

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

ÁTILA DA SILVA PAES

**PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA ESTIMATIVA DO
TAMANHO DE DEFEITOS EM TUBOS DE AÇO PERFURADOS
E REVESTIDOS COM MATERIAIS COMPÓSITOS
UTILIZANDO SHEAROGRAFIA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na Área de Concentração Metrologia e Instrumentação da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

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

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

Florianópolis
2013

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

Paes, Átila da Silva

Proposta de procedimento para estimativa do tamanho de defeitos em tubos de aço perfurados e revestidos com materiais compósitos utilizando shearografia / Átila da Silva Paes ; orientador, Armando Albertazzi Gonçalves Júnior ; co-orientador, Daniel Pedro Willemann. - Florianópolis, SC, 2013.

153 p.

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

Inclui referências

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

ÁTILA DA SILVA PAES

PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA ESTIMATIVA DO
TAMANHO DE DEFEITOS EM TUBOS DE AÇO PERFURADOS
E REVESTIDOS COM MATERIAIS COMPÓSITOS
UTILIZANDO SHEAROGRAFIA

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, área de concentração Metrologia e Instrumentação, sendo aprovada em sua forma final.

Florianópolis, 18 de outubro de 2013.

Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

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

Banca Examinadora:

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

Analúcia Vieira Fantin, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Sergio Damasceno Soares, Dr. Eng.
PETROBRAS/CENPES

Dedico este trabalho à minha noiva, Angelina Uesato Oshiro,
que, acima de tudo, é uma grande amiga.

Aos membros da minha família, sem os quais eu nada seria:
meus pais, Peterson e Maria Célia,
e meus queridos irmãos,
Claudio e Juliete.

AGRADECIMENTOS

À UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, ao IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis e ao CENPES Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello por me proporcionar essa grande oportunidade e viabilizar o desenvolvimento desse trabalho.

À coordenação e programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina pelo suporte, estrutura e excelente programa de Pós-Graduação público, gratuito e de qualidade.

À FEESC – Fundação de Ensino de Engenharia de Santa Catarina e seus colaboradores, por todo apoio e estrutura.

Ao meu orientador Professor Armando Albertazzi Gonçalves Jr, por me orientar com muita paciência, profissionalismo e, acima de tudo, pelos seus conselhos sempre ponderados, que tanto me fizeram diferença. Um Professor que ensina pelo exemplo.

Ao meu coorientador Professor Daniel Pedro Willemann pela sólida orientação técnica, científica e profissional. Um professor a quem devo grande parte do que aprendi sobre trabalhar na área de Engenharia. Muito obrigado pelo apoio em todas as etapas desse desafio.

À pesquisadora Analúcia Vieira Fantin, pela orientação, apoio, paciência e suporte no projeto e nos softwares, que tanto fizeram diferença no desenvolvimento desse trabalho.

Aos Professores Carlos Alberto Flesch e Gustavo Daniel Donatelli, por minha formação na área de metrologia e instrumentação, e cuja rigidez extrai o melhor de cada aluno, lapidando-os.

Ao Professor Júlio Elias Normey-Rico, coordenador do PRH34 - Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP 034, pela dedicação aos alunos, pela atitude progressista, no sentido do desenvolvimento, aperfeiçoamento, evolução e superação com que conduz este gerador de oportunidades que é o nosso PRH34.

Ao Eng. Sergio Damasceno Soares, coordenador do projeto SHIC pelo CENPES/PETROBRAS pelo apoio, orientação e confiança.

Ao Professor Ney Robson Rohen, pelo total apoio técnico e comercial, sem os quais esse trabalho não seria possível.

A toda equipe de colaboradores do LABMETRO, David Pedro Willemann, Fabricio Luís Broering, Matias Roberto Viotti, Rosana Vieira, e toda equipe de colaboradores da Fundação CERTI.

Aos meus valorosos amigos e companheiros que me acompanharam em todos os momentos nesta jornada acadêmica:

Anderson Pacheco, Clarissa F. M. de Souza, Claudio Schmitz, Cristian Silvano, Diego Langaro, Fábio Silva, Fabrício Borges, Gabriel Probst, João Paulo F. M. de Souza, Mauro Benedeti, Miguel Burg Demay, Milena Victorette, Tiago Cabral e todos os demais que, diariamente, constroem o Laboratório de Metrologia e Automatização.

Aos meus grandes amigos Marisa Elsa Demarchi, Orlando Gonelli, Rudiney Casali, Rodrigo Tiedt e Sergio Tito Godoy, pelo companheirismo, amizade e generosidade.

Aos experientes petroleiros Jorge M. T. Camargo e Álvaro Teixeira, diretores do IBP e que, apesar da agenda sempre lotada, reservaram um precioso tempo para me orientar e direcionar meus próximos passos.

*[...] We shall not flag or fail.
We shall go on to the end, we shall fight in France,
we shall fight on the seas and oceans,
we shall fight with growing confidence and growing strength in
the air, we shall defend our Island, whatever the cost may be,
we shall fight on the beaches,
we shall fight on the landing grounds,
we shall fight in the fields and in the streets,
we shall fight in the hills,
we shall never surrender [...]*

Sir Winston Churchill
“We shall fight them on the beaches”, 1940.

Dizia Abu Iussof Eb-Cassem Iben T'alaba, cheique de Atalaia,
em Rgba El-Khali:

*“Jamais poderia o homem de coração esquecer os bons, os
justos, os leais e os generosos amigos. São eles as verdadeiras dádivas
de Allah.”*

Malba Tahan, Rio de Janeiro-RJ, 1958.

RESUMO

Com objetivo constante de aumentar a produtividade e confiabilidade de suas instalações, juntamente com redução de custos, a indústria de óleo e gás tem utilizado cada vez mais os revestimentos de materiais compósitos como reforços estruturais e inibidores de corrosão. A aplicação de tais revestimentos em campo, muitas vezes, se dá em condições não ideais, acarretando defeitos de adesão e delaminações. Este trabalho explora a utilização da shearografia, uma técnica óptica interferométrica, para inspeção de defeitos e falhas de adesão de revestimentos de materiais compósitos. Para se obter imagens de shearografia com boa definição, o carregamento pela variação da pressão interna da tubulação foi utilizado. Uma metodologia de quantificação do tamanho do defeito a partir de imagens da shearografia foi desenvolvida e os procedimentos de inspeção, bem como parâmetros e condições apropriadas para inspeção em laboratório, foram determinados. A função que melhor correlaciona os parâmetros extraídos da imagem com as dimensões dos defeitos é um polinômio de grau 2, sendo que os seus coeficientes caracterizam a resposta do tipo de revestimento avaliado no escopo deste trabalho. Com isso, é possível se fazer uma estimativa do tamanho do defeito, o que viabiliza acompanhar a evolução da corrosão e/ou descolamento do revestimento em um tubo de aço em região localizada sob a superfície do revestimento compósito. Esses resultados atenderam uma demanda direta da indústria de óleo e gás e do mercado nacional brasileiro.

Palavras-chave: Material compósito. Ensaio não destrutivo. Shearografia. Revestimentos anticorrosivos. Interferometria Óptica. Quantificação de defeitos.

ABSTRACT

Based on the constant objective of increasing productivity and reliability of its facilities, allied with decreasing costs, the oil and gas industry has used more and more composites materials as structural reinforcements and corrosion inhibitors. The application of such reinforcements on field is usually under non-ideal conditions, leading to adhesion and delamination defects. The presented work exploits the usage of shearography, an optical interferometric technique, for flaws and defect inspection of composite materials coatings. In order to obtain shearography images with good quality and definition images, the loading for internal pressure variation was performed. A methodology to quantify the defect size from shearography images was developed and the inspection proceedings, as well as its parameters and appropriated conditions for laboratory inspection, were determined. The function that better correlates the extracted parameters of the image with its defects dimensions is a second degree polynomial function and its coefficients characterize the answer from the type of reinforcement analyzed in this paper. Therefore, it is possible to estimate the defect size, which enables to follow the evolution of the corrosion and/or disbonding between the pipe and composite material in a region located under the surface of the composite. These results attended a direct request from the oil and gas industry and the Brazilian national market.

Keywords: Composite material. Non-Destructive Tests. Shearography. Corrosion Resistant Coatings. Optical Interferometry. Quantifying defects.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema remoto de inspeção visual de tubos de grandes diâmetros.....	38
Figura 2 - Imagem termográfica de um tubo de plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) flangeado, preenchido com água aquecida.....	39
Figura 3 - Imagem "ao vivo" de um tubo de PRFV flangeado que foi analisado com termografia.....	39
Figura 4 - Esquema de ligação do <i>holiday detector</i> e configuração onde acontece abertura de arco causada por falha de continuidade do material entre as placas do capacitor.....	41
Figura 5 - Escova metálica de cerdas macias do fabricante ELMED....	42
Figura 6 - Borracha de contato utilizada em <i>Pigs</i> de inspeção.....	42
Figura 7 - Montagem esquemática de um ensaio radiográfico.....	44
Figura 8 - Comparativo entre radiografia digitalizada (esquerda) e a mesma imagem processada digitalmente (direita).	45
Figura 9 - Imagem 3D reconstruída, onde é evidenciado um defeito....	45
Figura 10 - Componentes básicos de um sistema de tomografia computadorizada.	46
Figura 11 - Montagem do interferômetro de Michelson para holografia.....	47
Figura 12 - Padrão típico de shearografia: Imagem simulada com função matemática.	49
Figura 13 - Padrão típico de shearografia: Imagem obtida com o equipamento de shearografia.....	49
Figura 14 - Representação do perfil de deslocamento similar a uma bolha.....	49
Figura 15 - Representação da derivada do perfil de deslocamento do padrão similar a uma bolha.	50
Figura 16 - Exemplo de padrão de <i>speckle</i>	52
Figura 17 - Formação do <i>speckle</i> objetivo no espaço livre.	52
Figura 18 - Formação do <i>speckle</i> subjetivo.....	53
Figura 19 - Diagrama esquemático para obtenção de interferência.	55
Figura 20 - Arranjo para observação de interferência de duas fontes pontuais monocromáticas.....	56
Figura 21 - Intensidade dos campos superpostos como função da diferença de fase.....	58
Figura 22 - Interferômetro de Michelson.	60
Figura 23 - Franjas geradas por um interferômetro de Michelson.	62
Figura 24 - Configuração do interferômetro de Michelson modificado para uso em shearografia.....	63

Figura 25 - Exemplo de imagem, com deslocamento lateral horizontal, visualizada pelo sistema de shearografia.	63
Figura 26 - Variação de caminho óptico devido à deformação do objeto de estudo.	68
Figura 27 - Vetor sensibilidade de um sistema de shearografia.	69
Figura 28 - Revestimento 7. Sistema operando com baixa sensibilidade (DL e ΔP pequenos).	72
Figura 29 - Revestimento 7. Sistema operando com alta sensibilidade.	73
Figura 30 - Torpedo 2 com DL horizontal.	74
Figura 31 - Torpedo 2 com DL vertical.	74
Figura 32 – Reparo 32. Exemplo de imagem de shearografia com a presença de um defeito (círculo) e um efeito de borda (retângulo).	75
Figura 33 - Configuração simplificada de um ensaio de shearografia.	76
Figura 34 - Bancada de ensaio de shearografia em corpos de prova tubulares.	76
Figura 35 - Módulo de iluminação.	77
Figura 36 - Software <i>Silicom</i> durante inspeção.	79
Figura 37 - Equipamento desenvolvido no LABMETRO–UFSC, denominado “módulo de controle e potência”.	80
Figura 38 - Lâmpada halógena comumente utilizada para carregamento térmico.	84
Figura 39 – Dois exemplares de <i>PZA</i> fixados ao tubo de aço através de cinta de Nylon.	86
Figura 40 - Projeto mecânico do corpo de prova "Flauta 3".	91
Figura 41 - Aspecto geral do tubo com flange soldado.	92
Figura 42 - Vista em corte do projeto das flautas.	93
Figura 43 - Furo com tamponamento.	94
Figura 44 - Aplicação de revestimento sem tamponamento.	94
Figura 45 - Aspecto final de um trecho da flauta com revestimentos compósitos.	95
Figura 46 – Revestimento com mancha devido aos aspectos construtivos da luva compósita.	95
Figura 47 - Aplicação de <i>spray</i> branco fosco para uniformização da superfície.	96
Figura 48 - Ensaio de shearografia realizado sem pintura da superfície.	96
Figura 49 - Ensaio de shearografia realizado com pintura da superfície.	96
Figura 50 - Imagem "ao vivo" capturada no R1. O padrão quadrado branco (equivalente ao deslocamento lateral) é de 16 mm.	104
Figura 51 - Enquadramento da imagem dupla do padrão de 16 mm.	104
Figura 52 - Exemplo de enquadramento de franjas de shearografia no defeito aflorado na superfície do compósito.	106

Figura 53 – Corpo de prova tubular revestido com luva compósita, DL transversal 16 mm, ΔP 15 bar. Ênfase na presença de franjas sobrepostas às de shearografia.	106
Figura 54 - Corpo de prova tubular revestido com luva compósita, DL longitudinal 16 mm, ΔP 15 bar. Não existem franjas devido à geometria sobrepostas às franjas relacionadas ao defeito.	107
Figura 55 - R8, DL 8 mm e ΔP 05 bar. Exemplo de imagem não simétrica.	108
Figura 56 - R15, DL 16 mm e ΔP 20 bar. Imagem com grande número de franjas, contagem impossível a olho nu e limites das franjas difíceis de localizar.	108
Figura 57 - R18, DL 12 mm, ΔP 15 bar. Exemplo de padrão disforme, diferente da figura padrão de shearografia.	109
Figura 58 - Flauta 3: As várias condições de ensaio do Reparo 2, onde tem-se a variação do deslocamento lateral (linhas) e carregamento por decréscimo de pressão (colunas).	113
Figura 59 – Exemplo de imagem classificada como "Não identificado".	115
Figura 60 - Exemplo de imagem classificada como "Regular", com área do defeito destacado.	115
Figura 61 – Exemplo de imagem classificada como "Bom".	116
Figura 62 - Imagem de shearografia com deslocamento lateral na direção vertical.	117
Figura 63 - Imagem de shearografia com deslocamento lateral na direção horizontal.	117
Figura 64 - Gráfico do Diâmetro do furo no tubo em função da Largura da anomalia no campo de deformações aflorada na superfície. Condições: DL 8 mm e ΔP 5 bar.	124
Figura 65 - Gráfico do Diâmetro do furo no tubo em função da Largura da anomalia no campo de deformações aflorada na superfície. Condições: DL 8 mm e ΔP 10 bar.	125
Figura 66 - Gráfico do Diâmetro do furo no tubo em função da Largura da anomalia no campo de deformações aflorada na superfície. Condições: DL 12 mm e ΔP 15 bar.	126
Figura 67 - Gráfico do Diâmetro do furo no tubo em função da Largura da anomalia no campo de deformações aflorada na superfície. Condições: DL 12 mm e ΔP 20 bar.	127
Figura 68 - Gráfico do Diâmetro do furo no tubo em função da Largura da anomalia no campo de deformações aflorada na superfície. Condições: DL 16 mm e ΔP 20 bar.	128
Figura 69 - Projeto mecânico do corpo de prova "Flauta 1".	145
Figura 70 - Projeto mecânico do corpo de prova "Flauta 2".	146

Figura 71 - Projeto mecânico do corpo de prova "Flauta 4".	147
Figura 72 - Processo de injeção de água na Flauta 1.	149
Figura 73 - Processo de expurgo do ar, completamento com óleo e pressurização.....	150
Figura 74 - Corpo de prova posicionado paralelamente à borda do paleta, permitindo melhor controle da distância da superfície medida e o cabeçote de shearografia.....	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Defeitos mais comuns em materiais compósitos.....	35
Tabela 2- Identificação do quadrante de ϕ através dos sinais do argumento da função arco tangente.....	67
Tabela 3 - Características construtivas dos corpos de prova.	89
Tabela 4 - Identificação dos reparos da Flauta 1.....	97
Tabela 5 - Identificação dos reparos da Flauta 2.....	97
Tabela 6 - Identificação dos reparos da Flauta 3.....	98
Tabela 7 - Identificação dos reparos da Flauta 4.....	98
Tabela 8 - Análise da metodologia de identificação de ensaios.	98
Tabela 9 - Total de ensaios realizados nos CP tipo Flauta.	111
Tabela 10 - Classificação qualitativa de identificação dos defeitos sob revestimento compósito do “Produto 2”.	118
Tabela 11 - Resumo comparativo entre os revestimentos 1 e 2, dos fabricantes 1 e 2, respectivamente.....	119
Tabela 12 - Valores de R^2 dos ajustes para os dados das Flautas 2, 3 e 4. DL 12 mm e ΔP 20 bar.....	121
Tabela 13 - Polinômios de grau 2 ajustados para cada uma das espessuras de revestimento, D é o diâmetro em mm do furo passante no tubo de aço e “L” é a largura da anomalia em mm. .	122
Tabela 14 - Normas técnicas vigentes utilizadas para o projeto, montagem e fabricação de vasos de pressão.	153

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- API** – *American Petroleum Institute.*
- CA** – Carregamento por Aquecimento.
- CCD** – (*Charge Coupled Device*) – Dispositivo de Carga Acoplada.
- CP** - Corpo de Prova.
- CPS** - Corpos de Prova.
- DL** - Deslocamento Lateral.
- DPSI** ou **ESPI** – (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) – Holografia Eletrônica.
- END** – Ensaio Não Destrutivo.
- ISO** – *International Organization for Standardization.*
- LABMETRO** – Laboratório de Metrologia e Automatização do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.
- LASER** – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.*
- PIG** – *Pipeline inspection Gauge.*
- PRFV (ou ERFV)** – Polímero (ou Epóxi) Reforçado com Fibra de Vidro.
- PZA** – Atuador Piezoelétrico.
- SHIC** – Shearografia Aplicada à Inspeção de Compósitos.
- SPSI** (*Speckle Pattern Shearing Interferometry*) – Shearografia.
- TC** - Tomografia Computadorizada.
- ΔP** – Variação de pressão manométrica.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	MOTIVAÇÃO.....	27
1.2	OBJETIVOS.....	28
1.3	MÉTODOS.....	28
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	29
2	MATERIAIS COMPÓSITOS	31
2.1	VISÃO GERAL.....	31
2.2	DEMANDAS DA INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS	32
2.3	POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA.....	32
2.3.1	Vantagens e desvantagens dos materiais compósitos	33
2.3.2	Revestimento compósito utilizado nos corpos de prova	34
2.4	DEFEITOS EM REPAROS COMPÓSITOS	35
2.5	TÉCNICAS DE INSPEÇÃO EM MATERIAIS COMPÓSITOS 37	
2.5.1	Inspeção Visual.....	37
2.5.2	Termografia	38
2.5.3	Holiday detector.....	40
2.5.4	Ultrassom	43
2.5.5	Radiografia Industrial.....	43
2.5.6	Tomografia Computadorizada.....	45
2.5.7	Holografia.....	46
2.5.8	Shearografia.....	47
3	<i>SPECKLE LASER</i>.....	51
4	A TÉCNICA DE SHEAROGRAFIA.....	55
4.1	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	55
4.1.1	Princípio da superposição.....	55
4.1.2	Interferômetro de Michelson	59
4.1.3	Interferômetro de Michelson modificado para shearografia	62
4.1.4	Diferença de fase.....	64
4.1.5	Deslocamento de fase.....	65
4.1.6	Considerações sobre a sensibilidade de um sistema de Shearografia.....	67
4.1.7	Processamento das Imagens	71
4.1.8	Interpretação das imagens.....	72
4.2	COMPONENTES DE UM SISTEMA DE SHEAROGRAFIA.	75

4.2.1	Módulo de iluminação.....	77
4.2.2	Módulo de aquisição de imagens.....	78
4.2.3	Módulo de carregamento.....	80
4.3	TÉCNICAS DE CARREGAMENTO.....	80
4.3.1	Carregamento mecânico.....	82
4.3.2	Carregamento por pressurização.....	82
4.3.3	Carregamento térmico.....	83
4.3.4	Carregamento vibracional.....	86
5	CORPOS DE PROVA.....	89
5.1	PROJETO.....	89
5.2	CONSTRUÇÃO.....	92
5.3	REPAROS COMPÓSITOS.....	92
5.4	PREPARAÇÃO PARA ENSAIOS.....	95
5.4.1	Tratamento da superfície.....	95
5.4.2	Identificação dos reparos.....	96
5.4.3	Método de nomeação de ensaios.....	98
6	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	101
6.1	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	101
6.2	PROCEDIMENTO DE ENSAIO.....	102
6.3	EXTRAÇÃO DE DADOS.....	103
6.3.1	Conversão pixel-milímetro.....	103
6.3.2	Determinação das dimensões da área com franjas.....	105
6.3.3	Dificuldades encontradas.....	107
7	AVALIAÇÕES E RESULTADOS.....	111
7.1	AVALIAÇÃO QUALITATIVA.....	111
7.1.1	Equivalência entre as variáveis da sensibilidade.....	111
7.1.2	Classificação das figuras de shearografia afloradas na superfície.....	114
7.2	AVALIAÇÃO QUANTITATIVA.....	120
7.2.1	Interpretação dos gráficos.....	120
7.2.2	Gráficos.....	122
7.2.3	Aplicação do método.....	129
7.2.4	Exemplo de aplicação.....	129
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	131
8.1	ASPECTOS POSITIVOS.....	131
8.2	LIMITAÇÕES E SUGESTÕES DE MELHORIAS.....	132
8.3	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	133

8.3.1	Tabela para carregamento por aquecimento	133
8.3.2	Projeto e construção de novos corpos de prova	134
8.3.3	Ensaio de revestimentos de outros fornecedores.....	134
8.3.4	Avaliar a evolução da corrosão	135
8.3.5	Aquisição e análise de dados.....	135
8.3.6	Fase pós projeto	136
	REFERÊNCIAS	137
	APÊNDICE 1: VETOR DE <i>POYNTING</i> E IRRADIÂNCIA	143
	APÊNDICE 2 : CORPOS DE PROVA CP1, CP2 E CP4.....	145
	APÊNDICE 3: PROCESSO DE PRESSURIZAÇÃO.....	149
	APÊNDICE 4: CONSIDERAÇÕES SOBRE A TAMANHO DE NOVOS CORPOS DE PROVA	151

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A utilização de revestimentos construídos de materiais compósitos tem crescido na indústria de óleo e gás. Os mesmos têm como funções principais atuarem como reparos, reforços estruturais e inibidores de corrosão, sendo que a aplicação em campo costuma acontecer sob condições não ideais. Eventualmente, falhas no processo de aplicação podem gerar bolhas de ar, delaminação e falta de adesão entre o material compósito e a parede do tubo, quantidade insuficiente de resina e inclusões [1].

Existem casos em que o reparo é aplicado sobre tubulações de aço com perda severa de espessura em alguns pontos, chegando a haver furos nos casos extremos. Ao se aplicar um revestimento compósito em uma situação como essa, o tempo de vida útil desse trecho de tubulação é prolongado, acarretando em uma expressiva economia de recursos e tempo [2]. Entretanto, somente a aplicação do material compósito não impede que a corrosão continue agindo na tubulação de aço de dentro para fora¹ e, progressivamente, aumente o tamanho do furo. Nesses casos, faz-se necessária uma metodologia de avaliação da evolução do tamanho dos furos nos tubos de aço com revestimento compósito, a fim de se avaliar a integridade do mesmo, ter controle sobre sua segurança, da planta e se fazer um plano de manutenção mais confiável e bem fundamentado, otimizando os recursos e tempo empregados em paradas programadas ou não programadas [1] [3].

A shearografia é uma técnica óptica de inspeção não destrutiva que utiliza laser e processamento de imagens para medição sem contato de pequenas deformações em superfícies, que pode ser empregada na detecção de falhas internas em estruturas de materiais compósitos. Uma excitação externa aplicada à estrutura é necessária ao processo de inspeção. O aquecimento da superfície e a variação da pressão interna em tubulações são as formas mais utilizadas [3] [4].

O diagnóstico da qualidade de reparos de materiais compósitos aplicados em tubos metálicos é uma das aplicações possíveis para essa técnica. A identificação de um defeito interno, isto é, sob a superfície, torna-se cada vez mais difícil com o aumento da espessura do revestimento aplicado ao tubo, visto que a técnica detecta defeitos a

¹ E de fora para dentro, caso o revestimento compósito apresente uma falha de adesão na interface com o substrato metálico.

partir de anomalias no campo de deformações que afloram na superfície da peça [5].

