T_max_x}(\omega) = \frac{60 \mu m}{H_x(\omega) - \cos \theta} . \quad (6.4)$$

e

$$X_{T_max_y}(\omega) = \frac{60 \mu\text{m}}{H_y(\omega)}, \quad (6.5)$$

onde, $X_{T_max_x}(\omega)$ e $X_{T_max_y}(\omega)$ são os deslocamentos máximos do tubo nos quais a medição ainda é viável, considerando-se os deslocamentos do sistema nas direções x e y, respectivamente.

Assim sendo, a curva de deslocamento máximo do tubo, $X_{T_max}(\omega)$, foi obtida através da sobreposição das curvas $X_{T_max_x}(\omega)$ e $X_{T_max_y}(\omega)$, e utilizando-se o menor valor encontrado para cada frequência. A Figura 6.39 apresenta a curva obtida.

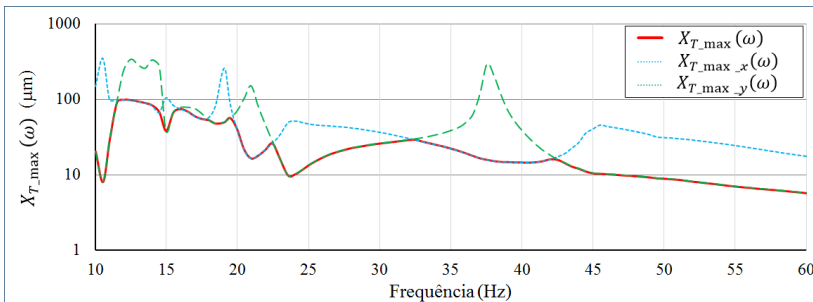


Figura 6.39 – Deslocamento máximo do tubo para viabilizar a inspeção.

A curva de deslocamento máximo do tubo é de grande importância, pois se verifica previamente a possibilidade da aplicação da *shearografia* em campo, apenas com a medição do deslocamento da tubulação a ser inspecionada. Caso o deslocamento medido no tubo que está em campo ultrapasse os valores da curva, a utilização da *shearografia* não será indicada para aquele ponto de inspeção. Caso contrário, a medição é viável e a equipe de inspeção pode se deslocar até o campo para realizar a inspeção.

A Tabela 6.4 apresenta as fontes de vibração mais encontradas na indústria. Uma análise das faixas de frequência das principais fontes (compressores de ar e bombas) mostra que elas operam na região de melhor desempenho do módulo de sustentação e fixação do sistema. Dessa forma, podemos afirmar que o sistema de inspeção correspondeu às expectativas de projeto, podendo operar de forma satisfatória na maioria das aplicações identificadas em campo.

Tabela 6.4 – Fontes de vibração comuns na indústria [20].

Fonte de vibração	Frequência (Hz)	Amplitude (mm)
Compressores de ar	4 - 20	10^{-1}
Bombas	5 - 25	10^{-2}
Acústica	100 - 10 000	$10^{-1} - 10^{-3}$
Tráfego de pessoas	0,55 - 6	10^{-4}
Transformadores	50 - 400	$10^{-3} - 10^{-4}$
Equipamentos manuais	5 - 40	10^{-2}

6.4.3.2 Inspeção em uniões ponta e bolsa de um spool de compósito

A segunda etapa foi realizada diretamente sobre o *spool* de epóxi reforçado com fibra de vidro *Bondstrand 7000M* com diâmetro nominal de 6", a fim de produzir uma condição mais próxima da encontrada em campo. Acoplou-se o motor com disco desbalanceado à tubulação para produzir vibrações controladas, conforme mostra a Figura 6.40.

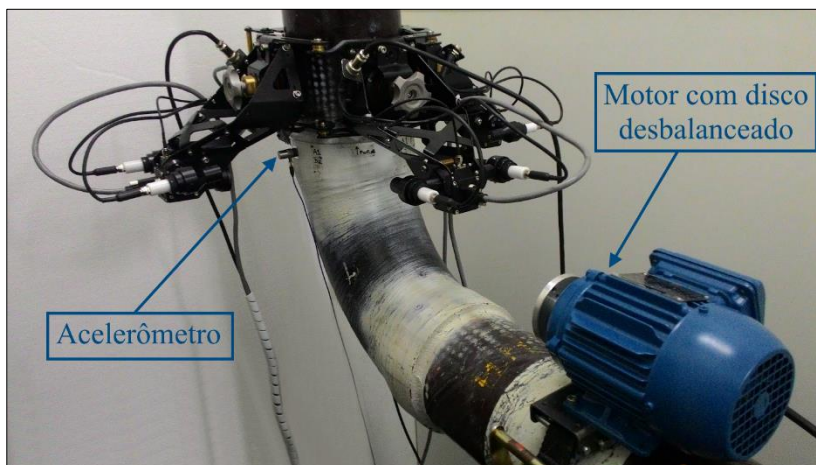


Figura 6.40 – Medição da junta ponta e bolsa com vibrações.

Com a utilização de um acelerômetro, os níveis de vibração da região da junta foram medidos. Os valores de deslocamentos registrados estão apresentados na Figura 6.41.

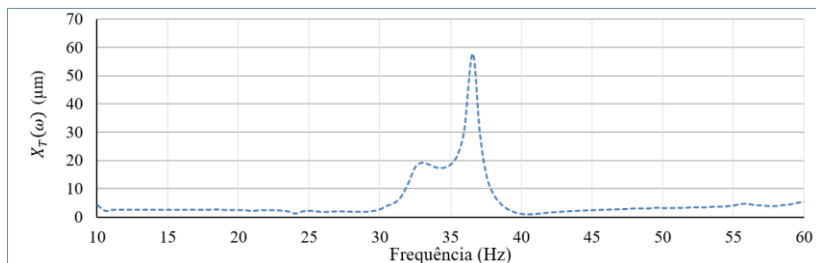


Figura 6.41 – Deslocamento do *spool* registrado na medição.