Para se obter imagens de shearografia com boa definição de contornos de franja, utilizadas para identificação e quantificação dos defeitos, o carregamento resultante da variação da pressão interna da tubulação pode ser utilizado. Um procedimento de quantificação do tamanho do defeito a partir das imagens de shearografia é necessária, dado que não existe uma metodologia ou procedimento para este fim que seja divulgado na literatura técnica. É necessário também determinar valores ótimos² dos parâmetros de ensaio dentro de um intervalo aplicável em laboratório e em campo. As condições favoráveis para inspeção em cada caso precisam ser levantadas.

Este trabalho foi desenvolvido com a utilização de corpos de prova tubulares, com a utilização de um revestimento comercial denominado “Revestimento 2”, do “Fabricante 2”. Tais nomes não puderam ser revelados devido a termos contratuais.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral é desenvolver e avaliar um procedimento, usando shearografia, capaz de determinar diâmetros de furos passantes existentes em tubulações metálicas sob reparos construídos de múltiplas camadas de materiais compósitos.

Os objetivos específicos são:

- 1) Determinar os limites de aplicabilidade do procedimento desenvolvido no que diz respeito ao tamanho dos furos e espessura do revestimento compósito aplicado;
- 2) Sistematizar e compilar uma lista de recomendações para utilizar o procedimento desenvolvido, levando em conta a determinação de parâmetros, limites e procedimentos de operação, bem como recomendações para identificar falsos positivos e falsos negativos.

1.3 MÉTODOS

As seguintes etapas foram executadas durante a realização deste trabalho:

- 1) levantamento junto a profissionais da área, sobre os diâmetros e demais características dos tubos mais utilizados para transporte

² Dentro de um conjunto limitado de valores previamente determinados e que foram utilizados para realização dos ensaios deste trabalho.

- de fluidos em ambiente *offshore*, além dos tipos e dimensões de defeito a serem ensaiados;
- 2) projeto e construção de corpos de prova revestidos com diferentes espessuras de material compósito, contendo furos de diâmetros conhecidos, simulando assim defeitos de perda de espessura devido à corrosão;
 - 3) especificação e teste do sistema de carregamento por pressurização para inspeção dos defeitos;
 - 4) planejamento e realização de ensaios piloto em um dos corpos de prova, para levantar as melhores condições de ensaio e melhor planejar o número e condições dos ensaios necessários aos demais corpos de prova;
 - 5) realizar ensaios nos demais corpos de prova;
 - 6) analisar e interpretar os dados coletados nos ensaios dos quatro corpos de prova;
 - 7) através da experiência adquirida, compilar uma lista de recomendações e melhorias para os trabalhos futuros em tubulações revestidas com material compósito de outros fabricantes, a fim de se montar uma base de conhecimento sobre inspeção dos produtos existentes no mercado.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 2 tem o objetivo de fazer uma discussão sucinta sobre materiais compósitos, suas aplicações na indústria de óleo e gás, seus defeitos mais comuns e as técnicas de inspeção utilizadas na atualidade.

No capítulo 3 são discutidos, brevemente, alguns conceitos relacionados ao fenômeno de *speckle laser* e suas características intrínsecas. Essa fundamentação é importante para a discussão da técnica utilizada neste trabalho.

A técnica de shearografia é discutida um pouco mais profundamente no capítulo 4. Tal discussão vem ao encontro da complementação dos trabalhos anteriores realizados no LABMETRO, focando em uma abordagem um pouco mais formal, em termos do modelamento do fenômeno.

No capítulo 5 são apresentadas todas as fases que levaram a materialização dos corpos de prova: planejamento e as etapas de projeto, construção e aplicação das luvas compósitas.

No capítulo 6 são descritos os procedimentos seguidos nos ensaios, a metodologia de extração de dados numéricos das imagens de shearografia e a correção desses dados para um determinado valor de

deslocamento lateral (DL), bem como as dificuldades encontradas durante o processo de inspeção.

No capítulo 7 é feita a interpretação de resultados, tanto a qualitativa quanto quantitativa. Os modelos numéricos desenvolvidos para o revestimento usado nos corpos de prova são apresentados e comparados. Com o modelo mais adequado é possível determinar a extensão (diâmetro) de furos sob revestimentos compósitos. O procedimento para utilização de tal modelo é descrito, sendo esse de fundamental importância, uma vez que refletirá diretamente nas decisões tomadas em campo.

No capítulo 8 são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros. Dá-se ênfase a este capítulo, uma vez que os resultados e, em especial, o modelo polinomial apresentado nesse trabalho, servirão de base para futuras inspeções em corpos de prova semelhantes, mas utilizando revestimentos de outros fabricantes.

No apêndice 1 são apresentados alguns cálculos auxiliares relacionados à dependência da intensidade luminosa em relação ao vetor campo elétrico [6].

O apêndice 2 contém os três demais projetos dos corpos de prova tipo Flauta, são eles: Flauta 1, Flauta 2 e Flauta 4.

No apêndice 3 é apresentado o processo de pressurização dos corpos de prova, realizados no Instituto do Petróleo, Gás e Energia – INPETRO, Florianópolis-SC.

2 MATERIAIS COMPÓSITOS

2.1 VISÃO GERAL

Os materiais de engenharia podem ser classificados, basicamente, como metais, polímeros e cerâmicos, além de uma quarta categoria, nomeada de material compósito, ou simplesmente, compósito [7] [8]. Apesar de não haver uma definição muito clara, costuma-se utilizar algo como “uma combinação macroscópica de dois ou mais materiais de classes ou propriedades distintas e tem por objetivo atingir propriedades conjugadas e/ou específicas para uma determinada aplicação” [9] [10]. O material compósito tem propriedades e desempenho superiores que cada um dos constituintes tomados separadamente [11] [12].

Um dos principais motivos que levaram os compósitos a serem largamente utilizados na indústria é o fato de se atingir combinações que não são encontradas em materiais convencionais da classe polimérica, cerâmica ou metálica [7], oferecendo ao projetista a combinação de propriedades não disponíveis em matérias tradicionais.

É possível introduzir fibras em matrizes poliméricas em regiões altamente solicitadas em certas posições, direção e volume a fim de se obter a máxima eficiência de certo reforço e, então, com o mesmo elemento, reduzir o reforço a um valor mínimo nas regiões com menor solicitação mecânica. As vantagens comuns dos compósitos são sua baixa densidade, resistência à corrosão, propriedades mecânicas (limite de resistência, limite de escoamento, módulo de elasticidade, resiliência), resistência à fadiga, melhoria das propriedades referentes à tenacidade e à fratura, resistência a impactos, dentre outras [7] [8] [10] [11]. Isso implica grande eficiência em construção, comparado com materiais mais convencionais e, por esses motivos, têm sido largamente utilizados como meio de melhoria da integridade de estruturas, garantindo maior vida útil e maior segurança operacional.

Os materiais compósitos são compostos, normalmente³, por duas fases: a contínua (matriz) e a dispersa⁴, que traz consigo um acréscimo de desempenho nas propriedades do material como um todo [11]. No caso de interesse desse trabalho, que trata de reparos e reforços

³ Mas não exclusivamente. Pode haver mais de um tipo de matriz e mais de um tipo de reforço.

⁴ Também referida como “reforço” quando se trata de aplicações com fins estruturais.

estruturais, as propriedades de maior interesse são: baixa densidade, resistência à fadiga e à corrosão.

2.2 DEMANDAS DA INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS

Segundo [2], entre os anos de 1970 e 2000, as tubulações foram as maiores responsáveis pelas perdas resultantes de sinistros na indústria petroquímica. O histórico de perdas é de 46% devido a tubulações, 26% em permutadores, 6% em caldeiras, 4% em bombas e o restante, quase uniformemente distribuídos entre vasos de pressão, navios de apoio a plataformas, torres, reatores, fornos, tanques e outros.

As plantas instaladas de refinarias e instalações de armazenamento de óleo, gás, biocombustíveis e derivados costumam ter tubulações enterradas e aéreas com longos trechos retos e curvas suaves. Sendo assim, a maioria das inspeções neste tipo de ambiente costuma ser através de equipamentos denominados *Pipeline inspection Gauge* (PIG), dada sua tecnologia bem estabelecida, robusta e confiável. Os tipos mais utilizados de PIG são espuma, copo, esfera, escova e os instrumentados, como o geométrico, de dispersão de fluxo magnético, ultrassônico e topográfico [2].

Já o ambiente *offshore* é praticamente não “pigável”⁵ e grande parte da corrosão acontece no exterior da tubulação [2] [3], dada à presença de umidade, oxigênio e metal exposto [2] [7]. Sendo assim, o emprego de materiais compósitos de matriz polimérica como reparo e reforço em estruturas nas indústrias do petróleo tem se tornado uma prática industrial comum. O uso destes reforços compreende desde o recobrimento de superfícies com defeitos, passantes ou não, até o reforço estrutural. Na última década, muitos estudos foram feitos para o desenvolvimento de uma metodologia alternativa para reforço e reparo de dutos com materiais compósitos. Em 2006, a *International Organization for Standardization* (ISO) apresentou a primeira especificação técnica de “Reparo em Compósito para dutos das indústrias de Petróleo, Petroquímica e de Gás Natural – Qualificação, projeto, instalação, testes e inspeção” – ISO/TS 24817.

2.3 POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA

Compósitos de matriz polimérica reforçadas com fibra têm sido bastante utilizados para fins estruturais, em virtude de sua alta

⁵ Jargão utilizado na indústria de óleo e gás para denominação de tubulação onde não é possível se fazer a inspeção através de PIG.

resistência e rigidez específicas e baixa densidade. Outro fator importante é sua resistência à corrosão em transporte de soluções aquosas. Por esses motivos, o uso desses materiais vem constantemente substituindo o uso de equivalentes metálicos [7].

Os compósitos de resina Epóxi Reforçados com Fibra de Vidro (ERFV)⁶, tem sido utilizados em inúmeras aplicações industriais. Na indústria de petróleo suas principais aplicações são em tubulações metálicas, reparos em tubulações, vasos de pressão e componentes estruturais. A utilização se dá em ambientes tanto *onshore* como *offshore*, onde as intempéries e corrosão são intensas [7] [10]. Particularmente, tubulações e reparos de ERFV são fortemente imunes aos efeitos danosos do sulfeto de hidrogênio⁷ (H₂S) e dióxido de carbono (CO₂) [13].

2.3.1 Vantagens e desvantagens dos materiais compósitos

Compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras têm grande vantagem de combinação de propriedades de diferentes materiais para propriedades diversas (aspecto multifuncional), com alta flexibilidade de escolhas de matrizes e fases dispersas. A característica de alta resistência e rigidez específica (economia de peso entre 25 e 50% em relação aos materiais metálicos), resistência à corrosão em variados meios, baixo coeficiente de expansão térmica, ótimas propriedades de resistência à fadiga e tenacidade à fratura, estão dentre as principais vantagens no uso desse tipo de material [7].

As desvantagens também são diversas: baixa resistência térmica (comparada aos materiais metálicos e cerâmicos), anisotropia elevada e alto custo de materiais e processos de fabricação (o mais significativo). Atualmente tem-se pouco conhecimento estabelecido sobre desempenho mecânico de materiais compósitos a longo prazo, sendo os aspectos mais importantes os danos por impacto e fadiga. Os mecanismos de fratura são muito mais complexos que nos materiais metálicos (amplamente estudados) e os métodos para ensaios não destrutivos são bastante complicadas. A reciclagem costuma ser um problema sério e, atualmente, não se tem tecnologia viável economicamente para reciclagem química, sendo o descarte uma dificuldade ambiental [7] [8] [10] [11].

⁶ Também conhecidas como GRE (*Glass Reinforced Epoxy*).

⁷ Na indústria do petróleo o H₂S costuma estar presente nos reservatórios de petróleo e nos campos onde há injeção de água do mar.

2.3.2 Revestimento compósito utilizado nos corpos de prova⁸

Os componentes presentes no compósito são:

1. Tecido

O sistema de reparo é composto por um tecido bidirecional de fibra de vidro. O tecido possui uma trama de 2:1 (66,6% fibras no sentido longitudinal e 33,3% de fibras no sentido transversal) e uma densidade superficial de 380 g/m²⁹.

2. Resina

A resina de laminação é do tipo epóxi, bicomponente, com tempo de cura de 2 horas à temperatura ambiente. A temperatura de trabalho foi definida através do ensaio em Análise Mecânica Dinâmica - DMA¹⁰.

3. Primer

Trata-se de um adesivo epóxi a ser aplicado na interface substrato/laminado de reparo. Esse adesivo possui alta viscosidade, o que permite sua aplicação na superfície com utilização de espátulas sem que o mesmo venha a escorrer. Tem como funções: nivelar a superfície, que muitas vezes pode ter sofrido amassamentos ou perda acentuada da espessura; melhorar a adesão na interface substrato/laminado de reparo, garantindo a transferência de carga do substrato para o laminado de reparo.

4. Promotor de adesão

Agente químico responsável pela melhoria na adesão na interface substrato/primer.

⁸ O texto desse tópico foi informado pelo fabricante das luvas compósitas presentes nos corpos de prova utilizados nesse trabalho. O nome da empresa, dos produtos, suas propriedades físicas, dados técnicos e referências bibliográficas não puderam ser revelados por motivos contratuais.

⁹ As demais propriedades físicas não puderam ser divulgadas por motivos de sigilo contratual.

¹⁰ “A Análise Mecânica Dinâmica é uma técnica de grande precisão para medir as propriedades viscoelásticas dos materiais. Esta consiste na aplicação de uma deformação sinusoidal a uma amostra e na medição da força resultante transmitida por essa última com a ajuda de um Analisador Mecânico Dinâmico, que é um instrumento bastante polivalente. Este permite a realização de análises automatizadas aplicando uma excitação dinâmica controlada em frequência e amplitude a uma amostra, dentro das condições definidas pelo operador” [38].

2.4 DEFEITOS EM REPAROS COMPÓSITOS

A ocorrência de defeitos em reforços compósitos, assim como em todos os materiais, pode se dar em diferentes passos do processo de manufatura, durante a instalação e comissionamento ou durante a vida em serviço. Tradicionalmente, a inspeção realizada pelos fabricantes constitui-se de uma combinação de ensaios visuais, controles dimensionais e testes hidrostáticos. Estes métodos não são factíveis na inspeção em serviço, ou não fornecem todas as informações necessárias, fazendo-se importante se investir em outras técnicas de avaliação [14].

Comparados com os metais, os compósitos se apresentam muito mais susceptíveis a danos, que podem ocorrer durante as fases de processamento da matéria prima, fabricação da peça, manuseio, transporte e armazenamento. Estes danos possuem diversas formas como descontinuidades das fibras, porosidade, delaminações, áreas pobres ou ricas em resina. Podem surgir também em operações que envolvam abrasão e/ou erosão [8] [15] [16].

Segundo [8], o defeito mais comum encontrado na área em estudo deste trabalho é a delaminação, que pode ser originada também por mau processamento do material compósito ou até da resina, gerando assim uma cura imperfeita. A delaminação pode ser ocasionada ainda por propagação de trinca ocasionada por esforço ou até por ação química de corrosão. Esta trinca pode conduzir a uma infiltração no revestimento e gerar um deslocamento do material compósito em seu substrato, que pode ser outra camada de compósito ou até uma base metálica onde este foi aplicado [15] [16].

A Tabela 1 apresenta os defeitos mais comuns em materiais compósitos:

Tabela 1 - Defeitos mais comuns em materiais compósitos.

Defeito	Especificação
Laca	Um pequeno pedaço quebrado na borda ou na superfície.
Rachadura	Separação real do laminado, visível na superfície oposta, e se estendendo através da espessura.
Microrrachaduras	Rachaduras finas na superfície ou sob a superfície de um laminado.
Delaminação de borda	Separação das camadas de materiais à beira de um laminado.

Delaminação interna	Separação das camadas de um material em um laminado.
Inclusões (metálico)	Partículas metálicas incluídas em um laminado.
Inclusões (não metálicas)	Partículas não metálicas incluídas no laminado.
Fratura	Ruptura da superfície do laminado sem penetração total.
Bolha de ar	Aprisionamento de ar dentro e entre as camadas de reforço.
Queimaduras	Apresenta indícios de decomposição térmica, descoloração.
Olho de peixe	Massa globular pequena que não se misturou completamente no material circundante.
Falta de resina	Uma área, ocorrendo geralmente na beira de um plástico laminado, onde o reforço não foi molhado com resina.
Casca de laranja	Superfície irregular que se assemelha a uma casca de laranja.
Borbulha	Pequena elevação, aguda, ou crônica na superfície de um laminado.
Pites	Cratera na superfície de dimensão da mesma ordem de grandeza que sua profundidade.
Porosidade	Presença de numerosos poços visíveis.
Pré gel	Uma camada extra não intencional, da resina curada em uma parte da superfície do laminado.
Resina de bolso	Um acúmulo aparente de excesso de resina em uma pequena área localizada dentro do laminado.
Resina de borda	Insuficiente material de reforço na borda de peças moldadas de laminado.
Depressão	Depressão na superfície de um laminado moldado onde tem recolhido a partir do molde.
Fenda	Alongado aprisionamento de ar que é dentro ou perto da superfície de um laminado e pode ser coberta por uma fina película de resina curada.

Rugas	Em uma estratificação, uma imperfeição que tem a aparência de uma onda moldado em uma ou mais lonas de tecido ou outro material de reforço.
-------	---

Fonte: [8] [17].

2.5 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO EM MATERIAIS COMPÓSITOS

Os tipos de ensaios mais utilizados em materiais compósitos são os Ensaios Não Destrutivos (END), que são caracterizados por avaliar a qualidade de materiais, acabados ou não, sem lhes causar danos [16] [18]. Os END são executados nas etapas de fabricação, construção, montagem, manutenção e nas inspeções periódicas. Incluem métodos capazes de proporcionar informações a respeito dos defeitos ou descontinuidades de um determinado produto, das características tecnológicas de um material, ou ainda, da monitoração da degradação em serviço de componentes, equipamentos e estruturas, sem a alteração dos materiais. Para cada tipo de estrutura é utilizado um END adequado [7]. Eles contribuem para a integridade e confiabilidade de equipamentos e processos, através da garantia da qualidade, redução de custos e aumento da confiabilidade.

As principais técnicas utilizadas em materiais compósitos são abordadas brevemente neste texto. São elas: inspeção visual, termografia, *holiday detector*, ultrassom, radiografia industrial, tomografia computadorizada, holografia e shearografia.

2.5.1 Inspeção Visual

A inspeção visual foi provavelmente o primeiro ensaio não destrutivo usado pelo homem, mas continua sendo o mais usado e geralmente precede qualquer outro ensaio. A sua principal vantagem é fornecer dados qualitativos e quantitativos¹¹ mais fácil e diretamente que os outros END. Alguns testes são baseados nas leis da óptica geométrica e outros fazem uso das propriedades ondulatórias da luz [19]. Este ensaio tem sido usado principalmente para a inspeção de:

- 1) Superfícies expostas ou acessíveis de materiais opacos e equipamentos parcial ou totalmente montados e objetos acabados;
- 2) Interior de objetos transparentes ou translúcidos, como o vidro, quartzo, alguns plásticos, além de líquidos e gases.

¹¹ Por exemplo, o tamanho de um defeito externo.

Para determinação do tamanho, forma cor, acabamento, refletividade, presença de descontinuidades superficiais grosseiras e funcionalidade, usando a visão a olho nu ou com o auxílio de instrumentos simples como lupas e gabaritos ou sofisticados aparelhos como interferômetros, microscópios, telescópios e sistemas remotos para visualização de tubulações, Figura 1.

A avaliação crítica das cores e variações destas é um dos princípios básicos em quase todos os tipos de inspeção visual. Corrosão e oxidação de metais e ligas ou deterioração de materiais orgânicos geralmente estão associados com variações de cores [19].

Devido a sua natureza intrínseca, essa é a inspeção que mais depende da experiência e habilidade do inspetor. A metodologia é rápida e serve como uma primeira etapa de controle de qualidade, gerando economia de tempo e recursos [20].

Figura 1 - Sistema remoto de inspeção visual de tubos de grandes diâmetros.



Fonte: [2].

2.5.2 Termografia

Tratando-se da técnica de detecção de defeitos, a termografia pode ser classificada como passiva ou ativa [5]. A passiva capta a radiação emitida naturalmente (Figura 2) do corpo avaliado (Figura 3), e relaciona a distribuição dessa radiação em função das falhas. A ativa se dá pela aplicação controlada de cargas térmicas externas no corpo de prova, captando sua distribuição da temperatura da superfície [7].

O ensaio termográfico, comumente, tem sido utilizado para observação remota do perfil de temperaturas das superfícies dos corpos

sob exame, sem inserção deliberada de calor nos mesmos, sendo o contraste visual da imagem gerado pelo gradiente térmico espontaneamente existente. Esta metodologia poderia ser caracterizada como termografia passiva comparativa. Com seu emprego, havendo gradiente natural de temperatura, podem-se detectar áreas com redução de espessura, poros, inclusões e danos de impacto. Regiões sujeitas à concentração de tensão em processos de fadiga, antes mesmo da nucleação da trinca, também podem ser distinguidas. O esforço mecânico gera o gradiente térmico, perceptível mesmo em espessuras de parede da ordem de 20 mm [21] [14].

Figura 2 - Imagem termográfica de um tubo de plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) flangeado, preenchido com água aquecida.



Fonte: [8].

Figura 3 - Imagem "ao vivo" de um tubo de PRFV flangeado que foi analisado com termografia.



Fonte: [8].

O uso do ensaio termográfico para a inspeção de materiais compósitos tem sido bastante frequente, desta forma, a técnica desponta como uma alternativa bastante promissora, havendo espaço, inclusive, para o emprego da chamada termografia ativa, na qual o objeto é exposto a uma excitação térmica controlada, seguida da aquisição de dados (imagens/termogramas) ao longo do tempo. A baixa difusividade térmica dos compósitos de matriz polimérica foi um dos motivos que permitiu o emprego de câmeras termográficas convencionais no trabalho com termografia ativa.

Importante destacar que nem todos os defeitos detectáveis pela técnica ativa serão observados em tempo real, isto é, durante a aquisição dos termogramas. Há limites dimensionais de defeitos (tamanho e profundidade relativa) a partir dos quais torna-se necessário o emprego de algoritmos de tratamento de imagens para que os defeitos sejam percebidos nos termogramas. Estes limites dependem do material e

podem ser determinados analiticamente. Porém, mesmo sem o emprego de análises matemáticas e tratamento de imagens, a simples inserção controlada de calor em uma amostra, dentro de uma dada faixa de espessuras, pode ser suficiente para aumentar a detectabilidade da termografia, com a observação dos defeitos diretamente através da câmera termográfica [14].

2.5.3 Holiday detector

O método *holiday detector*¹² é um tipo de inspeção não destrutiva do tipo elétrico que utiliza um aparelho gerador de alta tensão para verificação de descontinuidades que possam colocar o metal base (substrato) em contato com o ambiente que o envolve, as quais possam dar início a um ponto de corrosão [22].

O método baseia-se na aplicação de uma diferença de potencial elétrico entre o substrato e a superfície do revestimento. A diferença de potencial aplicada no revestimento causará a passagem de uma corrente elétrica através do mesmo, cuja magnitude dependerá do fator de isolamento ou resistividade elétrica do material [22].

Aumentando a diferença de potencial aplicado, poderá ocorrer um efeito de avalanche ou surto de corrente em um determinado ponto do material do revestimento ocasionando a abertura de um arco elétrico.

A propriedade de determinados materiais resistirem ou suportarem a aplicação de altas diferenças de potencial é denominada “rigidez dielétrica” dos mesmos.

Portanto, no teste *holiday detector* se analisa a diferença entre a rigidez dielétrica de dois materiais. Por exemplo, ao aplicarmos uma diferença de potencial elétrico entre as duas superfícies de uma placa de asfalto contendo um furo passante através de sua espessura, conforme a Figura 4, se no interior desse furo estiver o ar atmosférico, a abertura do arco ocorrerá através do ar. Isso ocorre devido ao mesmo possuir rigidez dielétrica menor que a do asfalto betuminoso em condições normais de temperatura e pressão.

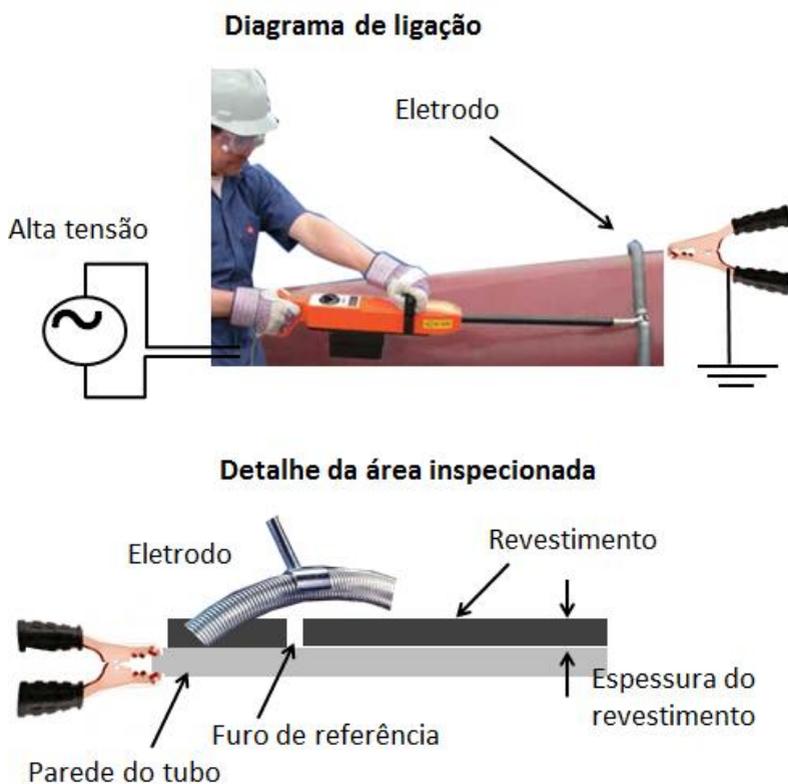
O equipamento *holiday detector* detecta o surto de corrente ou abertura de arco através do furo indicando-o com um sinal audível que é identificado pelo usuário que faz a inspeção [23].

Os eletrodos de teste variam em função das peças a serem inspecionadas, geralmente os revestimentos externos de tubulações são inspecionados com uma mola aplicada sobre a circunferência externa,

¹² A normalização vigente é a seguinte: [41] [42] [43] [46] [44] [45].

deslocando-se no sentido do comprimento do tubo. Os revestimentos internos são inspecionados através de escovas metálicas com cerdas macias (Figura 5) e também com o uso de borrachas de contato (Figura 6), usadas em PIG.

Figura 4 - Esquema de ligação do *holiday detector* e configuração onde acontece abertura de arco causada por falha de continuidade do material entre as placas do capacitor.



Fonte: [22].

A placa de asfalto funciona como dielétrico, o eletrodo de teste e a placa de aço como as placas de um capacitor comum e, para efeito de interpretação de resultados, pode-se considerar válidos todos os fenômenos aplicáveis aos capacitores.

Figura 5 - Escova metálica de cerdas macias do fabricante ELMED.



Fonte: [23].

Figura 6 - Borracha de contato utilizada em *Pigs* de inspeção.



Fonte: [23].

Um tipo particular de equipamento, chamado “*holiday detector* via úmida”, utiliza uma esponja umedecida em água como eletrodo de teste. A água aplicada através da espuma de borracha sobre o revestimento é capaz de encher pequenos furos por efeito de capilaridade e estabelecer o contato elétrico entre o eletrodo e o substrato. Neste caso, o equipamento estará efetuando a verificação da

resistividade elétrica do revestimento ao invés da rigidez dielétrica. Este tipo de equipamento é utilizado para inspeção de revestimento com baixa rigidez dielétrica ou de pequenas espessuras, nos quais a aplicação de alta tensão poderia romper o filme de tinta e danificar o revestimento.

Em ambos os casos o aterramento em um dos eletrodos está ligado ao metal base.

2.5.4 Ultrassom

A técnica de ultrassom é um END onde se emite uma onda ultrassônica a partir de um cabeçote acoplado ao material e mede-se o tempo de voo dentro desse material. As reflexões se darão em descontinuidades, sejam elas a parede oposta do compósito ou um defeito caracterizado por uma descontinuidade, como uma trinca, rachadura, bolha de ar, delaminação e etc [17]. Os ensaios são pontuais e, por esse motivo, relativamente lentos. A anisotropia do PRFV também se apresenta como um revés.

O método apresenta bom desempenho na medição de espessura, na detecção de defeitos de fabricação¹³ ou do tipo falta de adesivo, na detecção de danos de impacto e mesmo na caracterização do envelhecimento do material. A rugosidade superficial inerente ao compósito é o maior gargalo à produtividade da técnica.

A literatura recomenda o uso de cabeçotes de baixa frequência (inferior a 2,5 MHz) devido ao forte caráter atenuador dos PRFV, e a experiência confirma tal afirmação especialmente para cabeçotes monocristal [14].

2.5.5 Radiografia Industrial

A radiografia é um método usado para inspeção não destrutiva que se baseia na absorção diferenciada da radiação penetrante pela peça que está sendo inspecionada, conforme o diagrama representado na Figura 7. Devido às diferenças na densidade e variações na espessura do material, ou mesmo diferenças nas características de absorção causadas por variações na composição do material, diferentes regiões de uma peça absorverão quantidades diferentes da radiação penetrante. Essa absorção diferenciada da radiação poderá ser detectada através de um filme, ou através de um tubo de imagem ou mesmo medida por detectores eletrônicos de radiação. Essa variação na quantidade de

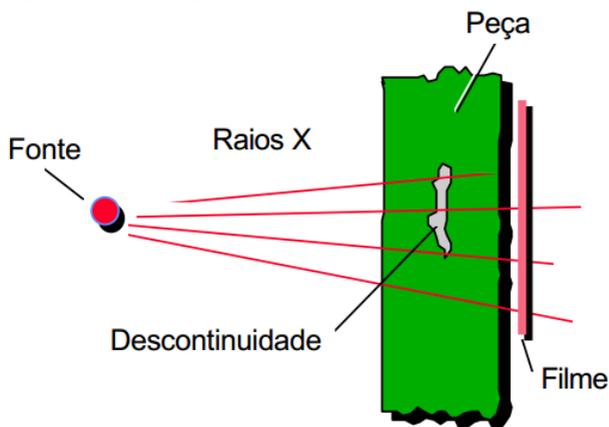
¹³ Por exemplo, poros, inclusões, descontinuidades similares à dupla laminação e/ou oriundas de processos que envolvam perda de massa.

radiação absorvida, detectada através de um meio, irá indicar, entre outras coisas, a existência de uma falha interna ou defeito no material [24]. A Figura 8 mostra um comparativo entre duas imagens de radiografia, explicitando a região de solda.

A radiografia industrial é usada para detectar variação de uma região de um determinado material que apresenta uma diferença em espessura ou densidade comparada com uma região vizinha, em outras palavras, a radiografia é um método capaz de detectar, com boa sensibilidade, defeitos volumétricos. Isso significa que a capacidade do processo de detectar defeitos com pequenas espessuras em planos perpendiculares ao feixe, como trinca dependerá da técnica de ensaio realizado. Defeitos volumétricos como vazios e inclusões que apresentam uma espessura variável em todas as direções, serão facilmente detectadas desde que não sejam muito pequenos em relação à espessura da peça [24]. Outras aplicações são a avaliação da presença de danos por impacto, poros, desalinhamentos de montagem e excesso de adesivo na raiz das juntas coladas de PRFV [14].

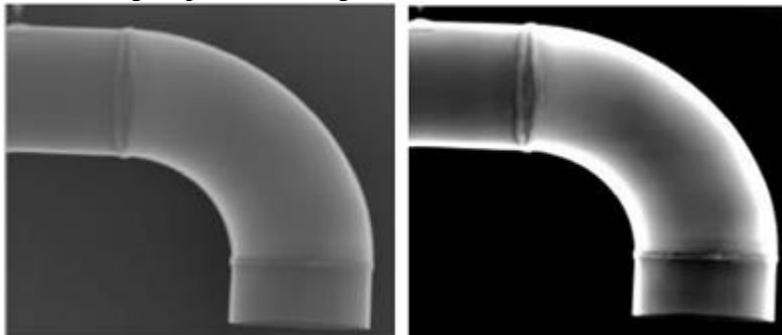
No caso do PRFV, por se tratar de um material de baixa densidade, pode-se trabalhar com tempos de exposição reduzidos e baixos valores de tensão elétrica (abaixo de 50 kV) ou isótopos de baixa energia (Se-75, Yb-169) e atividade [14].

Figura 7 - Montagem esquemática de um ensaio radiográfico.



Fonte: [24].

Figura 8 - Comparativo entre radiografia digitalizada (esquerda) e a mesma imagem processada digitalmente (direita).



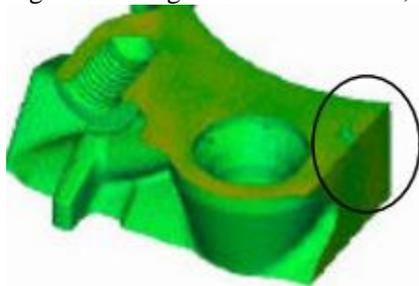
Fonte: [24].

2.5.6 Tomografia Computadorizada

A tomografia computadorizada (TC) baseia-se no mesmo princípio da radiografia convencional, explicitada no tópico anterior. Entretanto, inúmeras imagens são tomadas, de ângulos diferentes do corpo de prova [24] [25].

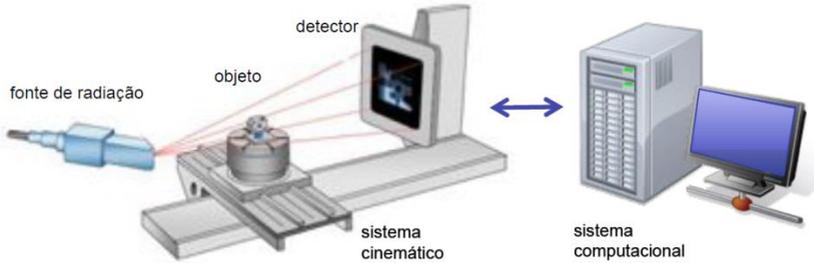
A TC consiste, basicamente, em reconstruir uma imagem 3D (Figura 9) a partir de suas projeções 2D (como as da Figura 8). Estas projeções são processadas com auxílio computacional resultando na imagem das secções transversais do objeto [26]. Apesar das diferenças de projeto decorrentes de cada aplicação e fabricante, praticamente todos os tomógrafos possuem: uma fonte de radiação; um detector; um sistema cinemático; e um sistema computacional para aquisição, reconstrução e processamento das imagens, Figura 10 [25].

Figura 9 - Imagem 3D reconstruída, onde é evidenciado um defeito.



Fonte: [24].

Figura 10 - Componentes básicos de um sistema de tomografia computadorizada.



Fonte: [25].

2.5.7 Holografia

A holografia é uma técnica interferométrica que tem se provado efetiva para armazenar e reconstruir completamente a informação de fase e amplitude da frente de onda. Com ela é possível formar imagens em 3D [27]. Uma alternativa à holografia convencional é denominada “holografia eletrônica”, também denominada Interferometria *Speckle Digital* (DSPI ou ESPI) [8].

Através da holografia eletrônica determina-se o campo de deslocamentos sofrido por um corpo, quando este é solicitado mecânica ou termicamente, assumindo um estado deformado. O campo de deslocamentos medido está diretamente relacionado ao nível de solicitação ao qual o corpo foi submetido [28].

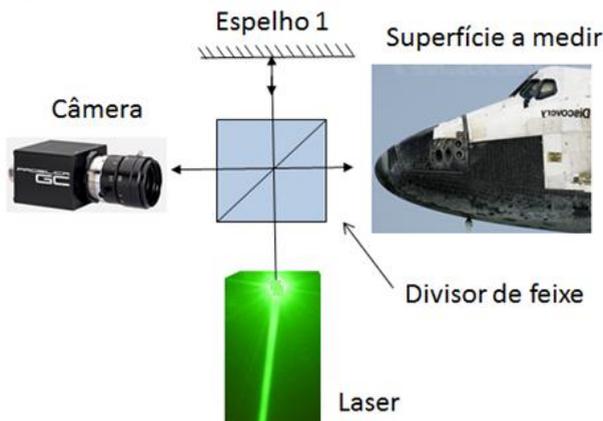
Ao se iluminar com luz coerente uma superfície cuja rugosidade seja maior que o comprimento de onda da luz, forma-se no sensor da câmera um padrão granular conhecido como *speckle*, discutido mais detalhadamente no próximo capítulo.

Utilizando uma montagem de iluminação simples (Figura 11) semelhante a um interferômetro de Michelson (descrito no tópico 0), o *speckle* da superfície a ser medida interfere com a luz refletida no espelho, formando assim um padrão de interferência no sensor da câmera. Através da variação da posição da superfície a ser medida, varia-se também a fase de cada ponto no padrão de interferência formado no sensor da câmera, dado que a fase é dependente da posição.

Ao se relacionar a variação de fase com a variação de caminho óptico percorrido pelo feixe, é possível calcular diretamente a variação de posição de cada ponto da superfície a medir. Ao se calcular o quadrado da diferença de fase de cada pixel da imagem, é possível se

observar franjas de interferência que representam os campos de deslocamentos da superfície [28].

Figura 11 - Montagem do interferômetro de Michelson para holografia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Através da iluminação simples, utilizando apenas um feixe laser, a sensibilidade do sistema é perpendicular à superfície da imagem. Já no caso da iluminação dupla, onde dois feixes não colineares iluminam a superfície a ser medida, a sensibilidade se dá no plano do objeto [18].

2.5.8 Shearografia

O termo shearografia é um neologismo com origem na palavra *shearography*, junção dos termos “*shear*” (relacionado ao deslocamento lateral) e “*graphy*” (registro). Outra denominação comumente usada é SPSI “*Speckle Pattern Shearing Interferometry*” [4].

A shearografia mede a derivada dos campos de deformação na superfície de um material em resposta a uma modificação na superfície, gerada pela aplicação de uma carga. A sensibilidade é perpendicular à superfície medida. Duas implicações sobre as medições são bastante importantes: 1) Apresentam-se imunes ao deslocamento uniforme da superfície, chamado de movimento de corpo rígido e 2) Tem baixa sensibilidade a vibração do sistema, podendo ser utilizado para medições de grandes áreas¹⁴ [8] [29]. A técnica é sensível a descolamentos subsuperficiais, delaminações, danos no interior do

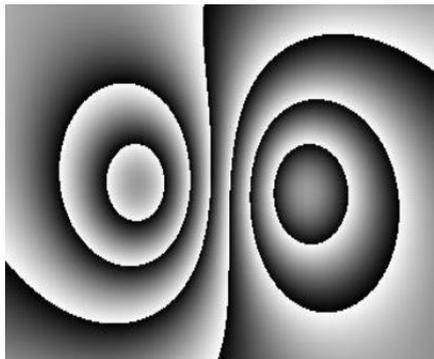
¹⁴ Desde que o sistema esteja bem acoplado ao corpo de prova.

material e descolamentos em juntas [14] [30] e tem se apresentado como uma boa opção na detecção de falhas em materiais compósitos [17], principalmente nas indústrias aeroespacial, naval [8] e, na última década, também na indústria de óleo e gás [1] [3] [14] [18] [31] [32] [33] [34].

A shearografia é uma técnica de ensaio não destrutivo que tem sido largamente usada para detecção de defeitos em materiais compósitos laminados, onde delaminações e descolamentos são os tipos mais comuns de falhas. A técnica consiste de uma medição relativa entre duas imagens, gravadas da amostra (corpo de prova) em diferentes estados de carregamento. Este carregamento aplicado induz deformações na amostra, gerando um campo de deslocamento na superfície. A diferença absoluta entre dois mapas de fase gravados em dois estados de carregamento distintos produz franjas de interferência que são diretamente correlacionados com as deformações produzidas na superfície do material [1] [3] [29].

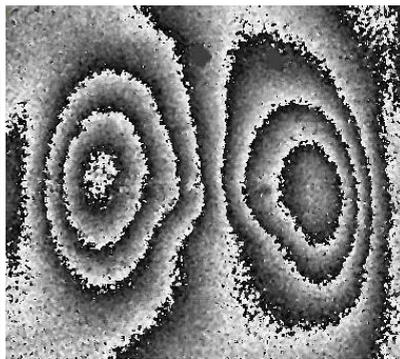
As imagens obtidas podem ser analisadas pela shearografia através da distribuição de fase, que representam os campos de deformação na superfície do corpo de prova inspecionado. Tipicamente, as falhas são representadas no mapa de fase por um padrão simétrico, similar a uma borboleta, Figuras 12 e 13 [29]. Supondo um padrão de deformação tipo bolha (Figura 14), em sua derivada haverá dois lóbulos como representado na Figura 15, sendo esse o perfil da imagem do “padrão borboleta” apresentado por uma linha horizontal à meia altura da Figura 12.

Figura 12 - Padrão típico de shearografia: Imagem simulada com função matemática.



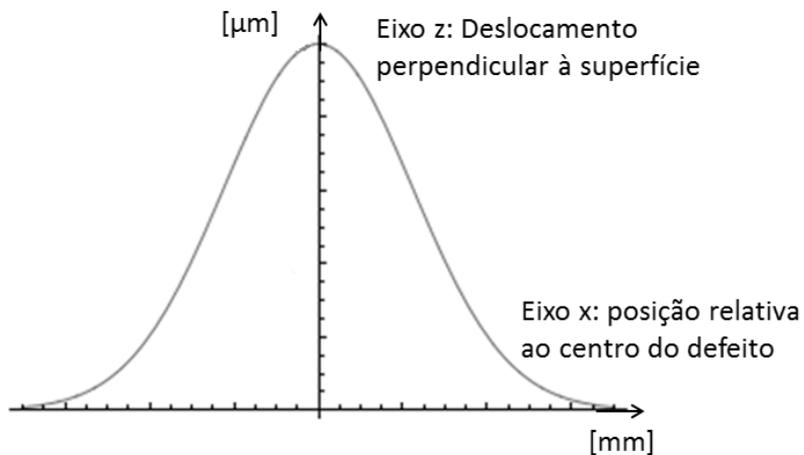
Fonte: [29].

Figura 13 - Padrão típico de shearografia: Imagem obtida com o equipamento de shearografia.



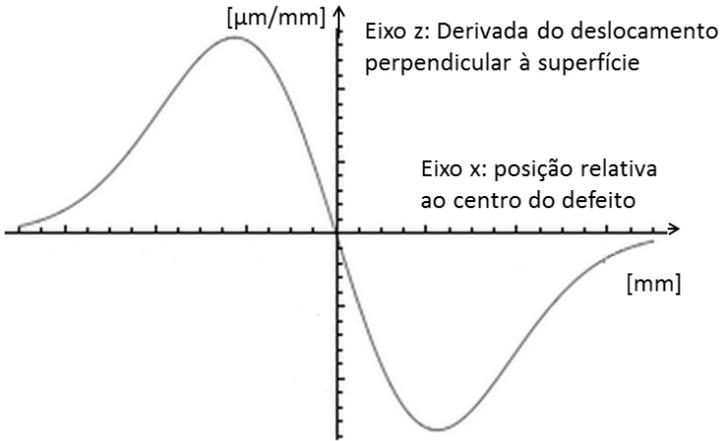
Fonte: [29].

Figura 14 - Representação do perfil de deslocamento similar a uma bolha.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 15 - Representação da derivada do perfil de deslocamento do padrão similar a uma bolha.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3 *SPECKLE LASER*

De acordo com [4], quando a superfície de um objeto reflete (ou transmite) difusamente sob luz laser, sua imagem tem um aspecto granular. O aspecto é de estar coberto por um padrão aleatoriamente distribuído de manchas brilhantes e escuras. Se o objeto se move, o *speckle* parece cintilar e se move relativamente ao objeto. Esse fenômeno de *speckle* é próprio de quando se usa luz coerente, como é o caso da luz laser.

Todos os pontos do objeto iluminado espalham a luz que neles incide. Para um dado ponto de observação no espaço, sua iluminação se dará pela superposição¹⁵ de todas as ondas (provenientes do espalhamento de cada ponto do objeto iluminado) que nele incide. Como resultado, temos um padrão de interferência¹⁶ no espaço, chamado de padrão *speckle*, como o visto na Figura 16.

Comumente, dividem-se os padrões de *speckle* em dois tipos, objetivo (Figura 17) e subjetivo (Figura 18) sendo o segundo o de interesse nesse trabalho.

- a) Objetivo: *speckle* laser existindo no espaço livre.
- b) Subjetivo: quando um sistema de imagem é usado para observar o *speckle*, no qual o tamanho dos grãos depende da abertura numérica, ao contrário do padrão objetivo.

O *speckle* subjetivo é formado pela superposição pontual da função amplitude complexa de espalhamento no plano da imagem. Cada ponto do plano da imagem registra apenas os raios de luz que são refletidos por uma pequena parte da superfície do objeto. Portanto, eles dependem da luz espalhada coletada pela abertura numérica¹⁷, sendo que o tamanho do grão é determinado pelas frequências espaciais que passam através do sistema óptico usado¹⁸, pelo comprimento de onda do laser e não dependem da rugosidade da superfície.

¹⁵ É frequente o uso de álgebra fasorial para estudo teórico de interferometria, devido à simplificação da notação.

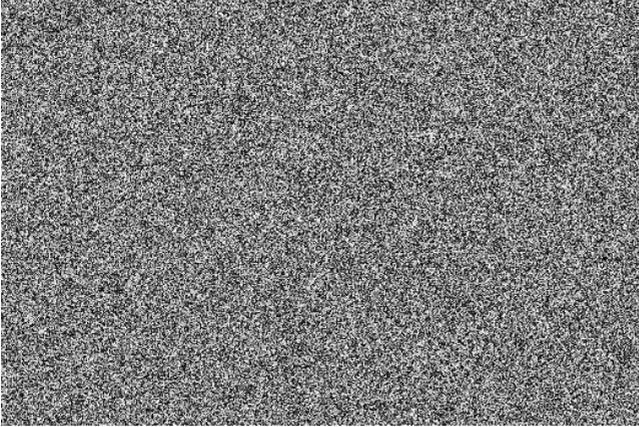
¹⁶ Sendo um padrão de interferência, sua intensidade luminosa varia em função da fase entre um valor mínimo e um valor máximo.

¹⁷ Também pode ser entendido como a abertura da íris da lente objetiva utilizada. Reduzindo-se a abertura da íris, reduz-se a frequência espacial de corte, o que aumenta o tamanho dos grãos observados.

¹⁸ O *speckle* é um ruído branco, com amplo espectro de frequência.

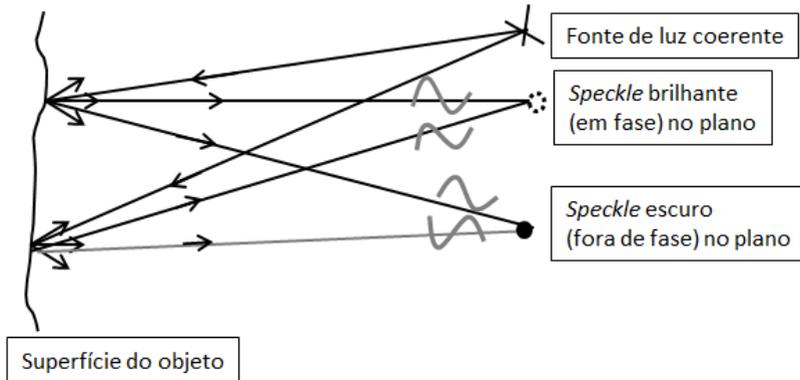
Um observador que olha para a superfície percebe o efeito do *speckle* subjetivo devido ao olho humano formar uma imagem do objeto na retina.

Figura 16 - Exemplo de padrão de *speckle*.