A sobreposição das curvas de deslocamento do *spool* e do deslocamento máximo aceitável revelou a região onde o sistema provavelmente não mediria, conforme mostrado na Figura 6.42.

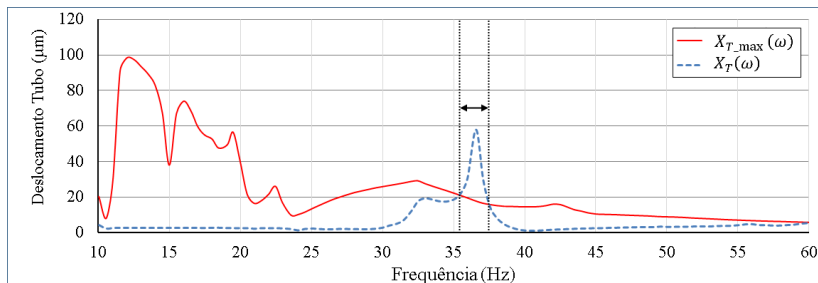


Figura 6.42 – Avaliação da probabilidade de inspeção da qualidade da junta.

Neste cenário com vibrações, a inspeção *shearográfica* de uma seção da junta foi realizada com variação de pressão. Os resultados de algumas frequências selecionadas estão apresentados na Figura 6.43.

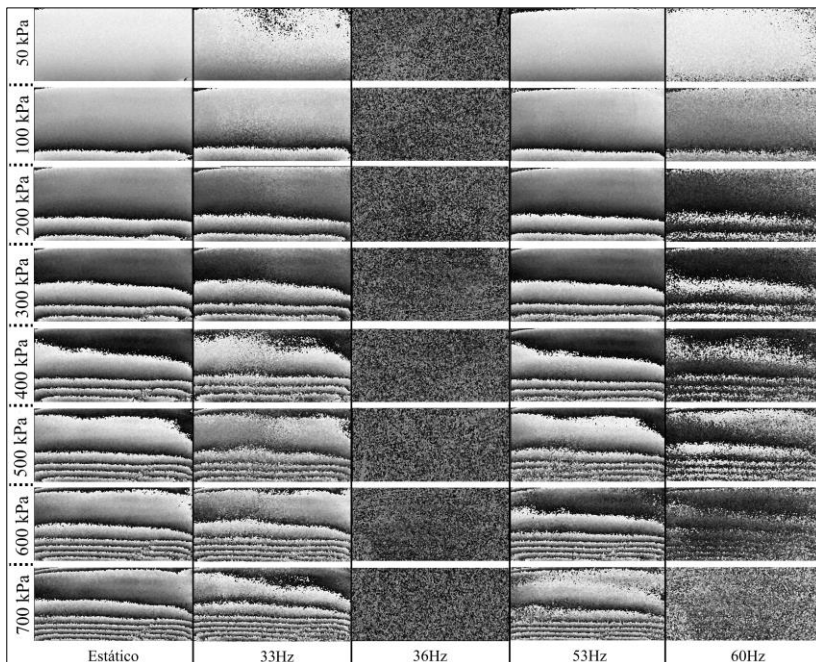


Figura 6.43 – Resultado da inspeção de uma seção de uma junta ponta e bolsa em ambiente com vibrações.

Os resultados obtidos nas inspeções realizadas com diferentes frequências comprovaram a previsão feita através da sobreposição da curva de deslocamento do tubo com a curva do deslocamento máximo encontrado, conforme apresentado na Figura 6.42. Porém, um maior volume de inspeções, com diferentes amplitudes de vibração deve ser realizado para validar completamente o método proposto.

6.5 ENSAIOS EM CAMPO

Diversas condições encontradas em campo foram simuladas em laboratório para avaliar o desempenho de ambos os sistemas de inspeção. Contudo, uma condição real é praticamente impossível de ser reproduzida, pois diversos fatores aleatórios podem estar presentes. Assim sendo, inspeções em campo tornam-se essenciais para uma avaliação mais ampla do sistema, e fundamentais para identificar dificuldades operacionais que possam atrapalhar a inspeção.

Como o presente trabalho faz parte de uma das frentes de atuação do projeto SHIC, o qual é financiado pela PETROBRAS e coordenado pelo CENPES, algumas medições de campo já foram viabilizadas. O sistema $4f$ foi selecionado para realizar as inspeções, tanto *offshore* como *onshore*, por ser o primeiro a estar operacionalmente apto.

Como na ocasião das medições o módulo de sustentação e fixação ainda estava em processo de fabricação, utilizou-se uma estrutura desenvolvida anteriormente no projeto SHIC. Em algumas aplicações onde o aumento da área de medição foi necessário (medição da tubulação de um Flare de 24"), utilizou-se um tripé para posicionar o sistema mais afastado da superfície. Neste caso, um laser de maior potência foi utilizado para iluminar toda a área de medição.

As inspeções foram realizadas em reparos e revestimentos de compósitos aplicados em tubulações metálicas de diversos diâmetros. O carregamento térmico foi empregado nestas inspeções. Utilizou-se uma lâmpada halógena para promover o aquecimento da superfície de medição. Quando presentes, os defeitos se manifestaram com nitidez, permitindo sua fácil identificação, conforme mostra a Figura 6.44. Os resultados destas inspeções mais uma vez comprovaram o grande potencial de aplicação desta técnica óptica de inspeção.

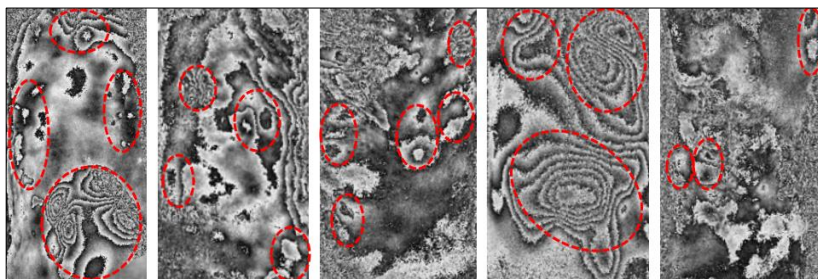


Figura 6.44 – Identificação de defeitos em inspeções realizadas em campo [35].

Algumas das inspeções realizadas pelo sistema $4f$ foram inviabilizadas pelos níveis de vibração encontrados em campo, conforme mostra a Figura 6.45. Como o sistema de inspeção difrativo mostrou-se mais adequado a níveis maiores de vibração, provavelmente boa parte das medições inviabilizadas serão possíveis em uma futura inspeção. Atualmente, ambos os sistemas estão aptos a realizar medições em campo. A Figura 6.46 mostra alguns dos locais onde as inspeções foram realizadas.

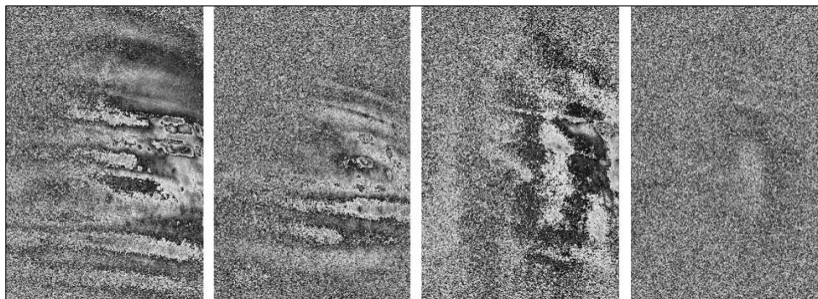


Figura 6.45 – Resultado das inspeções realizadas em tubulações com vibração presente [35].



Figura 6.46 – Inspeções em campo realizadas pela equipe do projeto SHIC [35].

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresenta a síntese conclusiva dos principais tópicos abordados ao longo do trabalho, assim como uma análise crítica dos resultados obtidos em cada um dos módulos desenvolvidos, e dos respectivos testes elaborados para suas avaliações. Ao final são apresentadas algumas recomendações para trabalhos futuros.

O principal objetivo deste trabalho, do ponto de vista tecnológico, foi o desenvolvimento de um sistema de inspeção, com múltiplos sensores de *shearografia*, capaz de avaliar a qualidade de adesão em estruturas de compósito, a partir de um único posicionamento. Um protótipo deste sistema foi projetado, fabricado e testado em condições similares às encontradas em campo. Portanto, o objetivo principal e os específicos deste trabalho foram alcançados.

Do ponto de vista acadêmico, uma ampla revisão bibliográfica foi apresentada sobre o tema. Buscou-se, na medida do possível, uma abordagem clara e descomplicada do assunto. Os principais tópicos necessários ao entendimento do leitor foram apresentados, e um estudo mais aprofundado sobre o assunto pode ser realizado através das obras referenciadas ao longo do texto.

7.1 AVALIAÇÃO GERAL DO TRABALHO

Os itens a seguir apresentam avaliações detalhadas sobre cada um dos módulos desenvolvidos neste trabalho.

7.1.1 Quanto ao módulo de iluminação

O conceito desenvolvido para o módulo de iluminação apresentou boas características, tanto do ponto de vista construtivo como do funcional. Através do mecanismo de alinhamento do laser, a luz foi melhor distribuída na área de inspeção, minimizando regiões com intensa concentração luminosa que poderiam produzir saturação da imagem. O pré-alinhamento do feixe, realizado em bancada, contribuiu para minimizar os desalinhamentos inerentes aos processos de fabricação, facilitando assim o ajuste final produzido pelo mecanismo com duplo excêntrico.

A avaliação da influência térmica no desempenho do laser identificou que variações acentuadas de temperatura produzem instabilidade luminosa do laser. Portanto, deve-se criar meios para evitar esta condição. A aplicação do módulo de iluminação em temperaturas de

trabalho superiores a 32 °C produziu considerável redução da potência luminosa do laser. Desta forma, a aplicação deste modelo de iluminação ficou restrita a faixa de temperatura inferior a 32 °C. Como não foi possível, por limitações operacionais, submeter o módulo de iluminação a temperaturas ambiente menores de 18 °C, o limite inferior de temperatura, sem grandes perdas de potência luminosa, não foi identificado.

A avaliação da condutividade térmica do módulo de iluminação mostrou que sua carcaça dissipa bem o calor, portanto a aplicação de aletas e ventoinhas foi descartada. Um sistema de arrefecimento mais complexo capaz de produzir uma condição térmica estável seria apropriado a esta aplicação.

7.1.2 Quanto ao módulo de sustentação e fixação

O desenvolvimento do módulo de sustentação e fixação do sistema foi o mais complexo deste trabalho. O projeto informacional definiu diversos requisitos de projeto a serem atendidos por este mecanismo, tais como: alta robustez, fixação rígida na própria tubulação, boa ergonomia para facilitar a montagem e o transporte do mecanismo, adaptabilidade aos diferentes diâmetros de tubulações inspecionadas, entre outras.

Construtivamente, optou-se pela utilização de uma estrutura rígida composta por chapas dobradas, pelo baixo custo e facilidade de fabricação. O módulo foi dividido em dois submódulos: um com a função de sustentação do sistema de inspeção; e outro responsável tanto pela fixação como pela união entre módulos. Tanto a adaptação como a fixação dos módulos na tubulação são realizados através do giro de uma manopla. Este mecanismo possui um dispositivo de limitação da força que permite fixar rigidamente o sistema sem danificar a parede do tubo.

A análise modal experimental com vibrômetro laser permitiu identificar os modos de vibração de ambas estruturas e suas respectivas frequências naturais e harmônicas. A análise dos dados permite identificar regiões da estrutura com menor rigidez. Os dados coletados poderão ser utilizados para alimentar uma futura análise por elementos finitos.