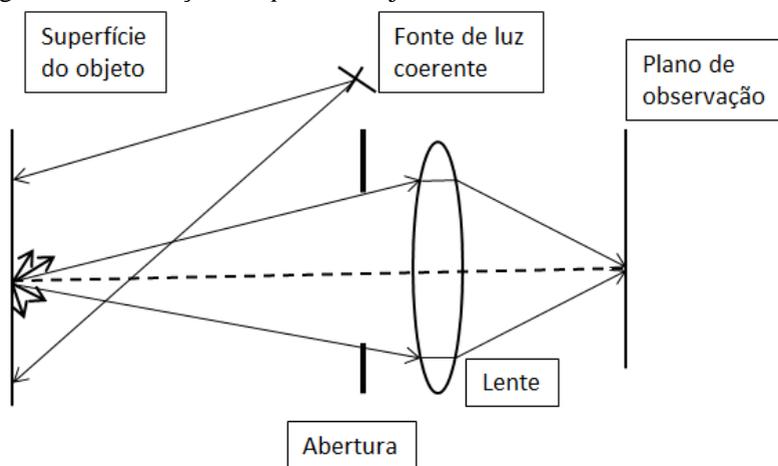


Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 - Formação do *speckle* objetivo no espaço livre.



Fonte: [4].

Figura 18 - Formação do *speckle* subjetivo.

Fonte: [4].

4 A TÉCNICA DE SHEAROGRAFIA

4.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1.1 Princípio da superposição

Interferência é o fenômeno que resulta da adição vetorial dos campos eletromagnéticos (princípio da superposição) [35]. Ao se calcular a intensidade do campo resultante, através da equação (1)¹⁹, verifica-se que essa quantidade pode ser maior ou menor que a soma das intensidades dos campos que se superpuserem.

A Figura 19 mostra um exemplo de como o processo de interferência pode ser obtido. Considere dois raios que saem da fonte F, refletem em espelhos e voltam a se superpor no ponto P. Para efeitos práticos, é como se os raios 1 e 2 fossem provenientes de duas fontes virtuais, F_1 e F_2 [6] [35].

A densidade de fluxo radiante ou irradiância é dada por:

$$I = \langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2} cn \varepsilon_0 E_0^2 \quad (1)$$

Onde:

\vec{S} é o vetor de Poynting;

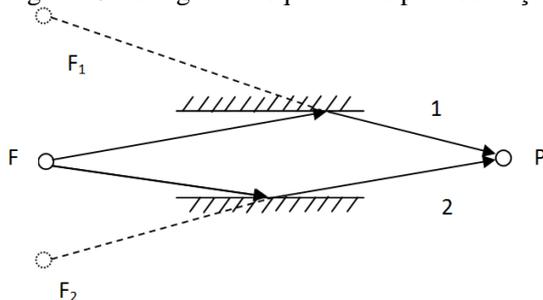
c é a velocidade da luz no vácuo ($299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$);

n é o índice de refração do meio;

ε_0 é a permissividade do vácuo ($8,854\,187\,817 \times 10^{-12}\text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$);

E_0 é o módulo do vetor campo elétrico.

Figura 19 - Diagrama esquemático para obtenção de interferência.



Fonte: [35].

¹⁹ Deduzida no Apêndice 1: Vetor de Poynting e Irradiância.

Considerando essas duas fontes pontuais, F_1 e F_2 , emitindo ondas esféricas, monocromáticas e coerentes num meio não polarizável (vácuo) conforme a Figura 20. Definindo \vec{k} com o vetor de onda, ω como a frequência angular, t como o tempo e ϕ_1 como a constante de fase da fonte F_1 . No ponto P têm-se os campos elétricos \vec{E}_1 e \vec{E}_2 , produzidos pelas fontes F_1 e F_2 , respectivamente:

$$\vec{E}_1 = \frac{\vec{E}_{01}}{|\vec{r} - \vec{r}_1|} \exp\{i[k|\vec{r} - \vec{r}_1| - \omega t - \phi_1]\} \quad (2)$$

$$\vec{E}_2 = \frac{\vec{E}_{02}}{|\vec{r} - \vec{r}_2|} \exp\{i[k|\vec{r} - \vec{r}_2| - \omega t - \phi_2]\} \quad (3)$$

Onde:

\vec{E}_{01} é o vetor campo elétrico proveniente da fonte F_1 ;

\vec{E}_{02} é o vetor campo elétrico proveniente da fonte F_2 ;

k é o vetor da onda eletromagnética proveniente das fontes F_1 e F_2 ;

$|\vec{r} - \vec{r}_1|$ é a distância entre os pontos P e F_1 ;

$|\vec{r} - \vec{r}_2|$ é a distância entre os pontos P e F_2 ;

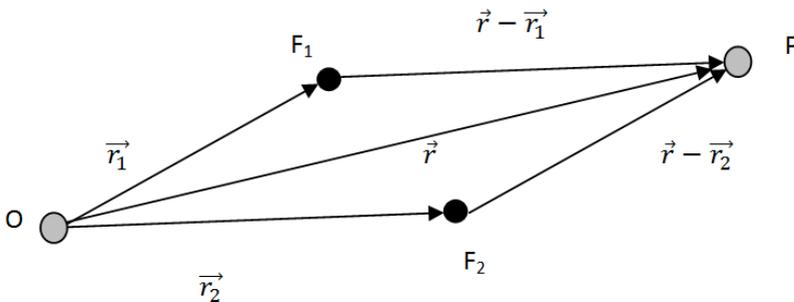
ω é a velocidade angular da onda luminosa;

t é o tempo;

ϕ_1 é a constante de fase da onda proveniente da fonte F_1 ;

ϕ_2 é a constante de fase da onda proveniente da fonte F_2 ;

Figura 20 - Arranjo para observação de interferência de duas fontes pontuais monocromáticas.



Fonte: [35].

O campo resultante \vec{E} vem da superposição \vec{E}_1 e \vec{E}_2 , isto é, da adição vetorial $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. A intensidade “I” é proporcional²⁰ ao quadrado da amplitude, isto é, $(\vec{E}^* \cdot \vec{E})$, logo:

$$I \propto \vec{E}^* \cdot \vec{E} = |\vec{E}_1|^2 + |\vec{E}_2|^2 + \vec{E}_1^* \cdot \vec{E}_2 + \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2^* \quad (4)$$

Onde \vec{E}^* é o complexo conjugado do vetor \vec{E} .

Os dois últimos termos são aqueles responsáveis pela interferência. Pode-se reescrevê-los como:

$$\vec{E}_1^* \cdot \vec{E}_2 + \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2^* = \frac{2\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02}}{|\vec{r} - \vec{r}_1| |\vec{r} - \vec{r}_2|} \cos(k|\vec{r} - \vec{r}_1| - k|\vec{r} - \vec{r}_2| + \phi_1 - \phi_2) \quad (5)$$

Supondo que \vec{E}_{01} e \vec{E}_{02} sejam paralelos²¹, definindo:

$$\vec{A}_1 = \frac{\vec{E}_{01}}{|\vec{r} - \vec{r}_1|} \quad (6)$$

$$\vec{A}_2 = \frac{\vec{E}_{02}}{|\vec{r} - \vec{r}_2|} \quad (7)$$

$$\delta = k(|\vec{r} - \vec{r}_1| - |\vec{r} - \vec{r}_2|) + \phi_1 - \phi_2 \quad (8)$$

Sendo δ a fase da onda resultante da superposição. Tem-se:

²⁰ Uma descrição mais completa da afirmação que a intensidade é proporcional ao quadrado do campo elétrico pode ser encontrada no

APÊNDICE 1: *Vetor de Poynting e Irradiância.*

²¹ A expressiva divergência entre os feixes da Figura 20 é apenas para fins didáticos. Nos casos de interesse, a distância entre F e P é grande o suficiente para a aproximação, de paralelismos entre ambos os feixes ser considerada uma boa aproximação.

$$\vec{E}^* \cdot \vec{E} = A_1^2 + A_2^2 + 2\vec{A}_1 \cdot \vec{A}_2 \cos\delta \quad (9)$$

Alternativamente, temos:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\delta \quad (10)$$

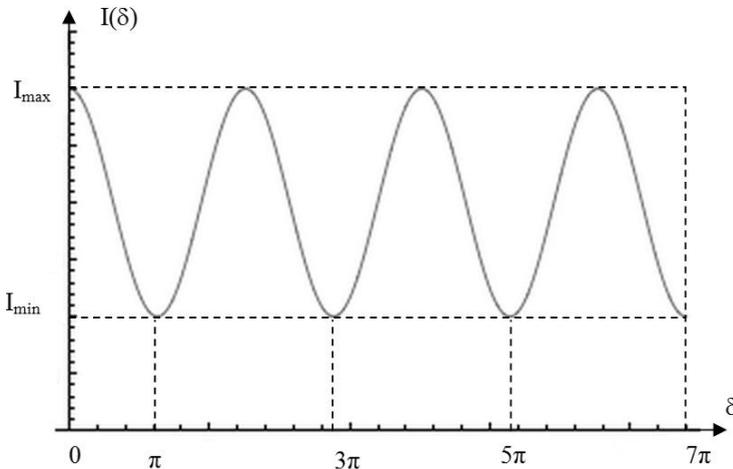
Onde:

I_1 representa a intensidade devido à fonte F1;

I_2 representa a intensidade devido à fonte F2.

O último termo, oriundo da combinação de \vec{E}_1 e \vec{E}_2 varia com a diferença de fase entre os campos e dá origem ao fenômeno chamado interferência²². Esse resultado mostra que a intensidade é uma função cosseno, com máximos e mínimos alterados, conforme a Figura 21.

Figura 21 - Intensidade dos campos superpostos como função da diferença de fase.



Fonte: Elaborada pelo autor.

²² Lembrando que para obter-se a equação (10) \vec{E}_{01} e \vec{E}_{02} foram tomados paralelos. Se isso não ocorrer, o termo de interferência deverá ser multiplicado por $\cos\Phi$, onde Φ é o ângulo entre \vec{E}_{01} e \vec{E}_{02}

Os valores máximos e mínimos são dados por:

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} = (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2 \quad (11)$$

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} = (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2 \quad (12)$$

No caso em que $I_1=I_2=I_0$ têm-se $I_{\max}=4I_0$ e $I_{\min}=0$. Costuma-se definir a visibilidade das franjas (visibilidade de Michelson) como:

$$\eta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_1 \cdot I_2}}{I_1 + I_2} \quad (13)$$

Sendo esse um parâmetro que poderia ser utilizado em trabalhos futuros para se comparar a qualidade de duas imagens de shearografia.

No caso particular em que $\phi_1=\phi_2$, a fase será $\delta = k\{|\vec{r} - \vec{r}_2| - |\vec{r} - \vec{r}_1|\}$, de forma que se forem considerados os máximos, nota-se que eles satisfazem:

$$\frac{\delta}{k} = \frac{2m\pi}{k} = \{|\vec{r} - \vec{r}_2| - |\vec{r} - \vec{r}_1|\} = \text{constante} \quad (14)$$

Onde m é um número inteiro.

Assim, a fase δ da onda resultante pode ser colocada em termos da diferença de caminhos ópticos, que nesse caso é dada por:

$$\Delta = n\{|\vec{r} - \vec{r}_2| - |\vec{r} - \vec{r}_1|\} \quad (15)$$

Logo,

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta + (\phi_2 - \phi_1) \quad (16)$$

Onde λ_0 é o comprimento de onda da luz (proveniente da fonte F) no vácuo.

4.1.2 Interferômetro de Michelson

O interferômetro da Figura 22 foi desenvolvido por Michelson em 1880 [35]. A radiação proveniente de um ponto P1 (iluminado com

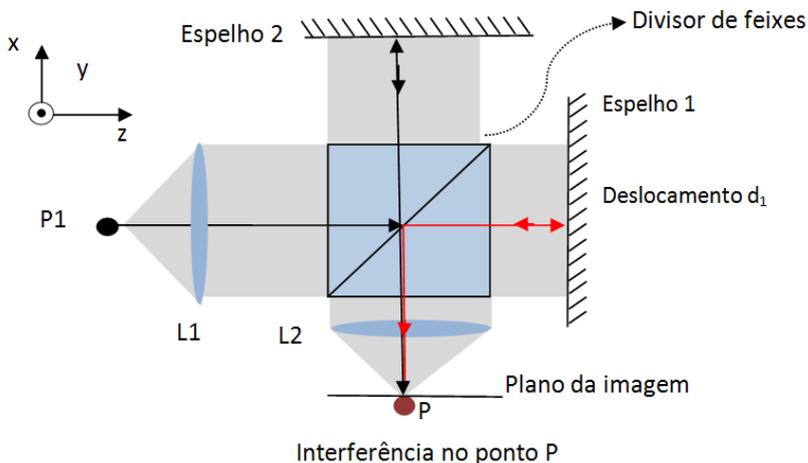
luz coerente) é colimada e dividida por um divisor de feixes, resultando em um feixe representado na cor preta e outro em vermelho.

O primeiro feixe, representado em preto, é refletido pelo divisor de feixes, incide no espelho 2 e retorna sobre si mesmo. Após passar pelo divisor de feixes, forma no ponto P a imagem do ponto P1.

O segundo feixe, representado em vermelho, após atravessar o divisor de feixes, incide no espelho 1, retorna sobre si mesmo, é refletido pelo divisor de feixes e também forma sobre P a imagem de P1.

Com a recombinação do primeiro e segundo feixe, um padrão de interferência é observado em P e este padrão varia ao se variar a posição do espelho 1.

Figura 22 - Interferômetro de Michelson.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Supondo ser a fonte monocromática e o interferômetro estar no vácuo ($n=1$)²³, a diferença de caminhos ópticos é dada por $\alpha = q_1 - q_2$ logo, a diferença de fase é:

²³ Uma aproximação ao índice de refração do ar ($n=1,000277$), sob as condições normais de temperatura e pressão (STP).

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (q_1 - q_2) \quad (17)$$

Onde q_1 e q_2 são as distâncias percorridas pelo feixe 1 (preto) e 2 (vermelho), respectivamente. Um fato de interesse é que se o espelho E_1 é deslocado de uma distância d_1 , o feixe tem uma diferença de caminho óptico de $2d_1$ (ida e volta). A intensidade observada em P é:

$$I(\Delta) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \alpha\right) \quad (18)$$

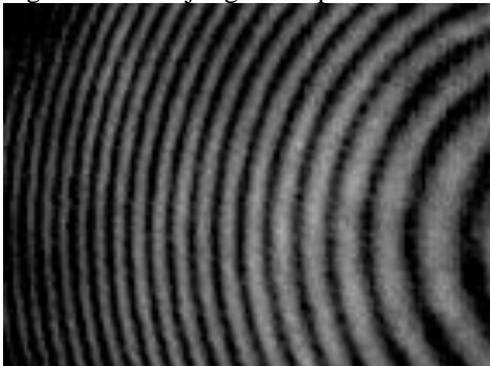
Supondo que os feixes 1 e 2 são refletidos e transmitidos de maneira igual pelo divisor de feixes, tem-se $I_1 = I_2 = I_0$. Assim,

$$I(\Delta) = 2I_0 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \alpha\right) \right] \quad (19)$$

Então, para uma dada montagem do interferômetro, a intensidade luminosa em um dado ponto P do detector, tal como mostrada na equação anterior, é função da diferença de caminho óptico entre os dois braços. Sendo assim, o ponto P (da imagem) poderá experimentar alteração na sua intensidade se um dos espelhos sofrer uma mudança de posição. Através desse princípio, é possível medir-se deslocamentos de um dos espelhos. Tomando a equação (17), nota-se que um ciclo completo de 2π na fase equivale ao aumento no caminho óptico de um comprimento de onda da fonte luminosa usada, no caso desse trabalho, 532 nm. Sendo assim, esse interferômetro descreve um ciclo a cada deslocamento (normal ao espelho) equivalente a $\lambda_0/2$.

Através da equação (19), os extremos são dados por $I_{max} = 4I_0$ (interferência construtiva, ponto claro) e $I_{min} = 0$ (interferência destrutiva, ponto escuro). As regiões claras e escuras são comumente denominadas de “franjas de interferência”, a Figura 23 apresenta uma imagem gerada pelo interferômetro de Michelson onde é possível identificar essas franjas.

Figura 23 - Franjas geradas por um interferômetro de Michelson.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.3 Interferômetro de Michelson modificado para shearografia

A configuração do interferômetro de Michelson, Figura 24, sofre três adaptações para seu uso na técnica de Shearografia [4]:

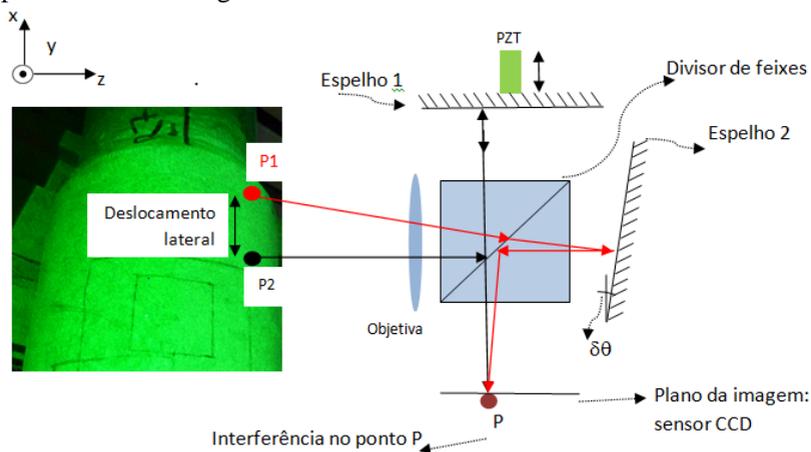
- 1) O espelho 1 possui um elemento que faz variar sua posição no eixo “x”. O papel desse elemento será discutido no tópico 4.1.5.
- 2) No plano de formação da imagem, existe um sensor CCD de uma câmera conectada a um computador. O padrão de *speckle* é capturado e digitalizado.
- 3) O espelho 2 sofre uma pequena rotação $\delta\theta$.

Devido à rotação do espelho 2, a imagem do ponto P1 será formada em um ponto P da imagem, interferindo com a imagem do ponto P2, que também se forma sobre o ponto P. A distância entre esses dois pontos (P1 e P2) é chamada de “deslocamento lateral”, que também é representada por “DL”. Uma consequência disso é a formação de uma imagem dupla e deslocada uma da outra pela distância DL. A Figura 25 apresenta um corpo de prova tubular com DL de 16 mm. Nela é possível notar a duplicação dos objetos na direção horizontal.

O equipamento utilizado possui dois eixos de rotação no espelho 2, de forma que pode-se introduzir DL na imagem na direção x, na direção y ou uma combinação de ambas (de acordo com o sistema de coordenadas utilizado). Após o ajuste de um determinado DL, cada ponto do sensor da câmera passará a receber luz incidente de dois pontos distintos da imagem, separados por essa mesma distância.

Para um melhor controle dos parâmetros de ensaio, costuma-se utilizar peças de tamanho padrão sobre a imagem, como o adesivo quadrado de 16 mm de lado da Figura 25. Uma vez que se introduz um DL de forma que duas imagens do mesmo objeto apareçam lado a lado, sem sobreposição ou afastamento entre eles, conclui-se que o DL, na superfície do objeto, é igual ao comprimento do mesmo na direção do eixo do deslocamento.

Figura 24 - Configuração do interferômetro de Michelson modificado para uso em shearografia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 25 - Exemplo de imagem, com deslocamento lateral horizontal, visualizada pelo sistema de shearografia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A técnica de shearografia baseia-se na interferência dos dois padrões de *speckle* resultante da superposição das duas imagens deslocadas lateralmente sobre o sensor da câmera. Nesse sensor, forma-se então, um padrão de interferência resultante da diferença de fase entre esses dois padrões de *speckles*.

A fase no ponto P será, então, calculada pela diferença de fase da imagem dos pontos P1 e P2:

$$\phi(P) = \phi(P_1) - \phi(P_2) = \phi(x + \delta x, y) - \phi(x, y) \quad (20)$$

Ou seja, a fase do ponto P só depende da diferença de fase entre os pontos P1 e P2, separados por uma distância $DL = \delta x$. Caso esses dois pontos sofram a mesma variação de fase, a diferença de fase não se modificará, portanto, não haverá mudança do padrão de interferência da imagem. Uma translação pura do objeto em relação ao interferômetro produz este efeito. Essa característica é uma propriedade importante da técnica de shearografia, que é imune a deslocamentos de corpo rígido, permitindo uma maior robustez da técnica, que é de grande valia para ensaios e inspeções em campo.

4.1.4 Diferença de fase

Baseado na equação (19), pode-se definir a iluminação de um dado ponto por:

$$I = 2I_0(1 + \cos \phi) \quad (21)$$

Onde:

I_0 é igual a iluminação causada pela fonte 1 ou fonte 2;

ϕ é igual ao vetor de onda (k) multiplicado pela diferença de caminho óptico entre os feixes 1 e 2.

Nas medições com shearografia, são comparados dois estados da superfície do objeto medido e, entre esses dois estados, um carregamento é aplicado sobre este objeto. Mais detalhes sobre o carregamento usado nesse trabalho são apresentados em 4.2.3 e sobre os diferentes tipos de carregamento, no tópico 4.3.

Tome como I_a a intensidade de um dado ponto da imagem antes do carregamento e I_d como a intensidade depois do carregamento. Quando se carrega o corpo de prova, uma mudança no caminho óptico ocorre, devido à deformação da sua superfície, que pode provocar uma

mudança de fase relativa entre cada par de pontos vizinhos cujas imagens estão superpostas no sensor da câmera. Para um dado ponto neste sensor, sendo Δ a variação de fase observada neste ponto em função da aplicação do carregamento, a intensidade resultante pode ser calculada por:

$$|I_s| = |I_a - I_d| = \left| 4I_0 \left[\text{sen} \left(\phi + \frac{\Delta}{2} \right) \text{sen} \frac{\Delta}{2} \right] \right| \quad (22)$$

Onde, tomando um dado ponto da imagem:

I_s é a variação de intensidade do ponto na imagem;

I_a é a intensidade do ponto da imagem antes do carregamento;

I_d é a intensidade do ponto da imagem após o carregamento;

Δ é a variação de fase observada no ponto da imagem.

Portanto, variações de fase produzem variações na intensidade capturada em cada pixel do sensor da câmera. As variações de intensidade podem ser percebidas através da diferença entre as duas imagens. Na imagem das diferenças é possível visualizar as franjas de interferência correspondentes à deformação do objeto²⁴. Entretanto, usando apenas esta imagem não é possível recuperar o valor do deslocamento de fase Δ , uma vez que a intensidade também é função de I_0 e ϕ , que não são conhecidos. Para se determinar o deslocamento de fase de todos os pontos da imagem, é utilizada a técnica descrita no próximo tópico.

4.1.5 Deslocamento de fase

Na equação (22) nota-se que $I_s = I_s(I_0, \phi, \Delta)$, onde I_0 é a intensidade média, ϕ a fase original e Δ , a variação de fase. Dentre essas três variáveis, a de interesse é Δ , que esta relacionada o movimento relativo entre os pontos P1 e P2 que, em termos práticos, pode ser relacionado com a deformação da superfície medida.

²⁴ Essa metodologia será mencionada no tópico 4.1.7. Os mapas obtidos dessa forma são gerados rapidamente e utilizados para inspeções “ao vivo”.

Conforme citado 4.1.3, o espelho 1 possui um atuador piezoelétrico²⁵ PZA, capaz de variar sua posição no eixo “x”. Esse dispositivo, ao se movimentar, faz variar o caminho óptico percorrido pelo raio de luz do ponto P2. Com isso, pode inserir-se uma variação de fase adicional à imagem através do deslocamento paralelo de um dos espelhos. Variando-se sua posição em δx , o caminho óptico varia em $2\delta x$ e a fase adicional será, baseada na equação (17):

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2\delta x \quad (23)$$

Através da calibração apropriada do atuador piezoelétrico, pode-se variar fase de um determinado ponto de uma quantidade conhecida. Se forem quatro incrementos de fase de 90° , a intensidade desse ponto vai assumir os seguintes valores:

$$I_1 = 2I_0[1 + \cos \phi] \quad (24)$$

$$I_2 = 2I_0[1 + \cos(\phi + 90^\circ)] \quad (25)$$

$$I_3 = 2I_0[1 + \cos(\phi + 180^\circ)] \quad (26)$$

$$I_4 = 2I_0[1 + \cos(\phi + 270^\circ)] \quad (27)$$

Isolando-se o argumento ϕ através das quatro equações anteriores, se obtém [4]:

$$\phi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad (28)$$

Para identificação do quadrante desse ângulo, analisa-se o sinal do numerador e do denominador. Com isso, é possível determinar a fase da luz refletida por cada ponto do objeto (Tabela 2). A imagem resultante desse processamento é chamada de mapa de fases [31].

Captura-se quatro dessas imagens para o objeto de medição não carregado e, posteriormente, mais quatro para o objeto carregado. Calcula-se a fase em cada situação, gerando-se os mapas de fases sem e com carregamento. O valor de Δ é determinado pela diferença entre as fases das duas situações (com e sem carregamento) e, a subtração dos

²⁵ Elemento que apresenta o efeito piezoelétrico reverso, ou seja, apresenta uma deformação mecânica proporcional a uma tensão elétrica aplicada.

mapas é chamada de “mapa de variação de fases” ou da “diferença de fases”.

Tabela 2- Identificação do quadrante de ϕ através dos sinais do argumento da função arco tangente.

I_4-I_2	I_1-I_3	Quadrante do argumento ϕ
+	+	I ($0^\circ < \phi < 90^\circ$)
+	-	II ($90^\circ < \phi < 180^\circ$)
-	-	III ($180^\circ < \phi < 270^\circ$)
-	+	IV ($270^\circ < \phi < 360^\circ$)

Fonte: Elaborada pelo autor.

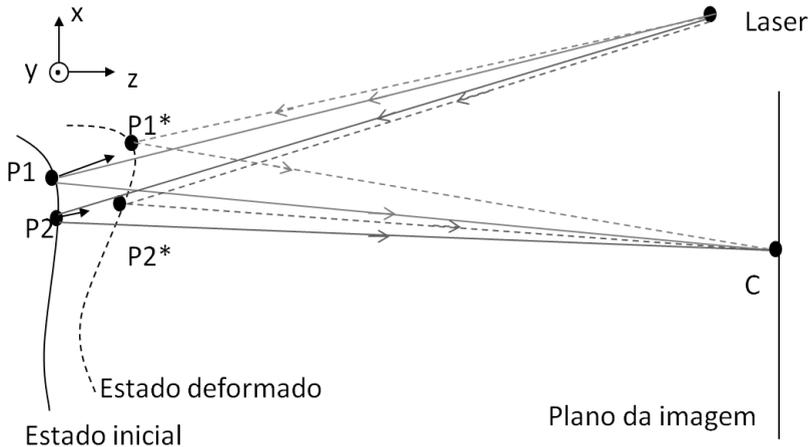
Esses mapas armazenam a informação (para cada pixel) de um ângulo entre 0° e 360° , dado que as funções trigonométricas são periódicas. Para a reconstrução do valor de Δ , que geralmente extrapola os limites entre 0° e 360° , utiliza-se um algoritmo de remoção de salto de fase. Essa técnica foge ao escopo desse trabalho, mas pode ser encontrada em [4]. Esse “Mapa da Diferença de Fase” é o principal resultado do procedimento óptico e a base para as análises visando a identificação de defeitos.

4.1.6 Considerações sobre a sensibilidade de um sistema de Shearografia

Uma abordagem completa desse tema é feita em [4] e resumido em [31], que é demasiada longa para um tratamento adequado nesse texto. Como descrição sucinta, a shearografia faz medições das derivadas das componentes do deslocamento, que estão relacionadas com as deformações do corpo de prova. Nesse tópico será apresentada uma breve discussão sobre o assunto.

Suponha um objeto em dois estados: inicial (antes) e final (após um carregamento), representado pelas curvas sólida e tracejada, respectivamente na Figura 26.

Figura 26 - Variação de caminho óptico devido à deformação do objeto de estudo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o sistema apresentado na Figura 26, as deformações do objeto são definidas por:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (29)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (30)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (31)$$

$$\varepsilon_{xy} = 2 \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (32)$$

$$\varepsilon_{yz} = 2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (33)$$

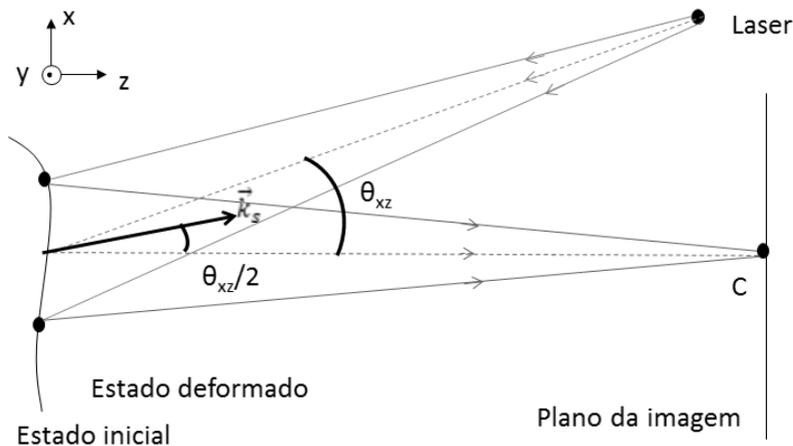
$$\varepsilon_{xz} = 2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (34)$$

Sendo u , v e w as componentes do deslocamento da superfície nas direções dos eixos x , y e z , respectivamente.

A variação de fase na imagem, em função da deformação do objeto, para um DL somente na direção x , é dado por:

$$\Delta_x = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \vec{k}_s \cdot \hat{i} + \frac{\partial v}{\partial x} \vec{k}_s \cdot \hat{j} + \frac{\partial w}{\partial x} \vec{k}_s \cdot \hat{k} \right) \delta x \quad (35)$$

Figura 27 - Vetor sensibilidade de um sistema de shearografia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Sendo \vec{k}_s é o vetor sensibilidade, Figura 27. Considerando que a iluminação laser encontra-se no plano xz com um ângulo θ_{xz} com a direção z , Figura 27, que o objeto é plano e que novamente as dimensões do objeto e do sensor da câmera são muito menores que as distâncias do objeto e do laser à câmera, tem-se que:

$$\vec{k}_s = \frac{2\pi}{\lambda} [\text{sen}\theta_{xz} \cdot \hat{i} + (\cos\theta_{xz} + 1) \cdot \hat{k}] \quad (36)$$

Com isso, é possível exprimir a variação de fase da seguinte forma:

$$\Delta_x = \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[\text{sen}\theta_{xz} \frac{\partial u}{\partial x} + (\cos\theta_{xz} + 1) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (37)$$

$$\Delta_y = \frac{2\pi\delta y}{\lambda} \left[\text{sen}\theta_{xz} \frac{\partial u}{\partial x} + (\cos\theta_{xz} + 1) \frac{\partial w}{\partial y} \right] \quad (38)$$

Se a iluminação for feita no plano yz , têm-se:

$$\Delta_x = \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[\text{sen}\theta_{yz} \frac{\partial v}{\partial x} + (\cos\theta_{yz} + 1) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (39)$$

$$\Delta_y = \frac{2\pi\delta y}{\lambda} \left[\text{sen}\theta_{yz} \frac{\partial v}{\partial y} + (\cos\theta_{yz} + 1) \frac{\partial w}{\partial y} \right] \quad (40)$$

Finalmente, se a iluminação for feita no plano xy, ou seja, perpendicular ao objeto, tem-se $\theta_{xz} = \theta_{yz} = 0^\circ$, caso de interesse desse trabalho, têm-se que:

$$\Delta_x = \frac{4\pi\delta x}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \quad (41)$$

$$\Delta_y = \frac{4\pi\delta y}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial y} \quad (42)$$

Para os deslocamentos laterais em x e em y, respectivamente. Com isso, conclui-se que as derivadas das componentes do deslocamento da superfície do objeto fora do plano $\frac{\partial w}{\partial x}$ ou $\frac{\delta w}{\delta y}$ pode ser medida com uma iluminação simples, perpendicular ao objeto. As derivadas das componentes do deslocamento no plano $\frac{\partial u}{\partial x}$, $\frac{\partial v}{\partial x}$, $\frac{\partial u}{\partial y}$ ou $\frac{\partial v}{\partial y}$ não podem ser medidas com uma simples iluminação, pois seria necessária uma iluminação paralela à superfície, o que é impraticável [31], mas poderiam ser medidas a partir de medições múltiplas com ângulos de iluminação diferentes, o que eleva consideravelmente a complexidade da medição e compromete sua robustez.

Como os objetos não são planos e seus tamanhos não são desprezíveis em relação a distância até a câmera, normalmente as franjas obtidas resultam de uma mistura das várias componentes das derivadas dos deslocamentos, com predominância da derivada da componente fora do plano. Apesar disso, os valores medidos são bastante úteis pelo fato da shearografia ser comumente utilizada como ferramenta de avaliação qualitativa para ensaios não destrutivos [31].

4.1.7 Processamento das Imagens

A metodologia apresentadas até então foi a seguinte: 1) Aquisição de quatro imagens antes do carregamento (aquisição I) e quatro imagens depois do carregamento (aquisição II), 2) Cálculo da fase de cada uma das aquisições I e II, 3) Processamento do mapa de diferença de fase e, finalmente, 4) Remoção do salto de fase.

Para fins de automatização e viabilização dessa técnica, foi desenvolvida a Shearografia Eletrônica ou “*Electronic Speckle Pattern Shearing Interferometry*” (ESPSI). Nessa técnica, a aquisição de imagens é feita digitalmente utilizando uma câmera com sensor CCD, que envia os dados a um computador que processará tais imagens.

No equipamento utilizado atualmente, existem dois tipos de visualização de imagens de shearografia: 1) Mapa de diferença de fase e 2) franjas ao vivo.

- 1) O modo de exibição do mapa das diferenças de fase resulta em qualidade de imagem bastante superior ao outro método apresentado, possuindo menos ruído e uma melhor definição das bordas da região com franjas. A execução e processamento dos dados são um pouco mais lentos²⁶, uma vez que é necessária a execução do deslocamento de fase e do processamento mais elaborado de dados. Em contrapartida, essa técnica se apresenta como uma solução viável às avaliações qualitativa e quantitativa.
- 2) Já no método “Franjas ao vivo”, obtêm-se uma imagem de shearografia rapidamente, com frequência de atualização limitada basicamente pela taxa de aquisição da câmera²⁷. Nesse tipo de resultado, são adquiridas uma imagem de referência (sem carregamento) e as demais imagens (durante e depois o carregamento). As imagens (atual e a de referência) são subtraídas digitalmente (pixel a pixel) e o quadrado da diferença (quadrado da equação (22)) é representado na imagem. Este modo costuma apresentar um padrão de franjas em regiões de deformação anômalas e normalmente é utilizada em avaliações rápidas e menos criteriosas, pois seu resultado tem um caráter mais qualitativo.

²⁶ Quando comparados ao método “Franjas ao vivo”.

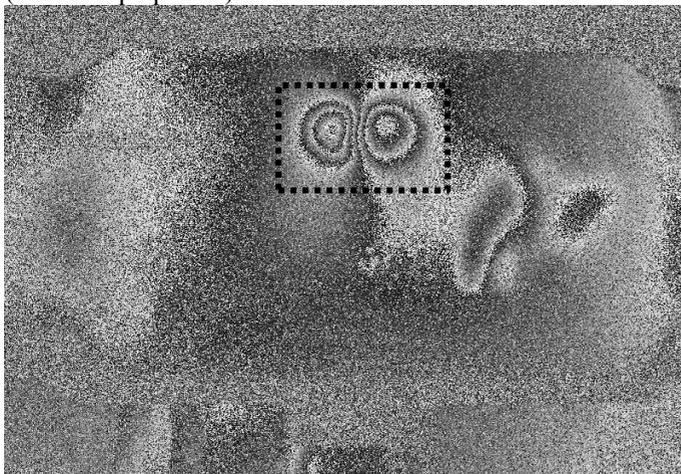
²⁷ Dado o atual poder de processamento dos computadores pessoais.

4.1.8 Interpretação das imagens

As imagens de shearografia, para defeitos de geometria simples como retângulos e círculos, apresentam-se como dois lóbulos simétricos (tópico 2.5.8) e com eixo de simetria perpendicular à direção do DL. Devido à presença de ruído na imagem, franjas relativas à geometria do CP, distorções devido ao sistema óptico, baixo contraste das franjas e demais fatores que causam degradação da imagem, as imagens de shearografia não se apresentam exatamente como a de uma imagem ideal (tópico 2.5.8). Dessa forma, boa parte do conhecimento prático dos usuários de um sistema de shearografia é baseado na interpretação das imagens e em metodologias²⁸ para alcançar uma imagem com franjas e bordas nítidas.

Como ilustração, são mostrados duas imagens do Revestimento 7 (tópico 5.4.2) em extremos de “máxima”²⁹ (Figura 28) e “mínima”³⁰ (Figura 29) qualidade da imagem. Notar a expressiva diferença entre o contorno das franjas e sua nitidez.

Figura 28 - Revestimento 7. Sistema operando com baixa sensibilidade (DL e ΔP pequenos).



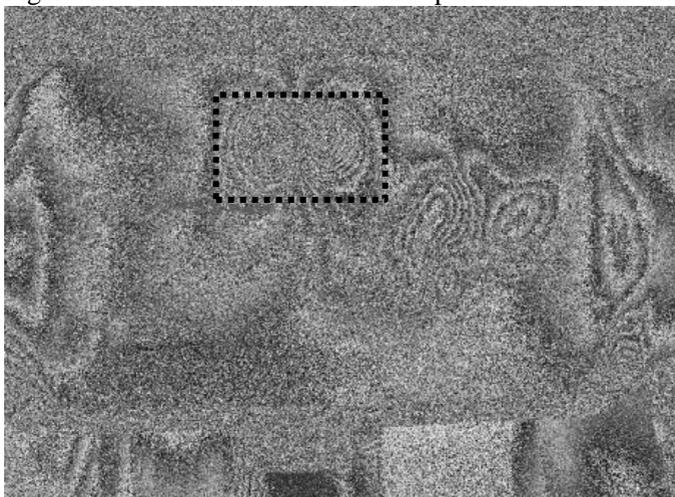
Fonte: Elaborada pelo autor.

²⁸ Ângulo de câmera, troca do sistema de lentes, parâmetros do carregamento e deslocamento lateral adequados.

²⁹ DL 8 mm, ΔP 5 bar.

³⁰ DL 16 mm, ΔP 20 bar.

Figura 29 - Revestimento 7. Sistema operando com alta sensibilidade.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em alguns casos, a presença de um defeito pode não ser facilmente identificável através de um ensaio de shearografia, sendo os resultados classificados como ambíguos. Como exemplo têm-se duas inspeções em um mesmo corpo de prova (Torpedo 2), submetidos a um mesmo carregamento, mas diferentes direções do DL, horizontal (Figura 30) e vertical (Figura 31).

No caso da Figura 30, (suposto como primeiro ensaio) a presença do defeito circulado pode ser inferida³¹ pela presença de dois lóbulos simétricos. A esquerda dessa mesma região existe uma mancha maior e bem mais expressiva que o primeiro caso, contornada por um retângulo.

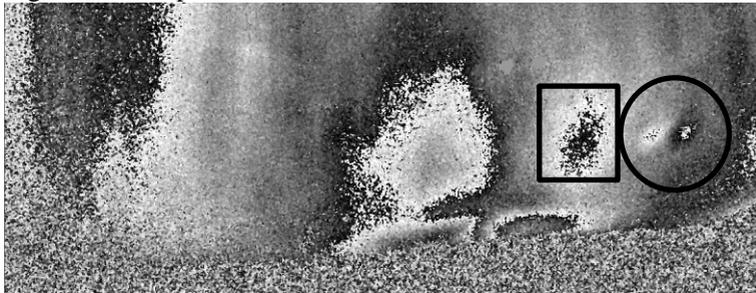
Como método de apoio, para a constatação da presença e localização de um possível defeito, o ensaio é repetido sob as mesmas condições do primeiro (

Figura 30), mas o seu DL é mudado para uma direção perpendicular, conforme Figura 31. Nela é possível visualizar apenas um padrão de lóbulos na mesma região que o anterior, comprovando assim a suspeita da presença do defeito nesta localização (região com círculo). Um segundo possível defeito, representado pela mancha

³¹ Não necessariamente um defeito identificado, por se tratar de uma anomalia pequena e de pouca visibilidade, se comparada com os demais padrões presentes na imagem.

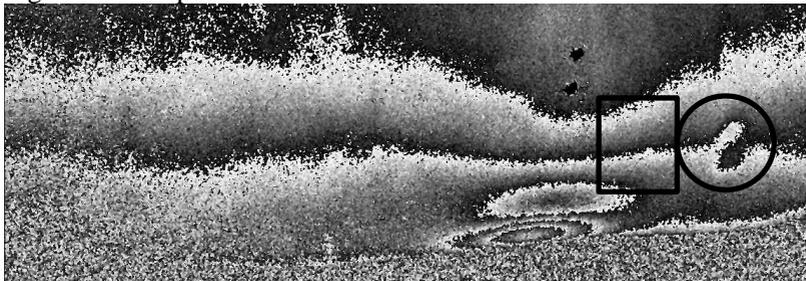
destacada com um retângulo na Figura 30, não apresenta recíproca na Figura 31 e, sendo assim, é descartada como sendo parte de um defeito do revestimento compósito.

Figura 30 - Torpedo 2 com DL horizontal.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 31 - Torpedo 2 com DL vertical.



Fonte: Elaborada pelo autor.

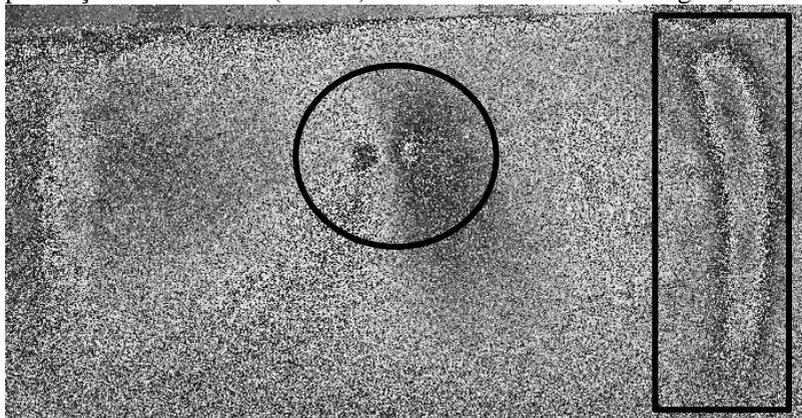
Outro falso positivo frequentemente presente em ensaios em luvas de material compósito trata-se de efeitos de borda, como mostra a Figura 32 e contornado por um retângulo. Nela estão presentes os seguintes padrões:

- a) O afloramento de um defeito (contornado com círculo), caracterizado por dois lóbulos simétricos;
- b) Um extenso padrão vertical (contornado com retângulo), que não possui par de simetria³². Este padrão aparece em uma região onde duas luvas de espessuras diferentes se encontram e é feita uma

³² Principal indicativo de não se tratar de um defeito.

suavização da superfície, havendo assim uma variação de espessura.

Figura 32 – Reparo 32. Exemplo de imagem de shearografia com a presença de um defeito (círculo) e um efeito de borda (retângulo).



Fonte: Elaborada pelo autor.

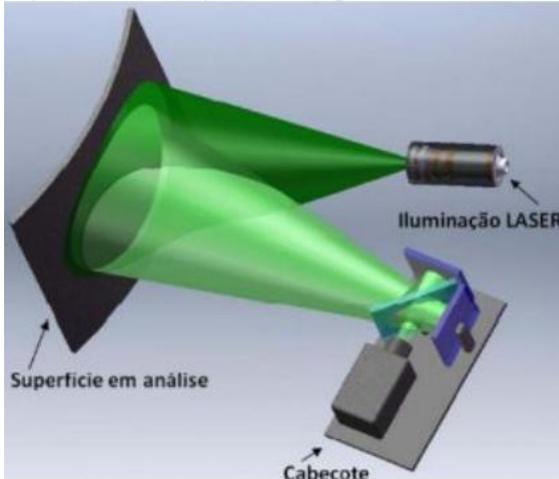
4.2 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE SHEAROGRAFIA

Um diagrama simplificado da configuração de equipamentos para medição com shearografia é mostrado na Figura 33, onde são destacados o sistema de iluminação a laser, a superfície analisada e o módulo de captura da imagem.

A bancada utilizada neste trabalho é mostrada na

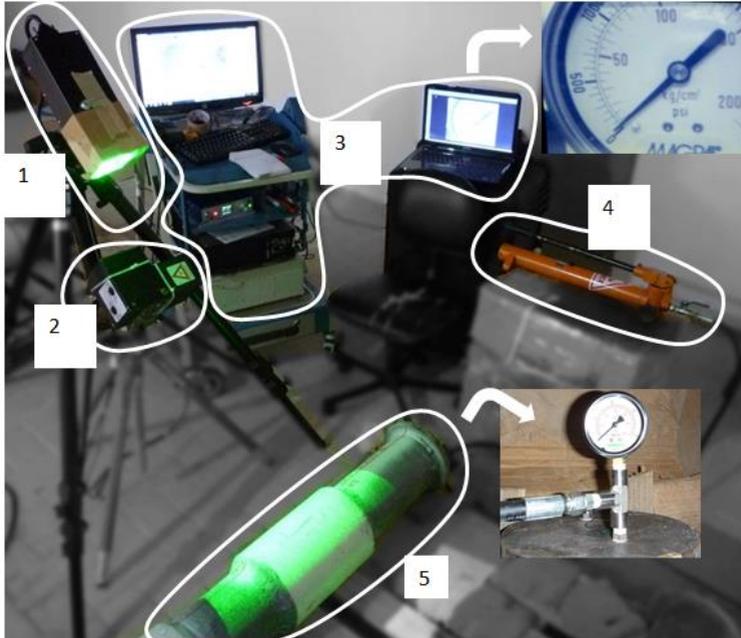
Figura 34 e pode ser dividida em três módulos: módulo de iluminação laser (item 1), módulo de aquisição de imagens (item 2), controle e processamento de dados (item 3) e o módulo de carregamento (bomba hidráulica, item 4). Adicionalmente, tem-se o item 5 como o corpo de prova tubular com revestimento compósito.

Figura 33 - Configuração simplificada de um ensaio de shearografia.



Fonte: [1].

Figura 34 - Bancada de ensaio de shearografia em corpos de prova tubulares.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.1 Módulo de iluminação

O módulo de iluminação, Figura 35, é composto por uma fonte de luz laser e um sistema óptico de expansão do feixe. Ambos os componentes são montados em uma caixa metálica, para trazer maior robustez e segurança ao equipamento. Essa caixa, por sua vez, é acoplada a um tripé, de forma a ser posicionada e direcionar o feixe laser para a região de interesse.

Figura 35 - Módulo de iluminação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O laser utilizado no sistema de shearografia é o modelo “Torus 532”³³, da empresa “Laser Quantum”. O mesmo tem sua emissão centrada em 532 nm e é emitido no modo TEM₀₀, responsável por uma maior uniformidade da iluminação da superfície. A potência emitida é mantida em 400 mW, para uma maximização da área com valor adequado de iluminação para medição com shearografia. Segundo informado pelo fabricante, o comprimento de coerência é maior que 100 m.

Um sistema óptico divergente é responsável pela expansão do feixe laser com perfil gaussiano de intensidade. Uma vez expandido, o

³³ <http://www.laserquantum.com/products/detail.cfm?id=19>

feixe é utilizado para iluminação do corpo de prova. Importante salientar que se procura alinhar o centro do feixe expandido com o centro da área de inspeção, como forma de um melhor aproveitamento da uniformidade e simetria radial de intensidade do feixe laser.

4.2.2 Módulo de aquisição de imagens

O módulo de imagem é responsável pela formação e digitalização. Seus principais componentes são a câmera e o interferômetro. Outros acessórios também foram agregados a esse módulo, para fins de uma classificação mais enxuta. A seguir são descritos os componentes:

A) Cabeçote de medição

O cabeçote de medição é composto por uma câmera de vídeo de alta resolução e um interferômetro de Michelson modificado para shearografia, conforme descrito no tópico 4.1.3. Sua função é capturar as imagens da superfície, para que sejam calculados os mapas de deformação. Pode estar fixado a um tripé ou preso ao objeto de inspeção através de uma estrutura de alumínio e cintas de poliéster, comumente utilizadas para amarração de cargas [5] e [33]. O modelo utilizado nesse trabalho foi o GII, desenvolvido pela equipe do LABMETRO-UFSC.