Como resultado final, o módulo de sustentação e fixação atendeu às expectativas operacionais, proporcionando estabilidade e rigidez suficiente ao sistema no momento das inspeções. Os ótimos resultados de *shearografia*, obtidos nas inspeções onde condições similares às encontradas em campo foram produzidas, comprovaram a eficiência desta estrutura.

7.1.3 Quanto ao módulo de formação e aquisição de imagens $4f$

O conceito desenvolvido para este módulo atendeu as expectativas de projeto. Os requisitos de compactação e aumento de robustez, em relação ao sistema baseado no interferômetro de Michelson, foram atendidos. O sistema apresentou baixo ruído e ótimo contraste das franjas de interferência. O seu desempenho em ambiente com vibração foi muito bom, conseguindo medir em 88% da faixa de frequência analisada em bancada (seção 6.3.3). A utilização de um atuador piezoelétrico com estrutura metálica flexível permitiu a amplificação do deslocamento sem a necessidade de dispor de maior espaço para acomodar o PZT. A grande vantagem da utilização deste atuador é a aquisição contínua de mapas de fase ao longo do curso do PZT, e não somente em uma faixa restrita. O controle de foco e de deslocamento lateral das imagens permitem ajustar o sistema de acordo com as características de aplicação. O sistema obteve bons resultados quando aplicado em medições de campo. Os defeitos se revelaram com ótima nitidez nos interferogramas, facilitando suas identificações, conforme mostrado na Figura 6.44. Este módulo não foi capaz de obter bons resultados em campo quando aplicado em locais com maiores níveis de vibração, conforme mostrado na Figura 6.45.

7.1.4 Quanto ao módulo de formação e aquisição de imagens difrativo

Do ponto de vista de inovação tecnológica, o módulo difrativo é o resultado mais promissor deste trabalho. O nível de compactação obtido na concepção final deste módulo foi um dos principais fatores para o sucesso alcançado por este sistema. A utilização da grade difrativa como dispositivo para deslocamento lateral da imagem foi fundamental para esta compactação. O emprego de poucos elementos e de poucas partes móveis foi essencial para o aumento da robustez do sistema. O desempenho do sistema em ambiente com vibração foi ótimo, conseguido medir em 95% da faixa de frequência analisada em bancada (seção 6.3.3). A estrutura flexível desenvolvida para sustentar a grade difrativa e para produzir o deslocamento de fase atendeu às expectativas de projeto. O sistema obteve baixa sensibilidade de medição. Diante disso, foi necessário aplicar consideráveis variações de pressão para revelar os defeitos. Portanto, a utilização de grades com ângulos de difração um pouco maiores contribuiria para melhorar a capacidade de inspeção do sistema. A impossibilidade de ajustar o deslocamento lateral da imagem é uma desvantagem deste sistema.

7.1.5 Quanto ao funcionamento geral do sistema

O desempenho operacional obtido pelo Colar superou as expectativas de projeto. Todos os requisitos atribuídos ao sistema foram atendidos. Um único operador é suficiente para realizar o transporte e montagem do sistema na tubulação, a qual acontece de forma rápida e segura. A performance do Colar, em ambiente com vibração, foi muito boa, conseguindo realizar medições na maioria das aplicações em que foi submetido, principalmente com a aplicação do sistema difrativo. O método proposto para avaliar a capacidade de inspeção do sistema em determinados níveis de vibração é promissor, porém uma maior quantidade de inspeções, em diferentes condições de vibração, deve ser realizada para validar completamente o método proposto.

O fato do sistema ter realizado inspeções em níveis de deslocamento maiores que os limites encontrados no estudo de decorrelação do *speckle* (seção 6.3.2) provavelmente é relativo ao comportamento dinâmico da medição, onde a relação entre o tempo de aquisição da câmera (*shutter*) e o período de vibração promove uma média dos valores de intensidades registrados, e desta forma os limites de correlação dos valores são amplificados. Uma análise dinâmica e estatística mais aprofundada é necessária para o melhor entendimento do fenômeno.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros relacionados ao tema desta dissertação são apresentadas:

1. Desenvolvimento de dispositivos que promovam o ajuste do deslocamento lateral em sistemas de *shearografia* com grade difrativa.
2. Desenvolvimento de sistemas de arrefecimento de lasers com controle ativo de temperatura.
3. Estudo dos métodos para cálculo de fase do padrão de *speckles* aplicados em sistemas com óptica difrativa submetidos a ambientes com vibração.
4. Desenvolvimento de sistema de compensação de distorções em imagens de superfícies cilíndricas através da projeção de padrões para concatenação dos pontos.
5. Método para compensação, via *software*, do efeito produzido pela decorrelação por translação (seção 6.3.2).

REFERÊNCIAS

- [1] CHAWLA, K. K. **Composite Materials**. New York, NY: Springer New York, 2012.
- [2] MENDONÇA, P. D. T. R. **Materiais Compósitos e Estruturas Sanduíche**. 1ª ed. Florianópolis: Manole, 2005.
- [3] FUJIYAMA, R. T.; SOUZA, A. N.; BASTIAN, F. L. Uso de Materiais Compósitos em Reparos de Dutos de Aço. **2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás**, 2003. Rio de Janeiro.
- [4] TELLES, P. C. S. **Tubulações Industriais: materiais, projeto, montagem**. 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- [5] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS **ASME B31G-1991 Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines**. New York, 1991, 56 p.
- [6] PETROBRAS. **Norma Técnica PETROBRAS N-1487 Inspeção de Dutos Rígidos Submarinos**. 2014, 64p.
- [7] PETROBRAS. **Norma Técnica PETROBRAS N-2098 Inspeção de Dutos Terrestres em Operação**. 2014, 19p.
- [8] PETROBRAS. **Norma Técnica PETROBRAS N-2786 Avaliação de Defeitos em Oleodutos e Gasodutos Terrestres e Submarinos Rígidos em Operação**. 2015, 33p.
- [9] PERRUT, V. A. **Análise de reparo de tubos com defeito transpassante por meio de materiais compósitos**. 2009. 191f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [10] FREIRE, J. L. DE F.; BENJAMIN, A. C.; MENICONI, L.; SOUZA, R. D. Integridade de Dutos. **Engenharia de Dutos**. 1ª ed, 2009. Rio de Janeiro: ABCM.
- [11] MCGEORGE, D.; ECHTERMAYER, A. T.; LEONG, K. H.; et al. Repair of floating offshore units using bonded fibre composite materials. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 40, n. 9, p. 1364–1380, 2009.

- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15921-1:2011 Indústria de petróleo e gás natural - Tubulação de compósito Parte 1: Vocabulário, símbolos, aplicações e materiais**. ABNT, 2011a.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15921-4:2011 Indústria de petróleo e gás natural - Tubulação de compósito Parte 4: Fabricação, montagem e operação**. Rio de Janeiro, 2011b.
- [14] AMERON. **Corrosion-Resistant Fiberglass Piping Systems**. Disponível em: <http://www.nov.com/doc_library.aspx>. Acesso em: 15/6/2015.
- [15] NATIONAL OILWELL VARCO. **Tubulações Bondstrand**. Disponível em: <https://www.nov.com/Segments/Completion_and_Production_Solutions/Fiber_Glass_Systems/Marine_Offshore/Bondstrand_MOS/Bondstrand_MOS.aspx>. Acesso em: 12/6/2015.
- [16] RAMOS, J. E. **Uso da tomografia computadorizada para a análise de defeitos em juntas coladas de tubos de plástico reforçado com fibra de vidro**, 2013. 53f. Monografia (Pós-Graduação Lato Sensu em Engenharia de Equipamentos) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Equipamentos, Sistema Educacional Corporativo da PETROBRAS, 2013.
- [17] MENICONI, L. C. M.; PORCIÚNCULA, I. N.; MCGEORGE, D.; PEDERSEN, A. Structural Repair at a Production Platform by Means of a Composite Material Patch. **Offshore Technology Conference**, , n. OTC 20657, p. 11, 2010.
- [18] MENICONI, L. C. M. Experimental fatigue and aging evaluation of the composite patch repair of a metallic ship hull. **Applied Adhesion Science**, p. 13, 2014.
- [19] SOUZA, J. P. F. M. DE. **Inspeção de defeitos em revestimentos de materiais compósitos aplicados em tanques metálicos utilizando shearografia**, 2012. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.
- [20] SOUZA, R. M. DE. **Sistema de shearografia para inspeção de grandes áreas verticais revestidas por materiais compósitos**, 2015. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

- [21] BUNKER ENGENHARIA ANTICORROSIVA. **Aplicações de Revestimentos**, Disponível em:
<<http://www.bunkerengenharia.com.br/index.php?pg=galeria>>.
Acesso em: 5/9/2015.
- [22] HECHT, E. **Optics**. 4th ed. Addison Wesley, 2001.
- [23] VIOTTI, M. R.; ALBERTAZZI JR., A. **Robust Speckle Metrology**. Bellingham: SPIE, 2014.
- [24] KASUNIC, K. J. **Optomechanical systems engineering**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2015.
- [25] DAINTY, J. C. (ORG.). **Laser Speckle and Related Phenomena**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1975.
- [26] SMITH, W. J. **Modern Optical Engineering**. 4^a ed. New York, NY: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008.
- [27] KAPP, W. A. **Desenvolvimento de uma roseta óptica difrativa para medição de deslocamentos, deformações, tensões mecânicas e tensões residuais mecânicas**, 2010. 227f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- [28] HUNTLEY, J. M. Automated analysis of speckle interferograms. In: P. K. Rastogi (Org.); **Digital speckle pattern interferometry and related techniques**. p.368, 2001. John Wiley & Sons Ltd.
- [29] ALBERTAZZI JR., A.; MENICONI, C. L.; WILLEMANN, D. P.; et al. Detecção de falhas de adesão entre mantas poliméricas e dutos usando interferometria de deslocamento lateral. **CONAEND & IEV 2006 - XXIV Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção. IEV Conferencia Internacional sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida de Equipos Industriales**, 2006. São Paulo.
- [30] STEINCHEN, W.; YANG, L. X.; KUPFER, G.; MÄCKEL, P.; VÖSSING, F. Strain analysis by means of digital shearography: potential, limitations and demonstration. **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v. 33, n. 2, p. 171–182, 1998. Disponível em:
<<http://sdj.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/0309324981512896>>.
- [31] HUNTLEY, J. M.; SALDNER, H. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis. **Applied Optics**, v. 32, n. 17, p. 3047, 1993.