B) Microcomputador

O microcomputador utilizado nos ensaios controla o *Módulo de Controle e Potência* (MCP) do sistema de inspeção por meio de comunicação USB e um software específico desenvolvido pela equipe do laboratório

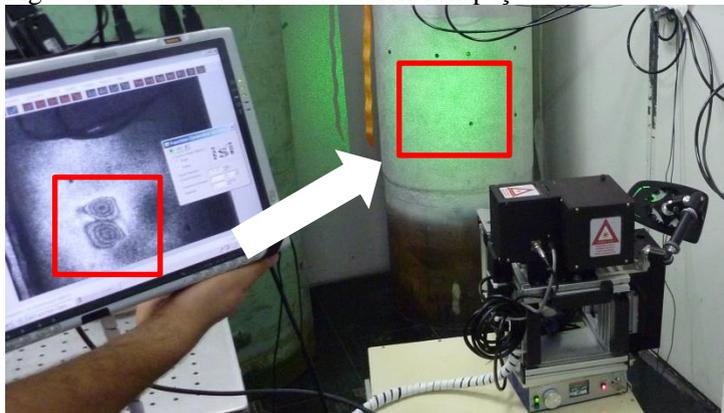
C) Software

O software “*Silicom*” (Sistema Laser para Inspeção de Cilindros Compósitos), apresentado em operação na Figura 36, tem sido desenvolvido³⁴ para utilização no sistema de shearografia. Suas principais funcionalidades incluem a captura e processamento de imagens, geração do sinal de controle dos atuadores piezoelétricos, ajuste do passo dos PZA, animação de franjas (para melhor identificação dos defeitos), sobreposição da imagem dos defeitos na imagem ao vivo e defeito revelado, controle do tempo da excitação térmica, seleção do

³⁴ Este software é frequentemente atualizado para agregação de novas funcionalidades e melhoria do desempenho.

algoritmo de remoção do salto de fase, entre outros. Importante salientar que o desenvolvimento desse software é contínuo, objetivando a melhoria da eficiência das ferramentas já implementadas e o desenvolvimento de novas funcionalidades.

Figura 36 - Software *Siliccom* durante inspeção.



Fonte: [36].

D) *Módulo de Controle e Potência (MCP)*

O módulo de controle e potência, equipamento desenvolvido no LABMETRO-UFSC, serve de interface entre o microcomputador e o cabeçote de medição (Figura 37). Suas principais funções são:

- 1) Controle e temporização da excitação térmica (lâmpadas halógenas);
- 2) Controle do deslocamento de fase por meio do espelho móvel do cabeçote;
- 3) Alimentação da câmera;
- 4) Alimentação do laser de estado sólido para iluminação da superfície de inspeção.

Figura 37 - Equipamento desenvolvido no LABMETRO–UFSC, denominado “módulo de controle e potência”.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.3 Módulo de carregamento

O módulo de carregamento tem como função imprimir na superfície a ser medida uma pequena deformação produzindo deslocamentos da ordem de pouco micrometros. Existem diversas técnicas para aplicar o carregamento no corpo de prova (descritas no tópico 4.3). Estas metodologias de excitação têm sido estudadas para aplicação em laboratório e em campo, de forma a se mapear as situações problema e, com isso, possuir um conjunto de alternativas para cada caso de inspeção a ser abordado.

Duas foram as técnicas de carregamento utilizadas nesse trabalho: o carregamento por aquecimento com lâmpada halógena e carregamento por variação da pressão manométrica do tubo.

4.3 TÉCNICAS DE CARREGAMENTO

Normalmente os defeitos presentes em materiais compósitos não estão na sua superfície externa. É necessário aplicar um carregamento que provoque uma reação do defeito interno na superfície do compósito que se traduzirá em anomalias no campo de deformações desenvolvido na sua superfície.

Quando se aplica um carregamento adequado (tipo e intensidade) ao revestimento compósito, haverá uma anomalia no campo de deformações se houverem defeitos [4]. Importante salientar que a recíproca não é necessariamente verdadeira, conforme discutido no tópico 4.1.8. Alterações no campo de deformação podem indicar

descontinuidades de propriedades físicas³⁵, que podem não ser consideradas como defeitos em determinadas situações.

Através das anomalias no padrão de franjas de interferência geradas em um ensaio de shearografia e a floradas na superfície, pode-se inferir a presença, tamanho, profundidade e o tipo de defeito presente em um reparo compósito, conforme os trabalhos [1] [5] e [33].

Diversas são as variáveis que devem ser consideradas ao se escolher o carregamento mais apropriado, são elas: composição e estrutura do compósito, tamanho mínimo e máximo, profundidade e tipo do defeito que se pretende inspecionar, espessura do revestimento, coeficiente de expansão térmica do material sobre o qual o revestimento está aplicado e condições ambientais. Dentre esses, os tipos mais comuns de defeitos encontrados são os descolamentos, delaminações e bolhas de ar entre as camadas da manta compósita e/ou entre o compósito e a parede de aço.

“Um dos critérios para escolha do carregamento ideal é a presença de campos de deformações detectáveis ao longo do material influenciados pela presença dos defeitos. Assim de acordo com o tipo de estrutura analisada ou do tipo de anomalias a distribuição de deformação em toda a peça normalmente tem respostas distintas para cada carregamento.” (Souza, 2012, p. 58).

Segundo a compilação feita por [8], os carregamentos utilizados até então podem ser classificados como estáticos ou dinâmicos, são eles:

Carregamentos estáticos ou quase estáticos:

- 1) Carregamentos mecânicos:
 - flexão;
 - torção;
 - compressão;
 - pressurização interna.
- 2) Carregamento térmico;
- 3) Carregamento dinâmico:
 - vibrações harmônicas;
 - carregamento térmico dinâmico.

Os carregamentos estáticos são assim denominados em contraste aos dinâmicos, que têm variação de intensidade de carregamento muito maior que os primeiros. Em alguns casos é bastante complicado manter o nível de carregamento estável [5] e, nesses casos, os mesmos são

³⁵ Anisotropia localizada na resposta à compressão, tração, cisalhamento e/ou difusão térmica e/ou frequência de ressonância.

denominados “quase estáticos”. O carregamento térmico é um exemplo, pois comumente adquirem-se as imagens após o aquecimento do CP, ou seja, durante o resfriamento.

4.3.1 Carregamento mecânico

Conforme descrito no tópico anterior, o carregamento mecânico pode ser aplicado na forma de flexão, torção, compressão e, no caso de tubulações e vasos, pressurização interna, sendo que todas essas alternativas aplicadas ao material base (tubo ou chapa de aço) geram um campo de deformações que aflora na superfície do compósito.

Essa categoria é uma das mais simples de serem aplicadas em laboratório e particularmente de fácil aplicação em tubulações com luvas compósitas.

“Para detecção de trincas são recomendados carregamentos de tração, flexão ou torção onde a aplicação da tensão deve ser perpendicular à direção da trinca. Estes tipos de carregamentos podem ser aplicados em chapas metálicas, chapas compósitas, laminados, peças de grande porte e geometria simples, dutos e tubulações.” (Souza, 2012, p. 58).

4.3.2 Carregamento por pressurização

No caso de vasos de pressão, tubulações flangeadas (corpos de prova de laboratório) ou trechos de tubulação isoláveis em campo, construídas em aço e revestidas com materiais compósitos³⁶, a variação de pressão interna costuma ser a metodologia mais adequada à inspeção [34].

Dado que a pressão manométrica interna age isotropicamente sobre as paredes do tubo ou vaso de pressão, os campos de deformação serão uniformes em regiões íntegras e apresentarão anomalias em regiões com descontinuidades [34], que possivelmente se tratam de defeitos no revestimento ou na sua adesão ao material de base.

³⁶ Também existem casos de uso de tubulações inteiramente construídas em material compósito, utilizadas em ambiente *offshore* para transporte (a curtas distâncias) de reinjeção de água produzida, transporte de óleo e outras soluções corrosivas, todas em temperaturas moderadas [14]. Apesar de seu alto desempenho estrutural, essas tubulações ainda apresentam dois problemas bastante limitantes: I - Dificuldade na inspeção de integridade (que tem sido feita principalmente com shearografia) e II - O alto custo quando comparado às tubulações de aço.

Mais detalhes sobre o procedimento para pressurização utilizadas nesse trabalho são apresentados no APÊNDICE 3: Processo de pressurização.

4.3.2.1 Sobre o procedimento adotado

A criação de uma metodologia para medição diferencial do tamanho dos furos exigiu a utilização de um carregamento em que houvesse alta qualidade das imagens e boa sensibilidade do sistema de shearografia. Nesse caso, o carregamento através de variação da pressão manométrica no interior do tubo foi a opção escolhida, dentre as técnicas já utilizadas no LABMETRO.

Para um maior controle da intensidade e velocidade do carregamento, utilizou-se a variação de pressão manométrica, de um dado valor positivo até zero, ou seja, utilizou-se o descarregamento dos corpos de prova.

A única diferença entre o carregamento e descarregamento dos CPS, em termos da imagem de shearografia, seria a inversão do sinal da diferença de fase em cada ponto. Em um dos casos a fase é crescente e no outro, decrescente, mas a variação é a mesma, seja qual for o sentido do carregamento.

4.3.3 Carregamento térmico

Um sistema composto de uma chapa ou tubo de aço revestido com material compósito dilata-se quando aquecido e, por consequência, geram-se campos de deformação ao longo de toda a superfície. Os elementos do corpo de prova³⁷ têm propriedades termodinâmicas distintas e, em particular, os defeitos se apresentam como empecilhos ao fluxo homogêneo de calor, agindo como isolantes térmicos locais. A temperatura se eleva nas bordas do defeito, causando uma dilatação anômala localizada. Essas dilatações geram anomalias (descontinuidades) nos campos de deformação e são identificadas pela shearografia [5].

Diversas são as formas de promover o carregamento do CP por aquecimento. As mais utilizadas são baseadas em condução (manta térmica³⁸ e soprador de ar quente) e irradiação (lâmpada incandescente comum, lâmpada halógena ou mesmo um laser infravermelho).

³⁷ Aço, compósito e eventuais bolhas de ar.

³⁸ Comumente utilizada na cura de revestimentos compósitos.

O carregamento térmico é de fácil aplicação e é o que mais tem sido utilizado em campo, dada sua versatilidade³⁹ e transparência em relação ao processo de operação da empresa, sendo a lâmpada halógena (500 W e com refletor, Figura 38) a principal forma de se aplicar esse carregamento em campo. A principal variável trata-se do tempo de carregamento⁴⁰. O mesmo deve ser monitorado caso a caso, de acordo com a experiência do operador, mas costuma ser entre alguns segundos e, normalmente, menor que 1 minuto⁴¹.

Figura 38 - Lâmpada halógena comumente utilizada para carregamento térmico.



Fonte: [18].

Ao se utilizar o carregamento com lâmpada, o CP em questão é aquecido e então se faz a medição no ciclo de resfriamento da superfície⁴², onde as variações de temperatura com o tempo são mais suaves. O tempo de resfriamento pode ser consideravelmente curto e, nesses casos, o método de processamento “Franjas ao Vivo”, tópico 4.1.7, costuma ser a opção mais viável.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, surgiram situações em outras frentes de pesquisa que visavam inspecionar tubulações com

³⁹ Facilidade no posicionamento, inclusive em regiões de difícil acesso. Ajuste de intensidade, tempo de exposição, controle e alcance do carregamento.

⁴⁰ Supondo que não se varie a distancia entre lâmpada e CP.

⁴¹ Tais valores dependem da espessura do revestimento e profundidade do defeito. Os valores aqui apresentados tratam-se do usual para as características de revestimentos e defeitos presentes neste trabalho.

⁴² Com aquisição inicial imediatamente após o aquecimento.

revestimentos espessos ($> 20 \text{ mm}$)⁴³ utilizando a excitação por aquecimento. Nesses casos, a inspeção torna-se muito difícil, pois é necessário o fornecimento de uma grande quantidade de calor ao compósito a fim de se variar a temperatura do aço sob o revestimento. Esse aquecimento demasiadamente longo da superfície do compósito tem dois efeitos negativos: I) Com uma pequena variação de temperatura, a superfície do compósito já dilata além do limite máximo admitido pela shearografia, fazendo com que haja perda de correlação entre os pontos da imagem e acarretando em uma degradação muito significativa da imagem. II) Se o aquecimento for além e a condição de transição vítrea – T_g for superada, haverá uma degradação irreversível da superfície do compósito e, nesse caso, a proposta de se fazer um ensaio não destrutivo é perdida.

Para os casos de revestimentos espessos e excitação por aquecimento, uma nova proposta foi feita, apesar de ainda não ter sido implementada: o aquecimento de tubulações por efeito Joule⁴⁴. Neste caso, espera-se o aquecimento do aço sob o revestimento. Esse método pode ser empregado em laboratório para fins investigativos e em chão de fábrica, para fins de inspeção de um componente recém fabricado, mas dificilmente poderá ser usado em campo, onde se transportam fluidos inflamáveis e se tem atmosferas explosivas.

A literatura [32] reporta a aplicação de carregamentos térmicos dinâmicos que se mostra como uma alternativa bastante atrativa. A mesma consiste em se pulsar o sinal de alimentação da lâmpada halógena, gerando ondas de calor para o interior do material compósito e tubulação. Através da transformada de Fourier é possível uma melhoria significativa da razão sinal/ruído, uma vez que se isolem as frequências de interesse (de excitação) e se filtre as demais.

⁴³ Apesar de não serem tão comuns, existem casos de aplicação de revestimentos compósitos em campo de até 60 mm de espessura. Mesmo não sendo em grande quantidade, existe uma necessidade concreta de uma metodologia de inspeção para esses casos. Para fins de documentação, a grande maioria das aplicações em campo é de até 12 mm de espessura [2].

⁴⁴ Aquecimento de um condutor (no caso, o próprio tubo) devido à aplicação de uma corrente elétrica.

4.3.4 Carregamento vibracional

Dado que a shearografia identifica a anomalia no campo de deformações na superfície do material, decorrente da presença de defeitos internos, esta identificação é tanto mais árdua quanto maior a profundidade desse defeito. Com isso, são necessários carregamentos que tenham uma maior capacidade de propagação no interior da estrutura medida [5] [33].

O carregamento com excitação vibracional apresenta-se como uma ótima alternativa nesses casos de revestimentos espessos e defeitos de geometrias mais simples [1] [5] [33]. Nele, atuadores piezoelétricos (PZA), Figura 39, são acoplados na parede do tubo de aço e excitados com um gerador de sinal⁴⁵ controlado por um software específico desenvolvido pelo fabricante. O comportamento da região de defeito é a de um oscilador harmônico amortecido e forçado. A inspeção basicamente se trata da varredura da faixa de frequência do PZA e identificação das regiões defeituosas e suas frequências de ressonância.

Figura 39 – Dois exemplares de PZA fixados ao tubo de aço através de cinta de Nylon.



Fonte: [36].

A metodologia de inspeção é composta de três etapas: I) É feita uma varredura rápida⁴⁶ na faixa de frequências de atuação do PZA (~30

⁴⁵ Gerado de sinal ligado a um amplificador.

⁴⁶ Pro exemplo, passo de 100 Hz e intervalo de 50 ms.

kHz). São anotadas as faixas de frequência onde os defeitos são revelados. II) São feitas varreduras mais lentas⁴⁷ nas faixas de frequências onde os defeitos foram revelados mais claramente. Uma lista mais estreita de faixas de frequências de ressonância é composta. III) Na terceira etapa, são registradas as imagens (e frequências) onde os defeitos são revelados o mais claramente possível, baseados na lista da etapa II. Importante salientar que cada defeito é melhor revelado⁴⁸ em uma dada frequência que não necessariamente é a mesma para todos eles. Com isso, é necessária a composição de varias imagens (normalmente em frequências distintas) para uma inspeção/varredura baseada em excitação vibracional.

Para aquisição de dados, o método de processamento de imagens é o *Time Averaged*, onde o valor absoluto da amplitude de vibração dos pontos é registrado [1].

A amplitude do sinal de alimentação dos atuadores é um fator muito relevante na inspeção. Se o atuador estiver distante da área de medição e ou a sua amplitude de excitação não for suficiente, pouco se revelará sobre os defeitos presentes no compósito. A utilização de dois PZA lado a lado também é uma alternativa viável para o aumento da intensidade da excitação⁴⁹. Importante salientar que é necessário se fazer uma avaliação da amplitude a ser usada em cada caso, dado que um valor demasiadamente alto pode comprometer a qualidade da inspeção [33] e até comprometer a estrutura física do CP.

Outra vantagem dessa técnica é a transparência da excitação em relação à planta onde se encontra o CP. A inspeção pode ser feita com a tubulação em operação, diferentemente do carregamento por variação de pressão.

A maior desvantagem da técnica trata-se do ruído sonoro causado pela excitação e agravada em ambientes fechados e espaços restritos. A

⁴⁷ Maior intervalo entre a troca de frequência de excitação do PZA e menor passo entre as frequências.

⁴⁸ As propriedades relevantes na avaliação de um defeito são o número de franjas e, principalmente, as bordas bem definidas.

⁴⁹ Dado que o comprimento de onda no aço para as frequências de interesse (~ kHz) é muito maior que a distancia entre os centros de dois atuadores, logo, a combinação das fontes pode ser considerada como pontual e coerentes entre si.

insalubridade no ambiente de inspeção é bastante elevada, mesmo com a utilização de protetores auriculares.

5 CORPOS DE PROVA

5.1 PROJETO

Atualmente as principais aplicações para revestimentos compósitos, na indústria de óleo e gás estão no exterior de tubulações e costados de navios. Os ambientes *offshore* possuem as instalações que mais sofrem com corrosão e, conseqüentemente, onde se tem uma maior demanda por reforços estruturais de compósitos.

Segundo informações levantadas com profissionais da área de óleo e gás, nas plataformas de petróleo brasileiras, os tubos mais utilizados são de diâmetros 100 e 150 mm (4" e 6"), sendo o tubo de 6" e *Schedule* 80 a especificação mais comum.

O escopo deste trabalho envolveu avaliar a resposta da shearografia para diferentes tamanhos dos furos sob o compósito. Para isso, foram construídos 3 conjuntos de 4 corpos de prova tubulares fechados, contendo furos com dimensões variáveis que, doravante, serão denominados de "Flautas"⁵⁰. Por limitações de tempo e recursos, apenas um exemplar de cada Flauta foi revestido com luva de material compósito, preparado e ensaiado dentro do escopo deste trabalho.

A Tabela 3 descreve as características construtivas de cada um dos modelos de corpos de prova.

Tabela 3 - Características construtivas dos corpos de prova.

Modelo	Diâmetro dos furos (mm)	Quantidade de furos para cada diâmetro	Quantidade de flautas construídas
Flauta 1	5 e 10	5	3
Flauta 2	20 e 25	5	3
Flauta 3	30 e 40	5	3
Flauta 4	50	5	3

Fonte: Elaborada pelo autor.

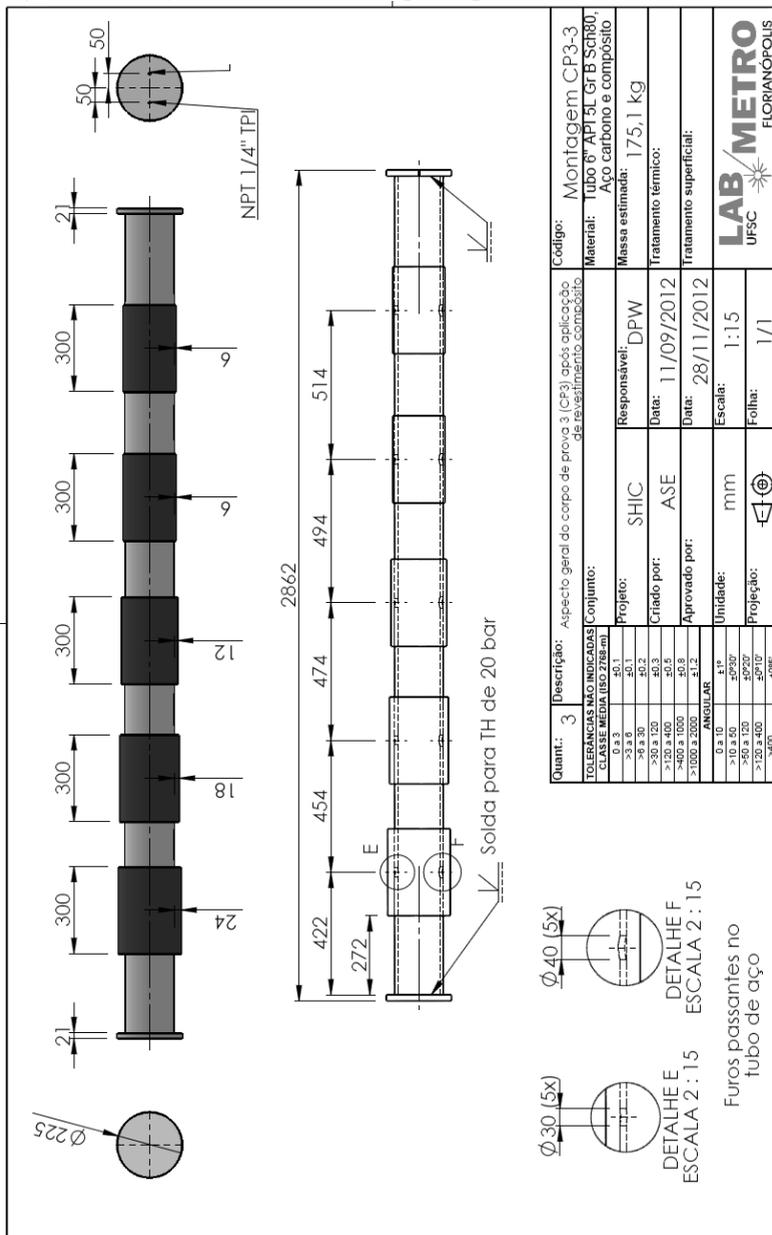
⁵⁰ Devido à similaridade do seu aspecto físico com o instrumento musical.

Os projetos para construção dos corpos de prova foram baseados no DD CEN ISO/TS 24817:2011⁵¹. Os projetos de reparos foram dimensionados para que cada um deles pudesse ser considerado independente dos demais.

O projeto do Corpo de Prova Flauta 3 é apresentado na Figura 40 e, os das demais flautas, no APÊNDICE 2 : Corpos de prova.

⁵¹ Petroleum, petrochemical and natural gas industries. Composite repairs for pipework. Qualification and design, installation, testing and inspection.

Figura 40 - Projeto mecânico do corpo de prova "Flauta 3".



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2 CONSTRUÇÃO

A construção das flautas utilizou tubos de aço carbono de diâmetro 150 mm (6"), API 5L, Gr B e *Schedule* 80, por se tratar das especificações mais comumente utilizadas nas instalações de interesse.

Para a garantia de um melhor acoplamento entre o tubo e o flange, o mesmo foi torneado para a acomodação da borda do tubo. Além disso, foram utilizados cordões de solda dupla para a garantia de estanqueidade.

Figura 41 - Aspecto geral do tubo com flange soldado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3 REPAROS COMPÓSITOS

A priori, os reparos a serem feitos sob as flautas haviam sido projetados de acordo com a ISO 24817:2011, que especifica o comprimento, de acordo com o tamanho do defeito e espessura do reparo. Em um segundo momento, ao se entrar em contato com o Fabricante 2⁵², que construiria o revestimento, o mesmo sugeriu que fossem utilizados os revestimentos de 300 mm de comprimento e múltiplos de 6 mm na espessura⁵³, que vêm sendo frequentemente utilizados como um padrão nessa indústria. A sugestão foi aceita após a verificação de que as especificações atendiam às demandas iniciais.

⁵² Que não foi possível revelar, devido a motivos contratuais.

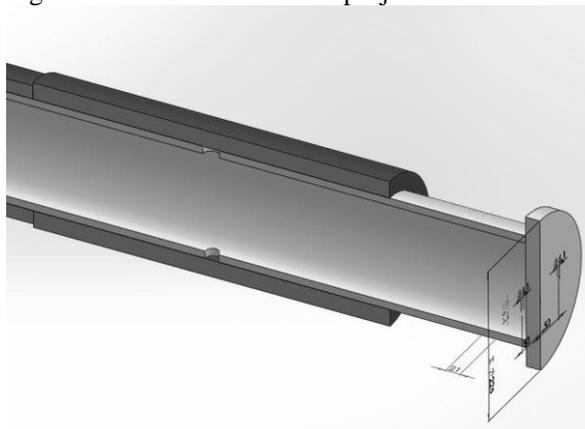
⁵³ No caso desse trabalho, (6, 12, 18 e 24) mm.

Após a aplicação das luvas de material compósito, foram realizados os ensaios hidrostáticos que qualificaram os produtos comumente utilizados, luvas entre (6 e 12) mm de espessura, revestindo furos de até 25 mm de diâmetro, sem tamponamento e pressão de trabalho até 20×10^5 Pa.

As flautas possuem cinco furos de mesmo diâmetro para cada “lado”⁵⁴. As flautas 1, 2 e 3 possuem dois “lados” (dispostos a 180°) e a flauta 5, apenas um. Cada um dos cinco furos de cada “lado” é revestido com uma espessura distinta de revestimento, sendo que estes foram projetados para terem sua posição ao longo do tubo centralizada em relação aos furos, conforme a Figura 42. O primeiro furo de cada tubo (contando a partir do flange sem furos) possui espessura de 6 mm e tamponamento, construído pelo fabricante através de uma chapa metálica e colada com adesivo epóxi, conforme Figura 43.

Os demais furos, que receberam revestimento de (6, 12, 18 e 24) mm, e foram revestidos sem a utilização de tamponamento, conforme Figura 44. A construção das flautas dessa maneira visou a simulação de um processo de corrosão no tubo de aço após a aplicação de um reparo feito a partir da luva de material compósito. O aspecto final de um trecho de tubo com as luvas compósitas é apresentado na Figura 45.

Figura 42 - Vista em corte do projeto das flautas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

⁵⁴ O termo “lado” foi utilizado para denominar uma linha sobre a superfície do tubo, paralela ao seu eixo e que contem o centro dos furos. No caso das Flautas 1, 2 e 3, os dois “lados” estão defasados de 180° em relação ao outro.

Figura 43 - Furo com tamponamento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 44 - Aplicação de revestimento sem tamponamento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 45 - Aspecto final de um trecho da flauta com revestimentos compósitos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4 PREPARAÇÃO PARA ENSAIOS

5.4.1 Tratamento da superfície

Durante o processo de confecção do revestimento compósito, pode haver algumas irregularidades em sua cor devido às técnicas intrínsecas da construção (Figura 46). Essas irregularidades prejudicam a qualidade da imagem de shearografia, uma vez que é necessário evitar regiões de diferente refletividade e brilho na imagem capturada.

Figura 46 – Revestimento com mancha devido aos aspectos construtivos da luva compósita.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O revestimento compósito utilizado nas flautas é de cor clara e tem como camada mais externa um polímero translúcido e brilhante que tem função estrutural no produto entregue pelo fabricante. Tal camada translúcida tem um efeito de degradação do *speckle* e da interferência

gerada por dois pontos distintos do objeto no sensor da câmera. A solução adotada foi a pintura da superfície com *spray* branco fosco sobre a área a ser inspecionada, conforme mostra a Figura 47.

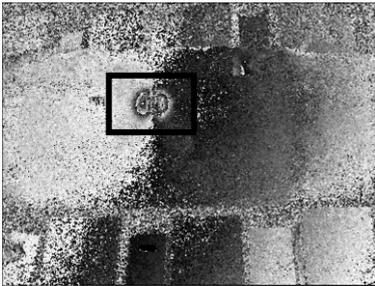
Figura 47 - Aplicação de *spray* branco fosco para uniformização da superfície.



Fonte: Elaborada pelo autor.

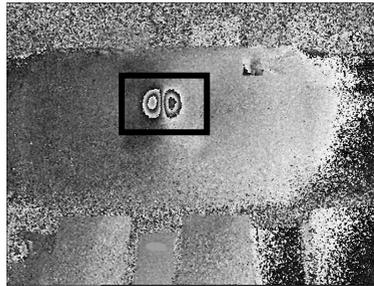
Para o mesmo revestimento, a melhoria da qualidade das imagens de shearografia foi significativa entre o corpo de prova sem (Figura 48), e com pintura (Figura 49). Notar que no segundo caso, o defeito aparece de forma mais clara e suas bordas são mais bem definidas.

Figura 48 - Ensaio de shearografia realizado sem pintura da superfície.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 49 - Ensaio de shearografia realizado com pintura da superfície.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4.2 Identificação dos reparos

A identificação de cada reparo das flautas foi feita com um código único, precedido da letra “R”, de modo que em um momento futuro, os ensaios poderiam ser identificados, de acordo com a nomenclatura presente no tópico **Erro! Fonte de referência não encontrada.** As tabelas 6, 7, 5 e 4 resumem as características dos reparos em cada uma das flautas. Além do número de cada reparo, os

mesmos também tem o atributo “lado”, que identifica o conjunto de reparos com o mesmo diâmetro de furo.

Uma peculiaridade da Tabela 7 é que a mesma apresenta apenas um lado. Isso se deve ao fato de que, de acordo com a ISO 24817:2011, não se poderia inserir outro furo na face oposta ao furo de $\phi 50$ mm, em um tubo de 6”, e considerar ambos os reparos como independentes.

Doravante, com o objetivo de tornar o texto mais sucinto, todos os reparos serão identificados por sua sigla. Os dados de identificação do corpo de prova, diâmetro do furo e espessura do revestimento serão apresentados em notas de rodapé.

Tabela 4 - Identificação dos reparos da Flauta 1.

Flauta 1					
Lado F			Lado G		
Reparo	Φ furo (mm)	Espessura do revestimento (mm)	Revestimento	Φ furo (mm)	Espessura do revestimento (mm)
R26	5	6 (tamponado)	R31	10	6 (tamponado)
R27	5	6	R32	10	6
R28	5	12	R33	10	12
R29	5	18	R34	10	18
R30	5	24	R35	10	24

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5 - Identificação dos reparos da Flauta 2.

Flauta 2					
Lado D			Lado E		
Reparo	Φ furo (mm)	Espessura do revestimento (mm)	Revestimento	Φ furo (mm)	Espessura do revestimento (mm)
R16	20	6 (tamponado)	R21	25	6 (tamponado)
R17	20	6	R22	25	6
R18	20	12	R23	25	12
R19	20	18	R24	25	18
R20	20	24	R25	25	24

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6 - Identificação dos reparos da Flauta 3.

Flauta 3					
Lado A			Lado B		
Reparo	Φ furo (mm)	Espessura do revestimento (mm)	Revestimento	Φ furo (mm)	Espessura do revestimento (mm)
R1	30	6 (tamponado)	R6	40	24
R2	30	6	R7	40	18
R3	30	12	R8	40	12
R4	30	18	R9	40	6
R5	30	24	R10	40	6 (tamponado)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 7 - Identificação dos reparos da Flauta 4.

Flauta 4		
Lado C		
Reparo	Φ furo (mm)	Espessura do revestimento (mm)
R15	50	6 (tamponado)
R14	50	6
R13	50	12
R12	50	18
R11	50	24

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4.3 Método de nomeação de ensaios

Devido à grande quantidade de imagens geradas, sob diversas condições de ensaio, um método de identificação foi criado. O mesmo reúne todas as informações relevantes do ensaio e tornam muito eficientes a identificação a posteriori das imagens, uma vez que as mesmas poderão ser usadas nos projetos futuros.

O exemplo a seguir será analisado e seus componentes descritos detalhadamente:

1_FAB2_R1A_SL08_CDP05.tif

Tabela 8 - Análise da metodologia de identificação de ensaios.

1	FAB2	R1A	SL08	CDP05
Dia	Fabricante	Reparo	Desloc. Lateral	Carregamento

Fonte: Elaborada pelo autor.

Dia: Identificação do dia do ensaio. De acordo com as anotações do caderno de laboratório, esse dado vem a ser útil a posteriori, se houver dúvida sobre algum parâmetro ou equipamento usado nesse ensaio em específico.

Fabricante: Uma abreviação do nome do fabricante do reparo compósito é utilizada. Nesse caso, “FAB2” é utilizado para o Fabricante 2.

Reparo: Na fase de planejamento dos ensaios, uma tabela, de identificação de cada região inspecionada, é construída. A letra “R” representa “Reparo”, o número “1” identifica o primeiro reparo inspecionado e a letra “A” identifica o “Lado”, que caracteriza a família de diâmetros inspecionados. Esses dados são fundamentais para uma rápida identificação entre os dados levantados e as Flautas.

Desloc. Lateral: “SL” é a sigla para *Shear* (deslocamento) “Longitudinal” e “08” significa 08 mm. O sinal positivo omitido significa o deslocamento feito no sentido da esquerda para direita. Além da direção longitudinal, também foram feitos ensaios na direção transversal ao tubo, sua sigla “ST”. Os valores utilizados nos ensaios das Flautas foram (08, 12 e 16) mm.

CDP05: O último item descreve o tipo de carregamento, nesse caso, “Carregamento por decréscimo de pressão”. Além deste, o carregamento por aquecimento com lâmpada halógena, sigla “CA” também foi usado nesse trabalho.

6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

6.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Como primeira decisão, foi escolhido um intervalo para duas variáveis que influenciam diretamente na sensibilidade do sistema: o deslocamento lateral e a variação da pressão interna.

Para o deslocamento lateral foram escolhidos 3 valores: (8, 12 e 16) mm, baseado no tamanho dos defeitos que se pretendia medir e em valores práticos para se utilizar em laboratório e em campo.

O manômetro utilizado neste trabalho tem o intervalo de medição de pressão manométrica entre (0 e 20) bar. Decidiu-se utilizar como medição mínima o primeiro quarto da faixa de medição, ou seja, 5 bar. Os três valores (10, 15 e 20) bar também foram escolhidos devido a sua praticidade.

Levando em conta essas duas variáveis, temos 12 condições possíveis, que foram aplicadas em cada um dos 10 furos da flauta 3. Com a coleção de imagens levantadas nesta etapa, alguns resultados foram sistematizados, de forma a diminuir o número de ensaios das demais flautas.

Utilizando a coleção de imagens levantadas, uma forma de sistematização foi estudada. As alternativas foram 1) Área e/ou volume da anomalia no campo de deformações aflorado na superfície e 2) largura da anomalia aflorada na superfície.

Para a hipótese 1, inúmeras alternativas foram testadas. Algumas delas baseadas em [18] e várias outras soluções implementadas em softwares especialmente desenvolvidos para esse projeto. Até o momento de conclusão desse trabalho, esse método não havia apresentado resultados significativos, com os quais se pudesse fazer um modelo conciso onde se fosse incluído o deslocamento lateral, a espessura do reparo e o carregamento.

A hipótese 2 apresentou-se bastante promissora, além de bem mais simplificada. Sendo assim, os dados foram sistematizados e um modelo para a largura da anomalia aflorada foi desenvolvido.

Além disso, um dos objetivos da análise de dados foi a de definir as condições ideais de carregamento e o DL para utilização em laboratório e, se possível, a utilização de um valor único de cada variável para todo o intervalo de medição utilizada.

6.2 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O primeiro passo para a inspeção de shearografia, conforme realizado nesse trabalho, é o preenchimento do CP com água, conforme descrito no Apêndice 3: Processo de pressurização.

Em seguida, os equipamentos são montados ao redor do CP, conforme foi apresentado na

Figura 34. O sistema de iluminação e o cabeçote são posicionados em determinadas distâncias do CP. No caso do cabeçote, o objetivo é de se obter uma imagem semelhante (em termos de ampliação) entre os ensaios realizados para os diversos reparos. Uma imagem sem deslocamento lateral⁵⁵ é adquirida, para fins de apresentação de resultados a posteriori. O DL é inserido através do ajuste no parafuso do cabeçote. Uma imagem “ao vivo” é adquirida, para fins de obtenção da escala da imagem (relação pixel/mm) a posteriori. O procedimento de “calibração do PZA” é realizado. Nessa etapa, o software faz variar o deslocamento do PZA e uma variação de 2π na fase de um determinado pixel é registrada. O software armazena a intensidade do pixel para cada passo. Os pontos de interesse são os três defasados em $\pi/2$ em relação ao anterior. Com esses valores, é possível fazer o PZA deslocar o espelho no eixo x, Figura 24, para aquisição das quatro imagens defasadas em $\pi/2$ das equações (25), (26), (27) e (28).

Através da bomba hidráulica manual, pressuriza-se a tubulação até o valor de pressão desejado. É feita a aquisição das imagens de referência. O software permanece rodando e exibindo novos mapas de diferença de fase na tela. Abre-se a válvula da bomba manual, para o alívio da pressão interna do CP. Os mapas de diferença começam a exibir as imagens de shearografia contendo franjas que revelam a presença, localização e tamanho⁵⁶ dos defeitos. Aguarda-se o processo de total despressurização, monitorado através do manômetro. Ao final desse processo, a função de aquisição é interrompida e a imagem de shearografia é salva na memória do computador utilizando-se da metodologia descrita no tópico 5.4.3.

Os ensaios nesse mesmo reparo são realizados para todas as configurações de DL e ΔP planejados. Para o primeiro corpo de prova

⁵⁵ Imagem real da superfície inspecionada.

⁵⁶ Através dessas imagens, é possível inferir o tamanho dos defeitos aflorados, descontando-se o DL, conforme descrito no próximo tópico.

ensaiado, Flauta 3, foram realizados 12 (⁵⁷) desses ensaios para cada reparo/furo, totalizando 120 ensaios na Flauta 3.

Para a utilização de carregamento térmico com lâmpada halógena, o procedimento segue, basicamente, os mesmos passos. A diferença é que o carregamento se dá com o aquecimento do composto e as imagens são adquiridas no ciclo de resfriamento do mesmo.

6.3 EXTRAÇÃO DE DADOS

Após o trabalho experimental, a coleção de imagens levantadas deve ser processada. Neste trabalho, os dados levantados estão relacionados à largura (em mm) da anomalia aflorada e sua dependência com as demais variáveis: deslocamento lateral, carregamento, espessura do reparo e diâmetro do furo.

6.3.1 Conversão pixel-milímetro

O primeiro passo para a determinação do tamanho real das franjas trata-se da “conversão pixel-milímetro”.

Para se inserir o deslocamento lateral desejado na imagem, um adesivo quadrado, de comprimento lateral padrão de 16 mm, é fixado no reparo. O parafuso correspondente ao deslocamento lateral longitudinal (paralelo ao eixo do tubo) é ajustado até que duas imagens completas do adesivo sejam visíveis, lado a lado e sem sobreposição, conforme mostra a Figura 50. Dessa forma, o deslocamento lateral é igual ao comprimento do lado do adesivo quadrado. As bordas do adesivo são caracterizadas por um contorno preto, para fins de melhor identificação visual.

Após o deslocamento lateral ser ajustado, uma imagem “ao vivo”, como a Figura 50, é capturada e salva. A posteriori, na etapa de quantificação dos dados, a imagem é aberta no programa “Qualifica Defeito”⁵⁸, onde a ferramenta que contorna uma área retangular de interesse⁵⁹ é utilizada. O centro e as bordas do retângulo da ferramenta são posicionados de forma circunscrita no quadrado, Figura 51. A largura total do retângulo é mostrada na barra de títulos, nesse caso, 64

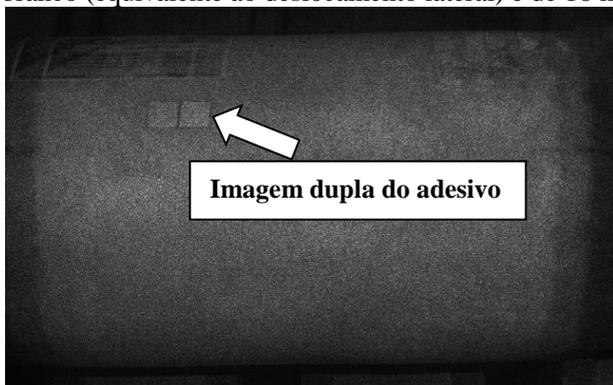
⁵⁷ Três valores de DL (8, 12 e 16) mm e quatro valores de ΔP (5, 10, 15 e 20) bar.

⁵⁸ Desenvolvido para esse trabalho.

⁵⁹ Um retângulo que o usuário ajusta ao tamanho e posição desejada. O número de pixels relativos a largura e altura são indicados no software. Doravante, essa ferramenta será referida como “enquadramento”.

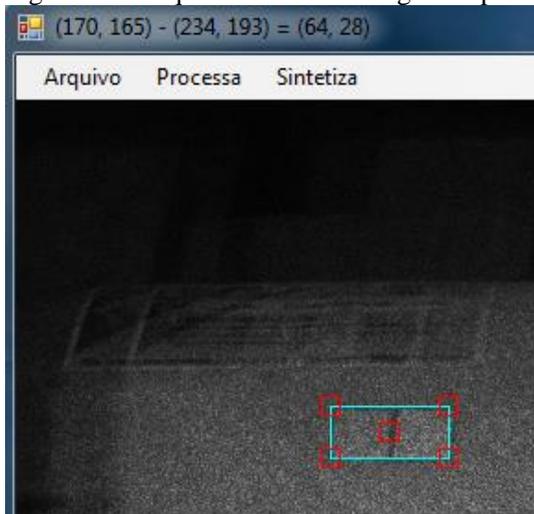
pixels. Sendo assim, conclui-se que esses 64 pixels da imagem equivalem a 32 mm da superfície medida, ou seja, a constante de conversão é (1 mm/ 2 pixels).

Figura 50 - Imagem "ao vivo" capturada no R1⁶⁰. O padrão quadrado branco (equivalente ao deslocamento lateral) é de 16 mm.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 51 - Enquadramento da imagem dupla do padrão de 16 mm.



Fonte: Elaborada pelo autor.

⁶⁰ Φ_{furo} 30 mm, espessura do revestimento 6 mm, com tamponamento.

Através desse resultado, todos os comprimentos longitudinais dos ensaios realizados no R1 podem ser transformados da unidade de pixels para milímetros⁶¹ através da constante de conversão.

6.3.2 Determinação das dimensões da área com franjas

O segundo passo trata-se da determinação das larguras da área com franjas. Cada ensaio gerou uma imagem de shearografia, que foi identificada através do nome do arquivo, de acordo com as características do ensaio⁶².

Novamente, o procedimento consiste em enquadrar um retângulo, circunscrito à área com franjas, conforme (Figura 52). A altura e largura, em pixels, não determinadas. No caso, 76 e 59, respectivamente.

Desse valor é subtraído o número de pixels equivalentes ao deslocamento lateral e , então, multiplica-se o resultado pelo inverso do fator de escala pixel/mm para o ensaio em questão. O resultado trata-se da largura, em milímetros, da região que contem as franjas. No caso da Figura 52, a largura dessa região⁶³ é de 22 mm.

Esse procedimento foi realizado para cada imagem de shearografia obtida, resultando nos gráficos do tópico 7.2.2.

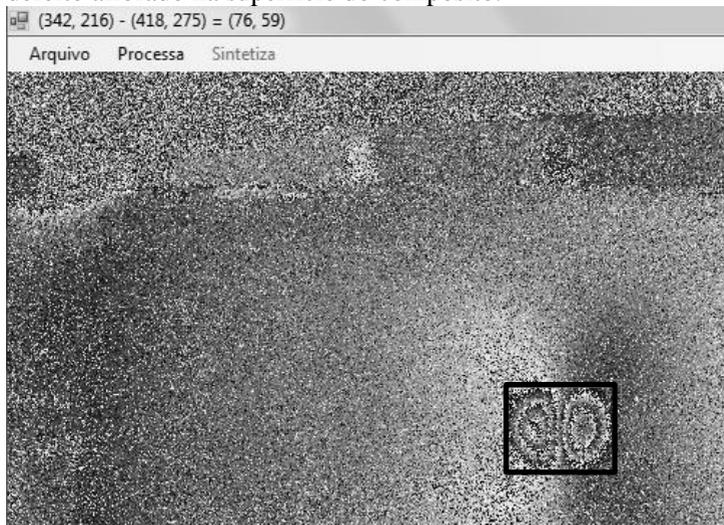
Esse mesmo procedimento pode ser adotado para a medição da altura (dimensão vertical) do defeito a florado. Nesse caso, deve-se mudar a direção do deslocamento lateral para a vertical e executar o procedimento descrito nesses dois últimos tópicos. Importante salientar que nesse caso, a direção do DL será perpendicular ao do eixo do tubo, acarretando em uma imagem com franjas na direção do DL (que estão relacionadas à geometria do tubo (Figura 53)) sobrepostas às franjas relacionadas ao defeito. Esse tipo de imagem, em vários casos, são significativamente mais complicadas de se analisar do que suas equivalentes com DL longitudinal (Figura 54).

⁶¹ Importante salientar que todos os ensaios no R1, assim como a imagem ao vivo, foram realizados com o mesmo posicionamento da câmera em relação ao corpo de prova, sendo assim, todas as imagens são equivalentes do ponto de vista geométrico.

⁶² Conforme exemplificado no tópico 0, onde se descreve a metodologia de nomenclatura criada.

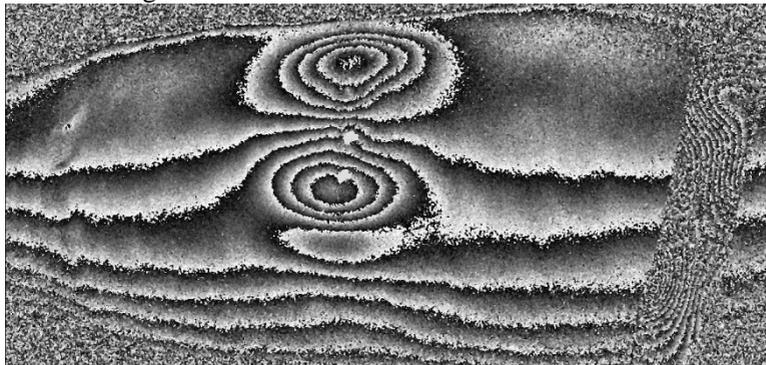
⁶³ Largura: $\{[(76 \text{ pixels da Figura 52}) - (32 \text{ pixels do DL, Figura 51})] \times (1 \text{ mm}/2 \text{ pixels})\} = 22 \text{ mm}$.

Figura 52 - Exemplo de enquadramento de franjas de shearografia no defeito aflorado na superfície do compósito.



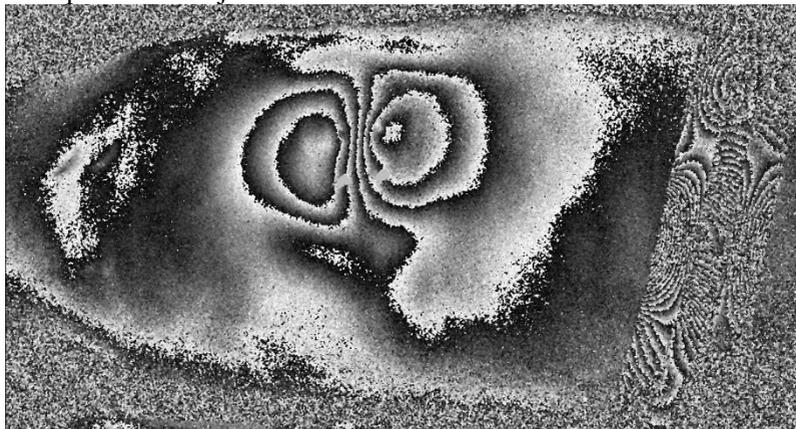
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 53 – Corpo de prova tubular revestido com luva compósita, DL transversal 16 mm, ΔP 15 bar. Ênfase na presença de franjas sobrepostas às de shearografia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 54 - Corpo de prova tubular revestido com luva compósita, DL longitudinal 16 mm, ΔP 15 bar. Não existem franjas devido à geometria sobrepostas às franjas relacionadas ao defeito.



Fonte: Elaborada pelo autor.

6.3.3 Dificuldades encontradas

Podem-se classificar as imagens de difícil classificação em três tipos, a saber:

1) Imagens assimétricas:

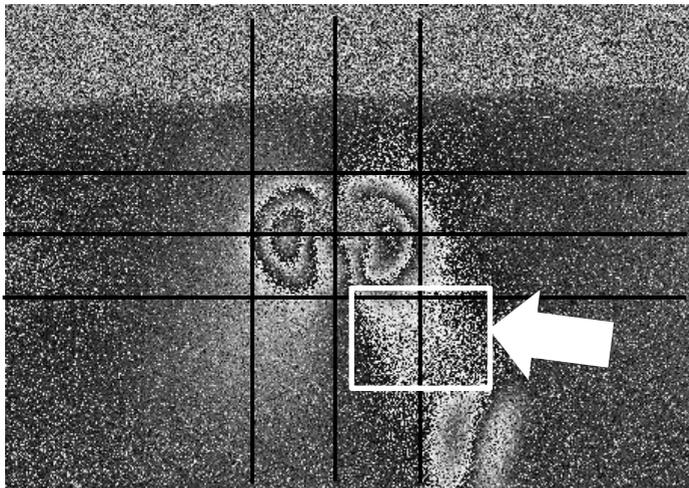
A dificuldade reside em encontrar a posição e tamanho de um retângulo circunscrito nas franjas. A técnica utilizada trata-se de centrar o retângulo circunscrito no eixo de simetria da figura e desconsiderar as bordas degeneradas, como é o caso da borda inferior do lóbulo direito (elipse) da Figura 55.