- [32] SILVA, A. P.; SILVA, F. A. A.; WILLEMANN, D. P. Inspeção de defeitos em materiais compósitos utilizando shearografia e excitação por vibração. **CONAEND & IEV 2012 - XXX Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção. 16^a IEV Conferencia Internacional sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida de Equipos Industriales**, 2012. São Paulo.
- [33] STEINCHEN, W.; YANG, L. **Digital shearography: theory and application of digital Speckle pattern shearing interferometry**. Bellingham: SPIE Press, 2003.
- [34] CARL ZEISS OPTOTECHNIK GMBH. **Aplicações**. Disponível em: <<http://optotechnik.zeiss.com/en/products/tire-testing-intact>>. Acesso em: 5/12/2015.
- [35] LABORATÓRIO DE METROLOGIA E AUTOMATIZAÇÃO. **Acervo Fotográfico**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- [36] HUNG, Y. Y.; HO, H. P. Shearography: An optical measurement technique and applications. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 49, n. 3, p. 61–87, 2005.
- [37] WU, S.; HE, X.; YANG, L. Enlarging the angle of view in Michelson-interferometer-based shearography by embedding a 4f system. **Applied optics**, v. 50, n. 21, p. 3789–3794, 2011.
- [38] O'SHEA, D. C.; SULESKI, T. J.; KATHMAN, A. D.; PRATHER, D. W. **Diffraction optics: design, fabrication and test**. Bellingham: SPIE Press, 2004.
- [39] HUNTLEY, J. M. Speckle shearing interferometry using a diffractive optical beamsplitter. **Optical Engineering**, v. 36, n. 5, p. 1488, 1997.
- [40] RABAL, H.; HENAO, R.; TORROBA, R. Digital speckle pattern shearing interferometry using diffraction gratings. **Optics Communications**, v. 126, n. 4-6, p. 191–196, 1996.
- [41] MALACARA, D. **Optica Shop Testing**. 3^a ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [42] RASTOGI, P. K. Measurement of static surface displacements, derivatives of displacements, and three-dimensional surface shapes - Examples of applications to non-destructive testing. In: P. K. Rastogi (Org.); **Digital speckle pattern interferometry and related techniques**. p.368, 2001. John Wiley & Sons Ltd.

- [43] WILLEMANN, D. P.; FANTIN, A.; ALBERTAZZI GONÇALVES, JR., A. Defect assessment of bonded joints of composite tubes using shearography. In: A. Albertazzi Goncalves, Jr.; G. H. Kaufmann (Orgs.); **Speckle 2010: Optical Metrology** . p.73870J–73870J–9, 2010.
- [44] PINTO, T.; SILVA, F.; ALBERTAZZI JR., A. Projeto e avaliação de um sensor óptico por triangulação laser multi linhas para medição robotizada. **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2012.
- [45] LOBONTIU, N. **Compliant mechanisms : design of flexure hinges**. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [46] HIBBELER, R. C. **Resistencia dos Materiais**. 5ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [47] SHIGLEY, J.; MISCHKE, C.; BUDYNAS, R. **Mechanical Engineering Design**. 7th ed. New York, NY, 2004.
- [48] XU, Q.; TAN, K. K. **Advanced Control of Piezoelectric Micro/Nano-Positioning Systems**. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [49] BORN, M.; WOLF, E. **Principles of Optics**. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [50] HE, J.; FU, Z.-F. **Modal analysis**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- [51] FUJITA, T.; NISHIHARA, H.; KOYAMA, J. Blazed gratings and Fresnel lenses fabricated by electron-beam lithography. **Opt. Lett.**, v. 7, n. 12, p. 578–580, 1982. OSA.
- [52] LEHMANN, M. Measurement optimization in speckle interferometry: the influence of the imaging lens aperture. **Optical Engineering**, v. 36, n. 4, p. 1162, 1997.
- [53] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14692-3:2002 - Petroleum and natural gas industries - Glass-reinforced plastics (GRP) piping - Part 3: System design**. 2002.
- [54] KRUTH, J. P.; BARTSCHER, M.; CARMIGNATO, S.; et al. Computed tomography for dimensional metrology. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 60, n. 2, p. 821–842, 2011.

- [55] NORSOK STANDARD. **M-622 - Fabrication and installation of GRP piping systems**. 2005.
- [56] HEIDRICH, R. M. **Controle de Vibrações**. UFSC, 2000.
- [57] RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

APÊNDICE A – Pré-Alinhamento da iluminação laser

Para minimizar os erros inerentes ao processo de fabricação e ao desalinhamento do feixe laser, um pré-alinhamento foi realizado. Esta etapa contempla o posicionamento e fixação da primeira lente de expansão, localizada logo à frente do laser. Utilizou-se uma bancada contendo um alvo graduado e um suporte para acoplamento do excêntrico, conforme mostrado na Figura A.1.

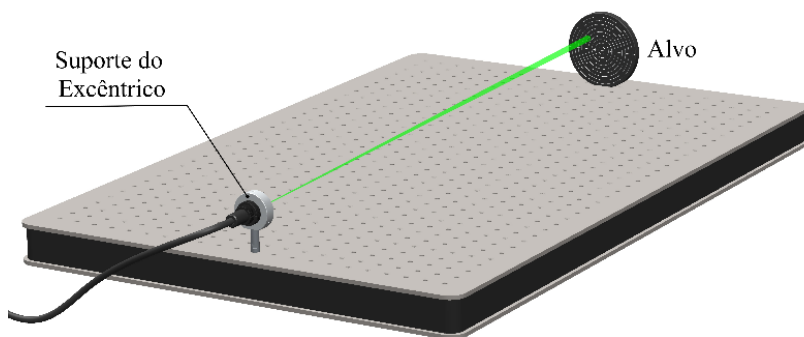


Figura A.1 – Bancada para alinhamento do laser.

Utilizou-se o próprio feixe de laser para promover o alinhamento do eixo do suporte com o centro do alvo. Primeiramente ajustou-se o duplo excêntrico na posição centrada, ou seja, com excentricidades opostamente desalinhadas. Com esse ajuste fixo, promoveu-se a rotação do mecanismo no acoplamento do suporte, monitorando o ponto luminoso produzido na face do alvo. O suporte do excêntrico foi deslocado até o ponto central da rotação coincidir com o centro do alvo, conforme ilustrado na Figura A.2.

Após a orientação do suporte em relação ao alvo, o procedimento de alinhamento da primeira lente foi realizado. A lente foi fixa a um anel de latão, e esse conjunto unido ao suporte excêntrico através de um adesivo à base de resina epóxi. Ainda no período da cura do adesivo, o suporte da lente foi ajustado para promover o alinhamento do feixe expandido com o alvo, conforme ilustrado no item (f) da Figura A.2, até finalizar o processo de colagem.

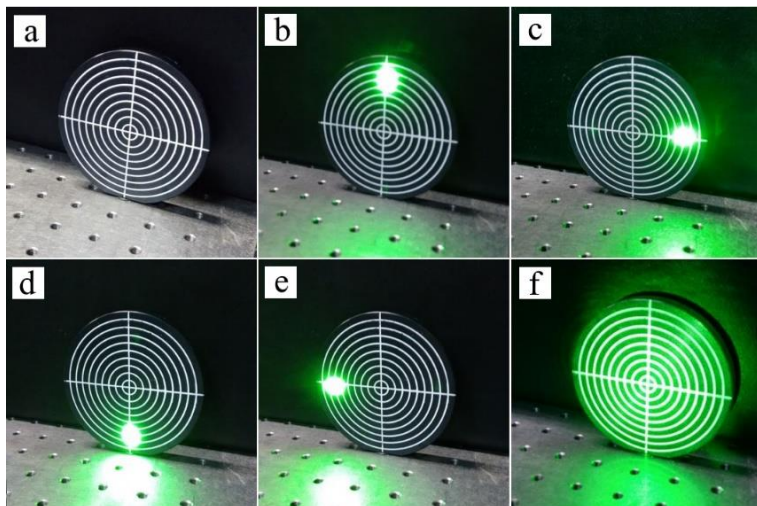


Figura A.2 – Procedimento de alinhamento. (a) Alvo; (b) (c) (d) (e) Rotação do feixe para promover o ajuste do eixo do suporte em relação ao eixo do alvo; (f) Posicionamento da primeira lente promovendo a centralização da região iluminada no alvo, para processo de colagem do suporte frontal.

Após essa etapa, o conjunto suporte laser/lente de expansão 1 foi acoplado à carcaça externa, onde a lente de expansão 2 é montada, conforme Figura A.3. Utilizou-se o ajuste do duplo excêntrico para promover o alinhamento final do feixe com a segunda lente. Os elementos foram travados pelos parafusos de fixação e um selo pontual de adesivo foi aplicado em cada união para garantir a manutenção do ajuste.

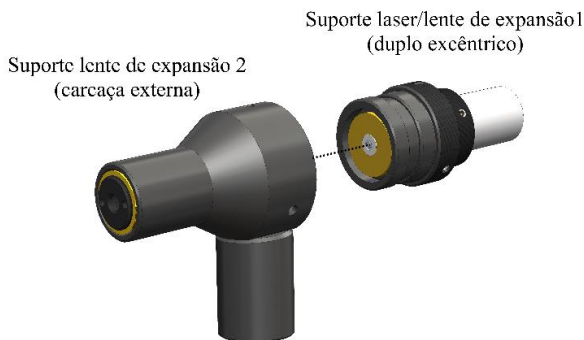


Figura A.3 – Montagem final do módulo de iluminação.

APÊNDICE B – Resultados das inspeções das juntas ponta e bolsa de um spool de compósito de 6”

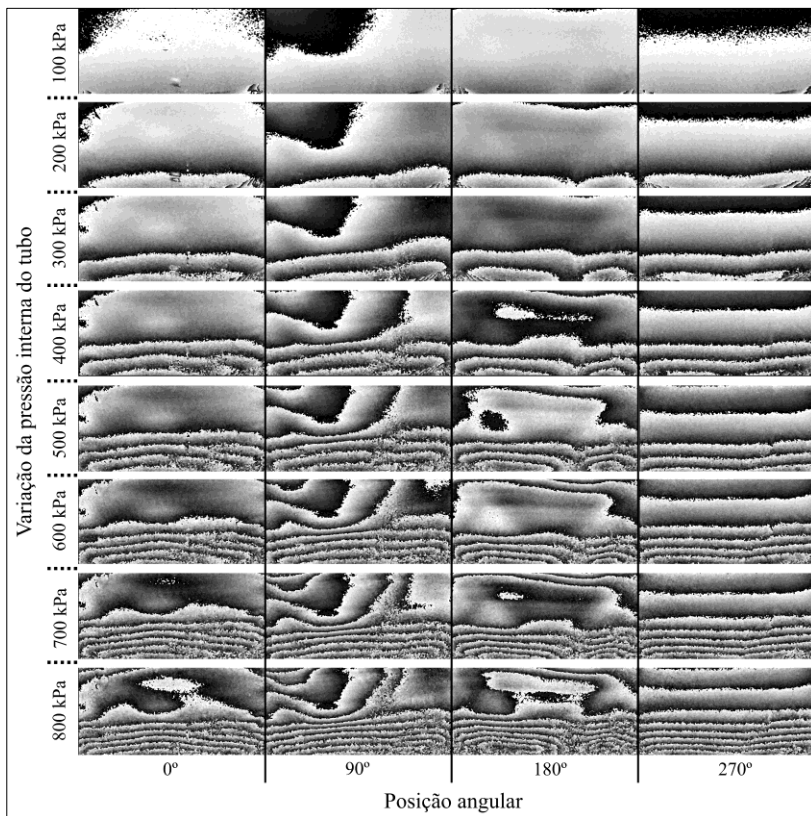


Figura B.1 – Inspeção da Junta J19.

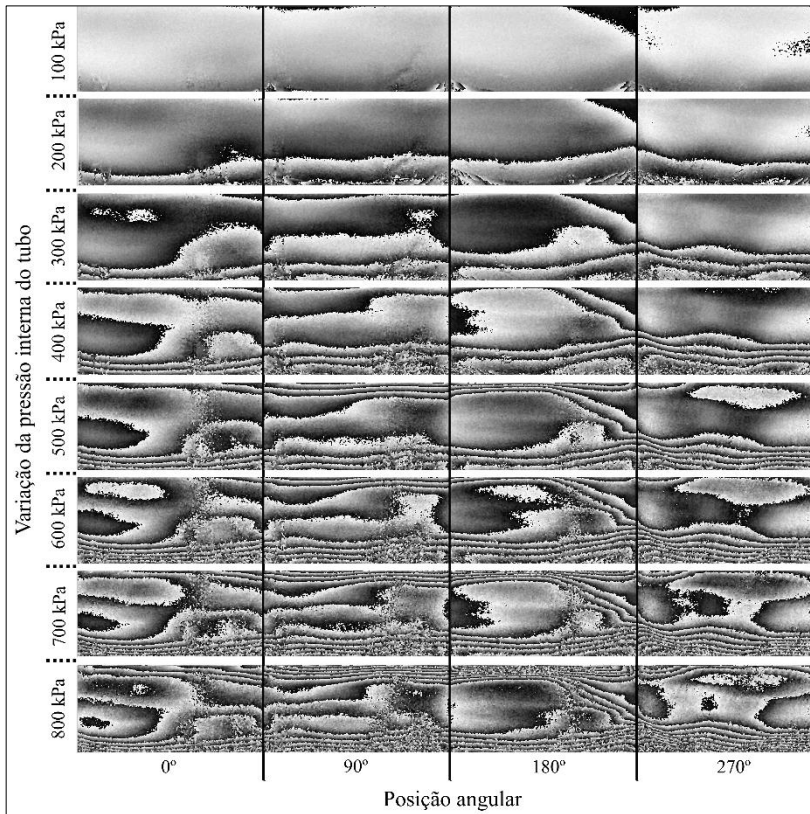


Figura B.2 – Inspeção da Junta J6.

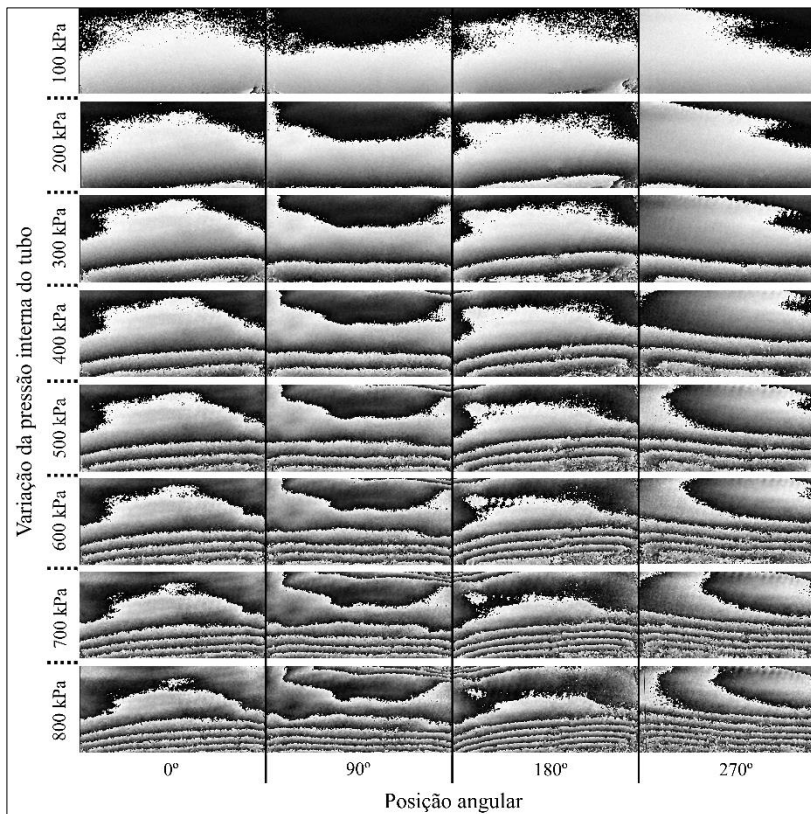


Figura B.3 – Inspeção da Junta J5.

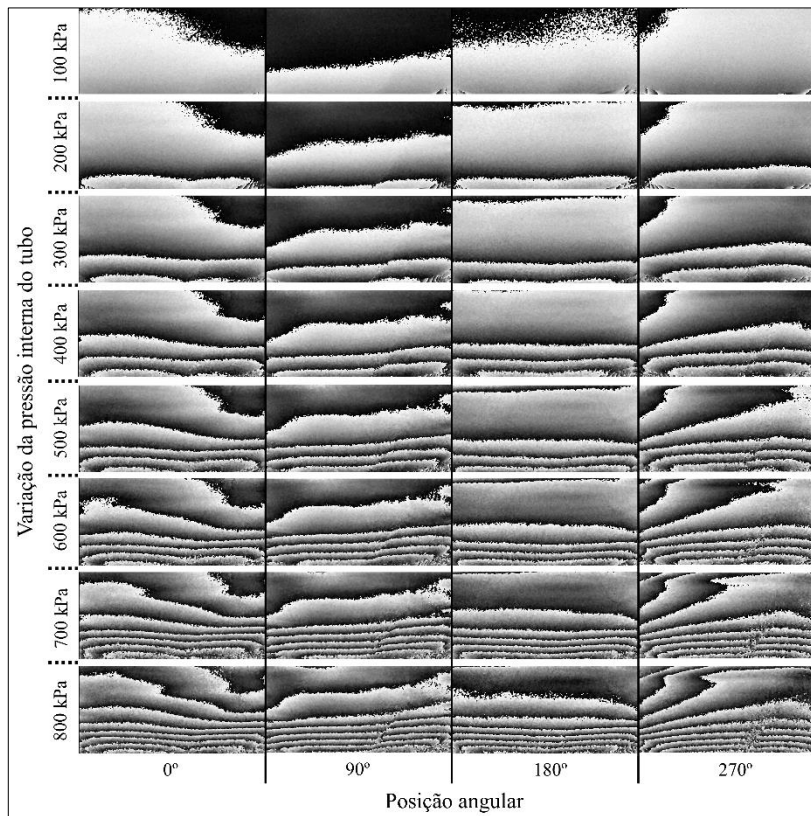


Figura B.4 – Inspeção da Junta J18.