2) Muitas franjas:

Algumas imagens, devido à grande sensibilidade causada pelo carregamento e/ou deslocamento lateral, apresentam um número tão grande de franjas que as mesmas deixam de ser identificáveis para o software e mesmo para a avaliação do operador, conforme a Figura 56. Alguma experiência é necessária para se fazer o enquadramento do retângulo, retirando-se assim a informação da largura. A principal técnica trata-se da delimitação dos limites das franjas periféricas de longo período.

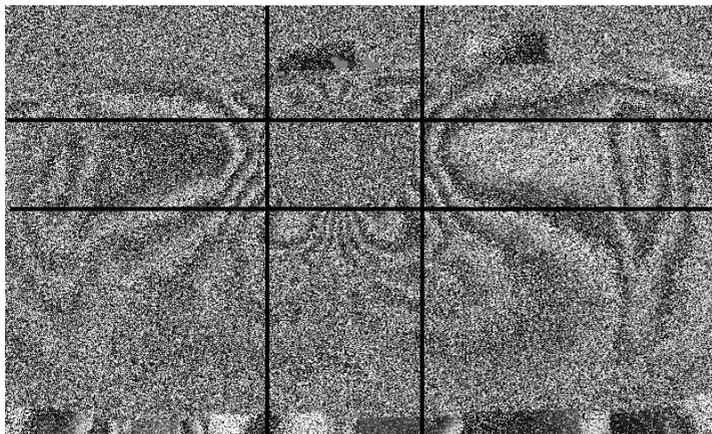
Essa situação pode ser evitada através da inspeção de shearografia com menor sensibilidade, ou seja, menor nível de carregamento e/ou DL.

Figura 55 - R8, DL 8 mm e ΔP 05 bar. Exemplo de imagem não simétrica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 56 - R15, DL 16 mm e ΔP 20 bar. Imagem com grande número de franjas, contagem impossível a olho nu e limites das franjas difíceis de localizar.

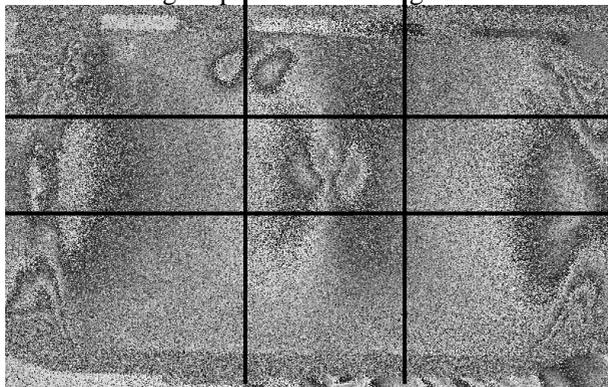


Fonte: Elaborada pelo autor.

3) Franjas degeneradas:

A Figura 57 mostra dois lóbulos simétricos, diferentes da imagem com o formato “borboleta” presente nos demais casos. Isso se deve a um defeito não projetado, decorrente do processo de fabricação.

Figura 57 - R18⁶⁴, DL 12 mm, ΔP 15 bar. Exemplo de padrão disforme, diferente da figura padrão de shearografia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

⁶⁴ Φ furo 25 mm, espessura do revestimento de 18 mm, em tamponamento.

7 AVALIAÇÕES E RESULTADOS

7.1 AVALIAÇÃO QUALITATIVA

7.1.1 Equivalência entre as variáveis da sensibilidade

A Figura 58 mostra a tabela construída a partir dos ensaios realizados no “Reparo 2”, da “Flauta 3”. Cada coluna corresponde a um valor diferente de DL (8, 12 e 16) mm e cada linha a uma variação de pressão distinta (5, 10, 15 e 20) bar. A partir dessa tabela foi possível identificar grande semelhança entre as imagens de shearografia, para o furo passante contidas nas diagonais indicadas na figura⁶⁵. A mesma tendência foi notada para os demais reparos da “Flauta 3”⁶⁶. Para um melhor entendimento, foi utilizada uma moldura e setas de cores diferentes para cada uma das diagonais de imagens semelhantes.

Através desses resultados, foi planejado que os ensaios dos demais corpos de prova (Flauta 1, 2 e 4) seriam realizados em menor quantidade, a fim de reduzir o tempo de inspeção. Sendo assim, apenas uma imagem de cada uma das diagonais foi obtida. A Tabela 9 resume as propriedades de cada CP, bem como o número de ensaios com carregamento por aquecimento (CA) e por variação de pressão.

Tabela 9 - Total de ensaios realizados nos CP tipo Flauta.

Modelo	Diâmetro dos furos (mm)	Quantidade de furos inspecionados	Ensaio com CA	Ensaios com ΔP
Flauta 1	5 e 10	10	0	50
Flauta 2	20 e 25	10	0	50
Flauta 3	30 e 40	10	12	144
Flauta 4	50	5	0	29
Total		35	12	273

Fonte: Elaborada pelo autor.

⁶⁵ No atual estado de desenvolvimento do projeto, ainda não se tem uma metodologia para comparação quantitativa de tais imagens.

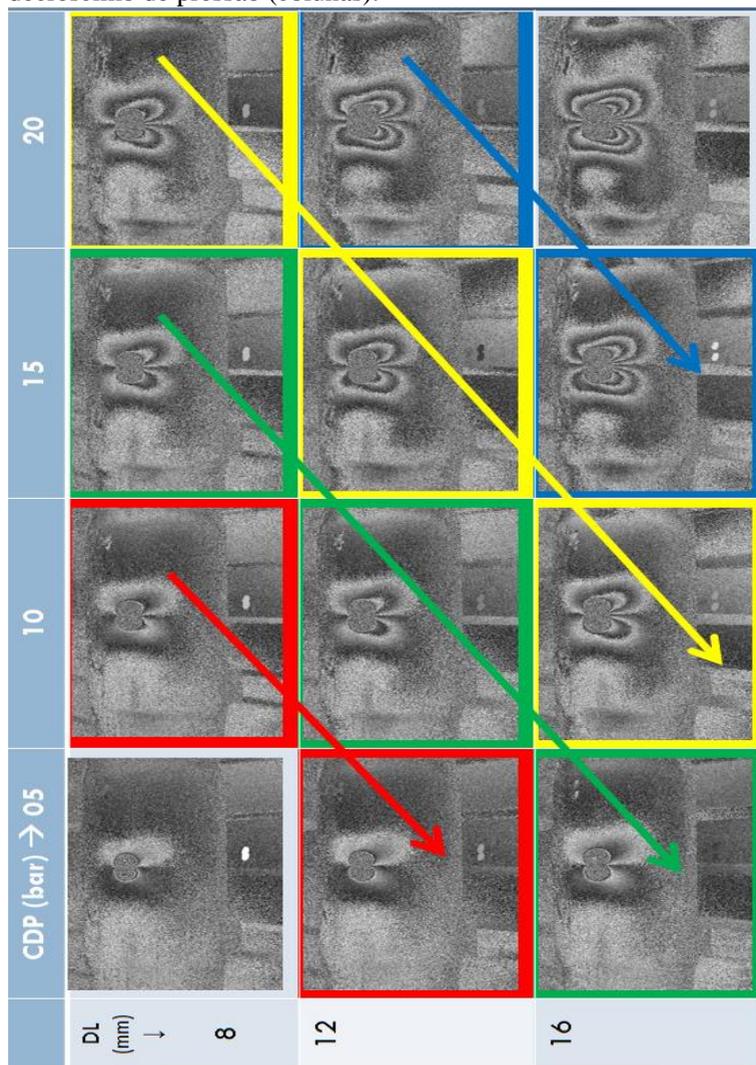
⁶⁶ E também em um revestimento de outro fabricante em um diferente corpo de prova. Tais resultados fogem ao escopo desse projeto.

Através dessa generalização, chegou-se a conclusão de que, para o dado tipo de Revestimento 2, do Fabricante 2, e para a condição de furos passantes no tubo sob esse revestimento, a mesma sensibilidade⁶⁷ pode ser obtida aumentando-se o DL em 4 mm, ao invés de aumentar o ΔP em 5 bar⁶⁸. Tal resultado é de expressiva importância para utilização em campo, onde a variação de pressão da tubulação costuma ser um fator limitante. Somado a isso, o DL é um ajuste simples feito no cabeçote de Shearografia. Dessa forma, é muito mais factível se fazer esse ajuste interno no equipamento do que interferir na planta a ser medida, em um parâmetro tão crítico como a pressão interna dos tubos.

⁶⁷ Do cabeçote modelo Michelson GII.

⁶⁸ Esse mesmo comportamento foi obtido em corpos de prova tubulares distintos, com revestimento compósito de outro fabricante.

Figura 58 - Flauta 3: As várias condições de ensaio do Reparo 269, onde tem-se a variação do deslocamento lateral (linhas) e carregamento por decréscimo de pressão (colunas).



Fonte: Elaborada pelo autor.

⁶⁹ Furo de $\phi 30$ mm e revestimento de 6 mm de espessura sem tamponamento.

7.1.2 Classificação das figuras de shearografia afloradas na superfície

Um dos mais importantes resultados deste trabalho trata-se da compilação qualitativa de resultados para futuras inspeções em campo em situações semelhantes.

Para tanto, quanto à identificação do defeito as imagens de shearografia⁷⁰ foram classificadas em três tipos, a saber:

- 1) **Não identificado**⁷¹: a imagem de shearografia não revelaram os defeitos no intervalo de sensibilidade (pressão e deslocamento lateral) e equipamento utilizados.
- 2) **Regular**: a imagem apresenta-se no limiar da detecção, ou seja, ainda é possível identificá-la, mas exige-se alguns artifícios⁷² e uma pessoa com certa experiência na área.
- 3) **Bom**: os defeitos são reavalados de forma inequívoca.

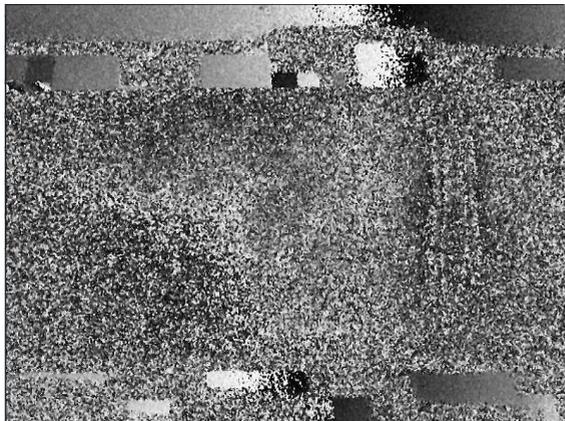
Como exemplo de cada uma das classificações são apresentadas a seguir as Figuras 59, 60 e 61, respectivamente.

⁷⁰ Imagens obtidas com o Hardware, Software, metodologia e a faixa de operação de DL e CDP utilizados nesse trabalho.

⁷¹ Também pode ser entendido como um falso negativo.

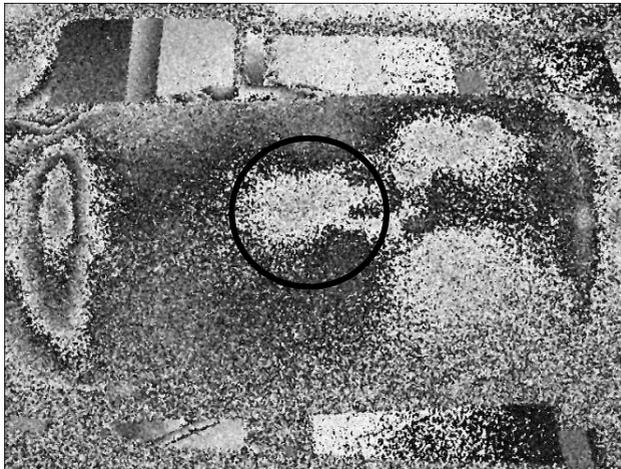
⁷² Discutido no próximo tópico.

Figura 59 – Exemplo de imagem⁷³ classificada como "Não identificado".



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 60 - Exemplo de imagem⁷⁴ classificada como "Regular", com área do defeito destacado.

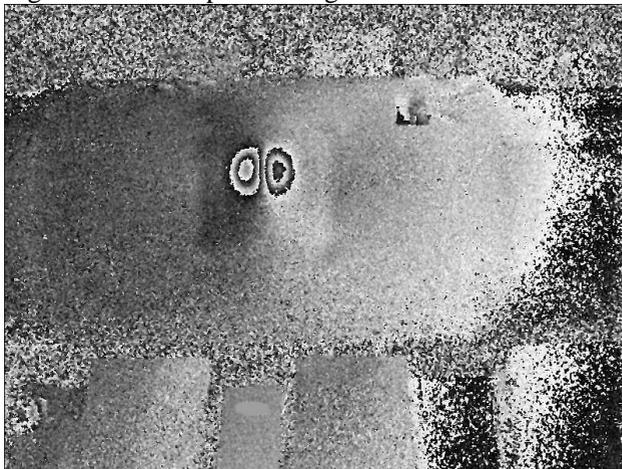


Fonte: Elaborada pelo autor.

⁷³ Características: R26, Φ furo 5 mm, espessura do revestimento 6 mm com tamponamento, carregamento $\Delta P20$, deslocamento lateral de 16 mm.

⁷⁴ Características: R31, Φ furo 10 mm, espessura do revestimento 6 mm com tamponamento, carregamento $\Delta P 20$ bar, deslocamento lateral de 16 mm.

Figura 61 – Exemplo de imagem⁷⁵ classificada como "Bom".



Fonte: Elaborada pelo autor.

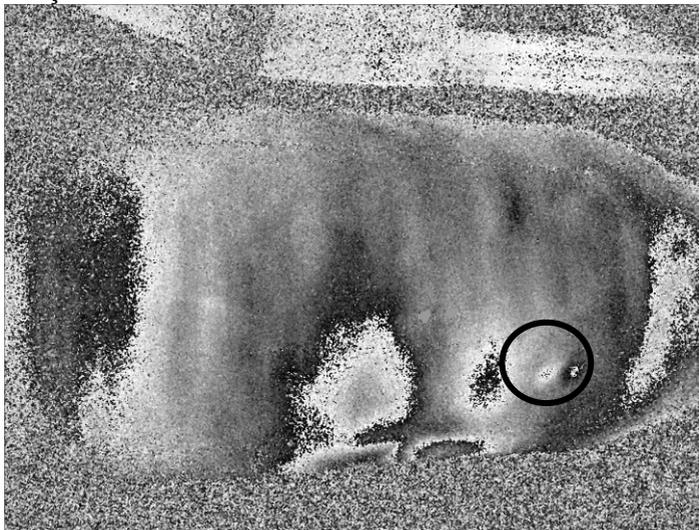
No caso das imagens classificadas como “Regular”, a metodologia comumente utilizada para se comprovar a existência de um defeito envolveu a mudança da direção do deslocamento lateral [5] [8] [18]. Caso a região apresente uma nova figura cujo eixo do suposto defeito também mude (em 90°), infere-se que realmente existe um defeito na posição referida.

Tal técnica foi utilizada nos corpos de prova com revestimento do fabricante 2. No caso, a dúvida estava na identificação de defeitos tangentes à superfície medida⁷⁶. Para isso, foram utilizados os deslocamentos laterais na direção vertical, Figura 62, e horizontal, Figura 63. Em tais imagens, o eixo de simetria do defeito também muda de direção, sendo sempre perpendicular à direção do deslocamento lateral. Com isso, a presença do defeito é evidenciada de forma inequívoca.

⁷⁵ Características: R1, Φ furo 30 mm, espessura do revestimento 6 mm com tamponamento, carregamento ΔP 5 bar, deslocamento lateral de 8 mm.

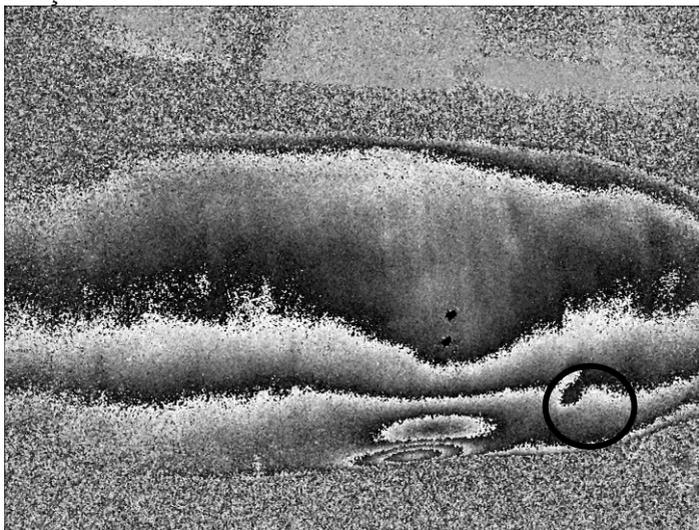
⁷⁶ Em campo, o limite mínimo normalizado é de 200 mm entre as superfícies. Mas isso nem sempre é respeitado [2].

Figura 62 - Imagem de shearografia com deslocamento lateral na direção vertical.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 63 - Imagem de shearografia com deslocamento lateral na direção horizontal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir é apresentada a Tabela 10, que sintetiza parte do levantamento experimental desenvolvido neste trabalho através da indicação do nível de dificuldade na visualização de franjas, de acordo com a espessura do revestimento e o tamanho do furo a ser inspecionado.

Tabela 10 - Classificação qualitativa de identificação dos defeitos sob revestimento compósito do “Produto 2”.

Esp. Revestimento (mm) → Φfuro (mm) ↓	6 Com tamponamento	6	12	18	24
05	Não Identificado	Não Identificado	Não Identificado	Não Identificado	Não Identificado
10	Regular	Regular	Regular	Não Identificado	Não Identificado
20	Bom	Bom	Regular	Regular	Regular
25	Bom	Bom	Regular	Regular	Regular
30	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom
40	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom
50	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom

Fonte: Elaborada pelo autor.

Essa tabela apresenta-se como um importante resultado prático deste trabalho, uma vez que ela é a base para trabalhos e inspeções futuras, no que diz respeito ao gerenciamento de “tempo de cada inspeção X tempo total disponível para inspeção⁷⁷”. Nesse sentido, os resultados classificados como “Bons” são fáceis de serem medidos e seu tempo de inspeção, bastante curto. Um tempo maior será gasto para situações classificadas como “Regulares”, por exemplo, na mudança de intensidade e direção do deslocamento lateral. Já nas situações classificadas como “Não identificados”, recomenda-se a economia de

⁷⁷ Que costuma ser bastante limitado. Além do tempo dispendido para a limpeza, instalação elétrica, de ar comprimido, proteção de vento, chuva e radiação solar direta, adequação do ambiente para o trabalho, segundo normalização vigente e, finalmente, a montagem do sistema de shearografia.

tempo, desconsiderando as medições nas condições em que esses ensaios foram realizados⁷⁸.

Outra situação de interesse está relacionada à classificação das imagens do revestimento fabricante 1⁷⁹. Os ensaios foram realizados em um corpo de prova com furo de $\phi 25$ mm e revestimento de 12 mm de espessura. Todos os ensaios foram classificados como “Bom”. Sendo que tanto as dimensões do defeito aflorado na superfície quanto o número de franjas são considerados expressivos. Adicionalmente, temos o fato de os defeitos serem tamponados, o que dificultaria ainda mais o afloramento de tais anomalias nos campos de deformação, tendo em vista que o tamponamento torna o revestimento mais rígido.

Na tabela anterior, que se refere ao revestimento 2, é possível identificar que a classificação da imagem do furo de $\Phi 25$ mm e revestimento de 12 mm de espessura como “Regular”, ou seja, de difícil identificação.

Através dessas considerações, pode-se montar um diagrama comparativo entre os dois produtos analisados:

Tabela 11 - Resumo comparativo entre os revestimentos 1 e 2, dos fabricantes 1 e 2, respectivamente.

Revestimento 1	Menos rígido	Mais fácil de inspecionar
Revestimento 2	Mais rígido	Mais difícil de inspecionar

Fonte: Elaborada pelo autor.

Esses dados apontam para uma diferença significativa entre as propriedades mecânicas de ambos os revestimentos compósitos. Sendo assim, tanto a tabela qualitativa de resultados quanto os resultados quantitativos descritos na próxima seção não valem para o revestimento 1 do fabricante 1. Importante salientar que tanto as macro conclusões, como a Tabela 10, quanto os modelos apresentados na próxima seção provavelmente terão o mesmo formato e, inclusive, o mesmo comportamento da equivalência entre DL e ΔP também vale para o revestimento 1. A indicação de tal discrepância sugere a direção para trabalhos futuros, avaliando o desempenho dos demais produtos do

⁷⁸ Existem algumas alternativas como aumentar a variação de pressão, o deslocamento lateral e/ou aproximar o cabeçote. Importante salientar que esse não é um resultado definitivo.

⁷⁹ Utilizado em ensaios desenvolvidos fora do escopo desse trabalho, mas sob condições de ensaio e corpos de prova muito semelhantes.

mercado, através de ensaios semelhantes aos que foram descritos nesse trabalho.

7.2 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA

Através dos procedimentos descritos no tópico 6.3, foram extraídos os dados de todos os ensaios. Com eles, foram construídos os gráficos do *diâmetro do furo passante* em função da *largura da anomalia no campo de deformações afluada na superfície*⁸⁰, para cada uma das condições de sensibilidade e para cada espessura do revestimento.

7.2.1 Interpretação dos gráficos

Através dos gráficos apresentados no próximo tópico, é possível concluir que dentre as situações analisadas, a configuração que apresenta as funções mais bem comportadas⁸¹ e os dados mais completos são os da Figura 67, com deslocamento lateral de 12 mm e variação de pressão de 20 bar.

Fez-se o ajuste das curvas através de 3 funções distintas⁸² a saber: logaritmo natural, polinômio de grau 2 e potência das ordenadas⁸³. Na Tabela 12 são apresentados os dados relacionados ao R^2 das regressões:

⁸⁰ Referido nos gráficos apenas como “Largura da anomalia”.

⁸¹ O comportamento não monótono dos demais gráficos ainda não uma explicação definida. Para tal, seriam necessárias a análise de uma maior quantidade de dados ou mesmo um modelo teórico para o fenômeno.

⁸² Essas três funções foram adotadas por se tratar de funções elementares, que apresentam o comportamento monotônico crescente na região de interesse.

⁸³ Modelo $y=x^n$, onde “n” é um número real.

Tabela 12 - Valores de R^2 dos ajustes para os dados das Flautas 2, 3 e 4. DL 12 mm e ΔP 20 bar.

Espessura do revestimento (mm)	Logaritmo natural	Pol. grau 2	Potência das ordenadas
6 (tamp.)	0,9646	0,9679	0,9550
6	0,9011	0,9991	0,9634
12	0,9869	0,9865	0,9684
18	0,8594	0,9795	0,9264
24	0,9233	0,9698	0,9629
Média dos R^2	0,9270	0,9806⁽⁸⁴⁾	0,9552

Fonte: Elaborada pelo autor.

O critério utilizado na escolha do melhor ajuste foi qualitativo (de acordo com a qualidade das imagens obtidas) e quantitativo (maior média de R^2). Nesse sentido, o melhor ajuste foi o polinômio de grau 2, para a condição de DL 12 mm e ΔP 20 bar, que apresenta o valor médio de R^2 de 0,9806. Sendo assim, será sugerido o seu uso para futuras avaliações em que se queira fazer uma estimativa de tamanho de furo dado⁸⁵, em que o valor da largura na anomalia aflorada não é coincidente com os valores aqui apresentados, ou seja, os ensaios realizados neste trabalho. A Tabela 13 apresenta os polinômios ajustados para cada espessura de revestimento, bem como o valor de R^2 para o respectivo ajuste. Com eles calcula-se o diâmetro do furo no tubo “D” em função da largura da anomalia “L”.

Baseado nesse ajuste, a melhor condição de ensaio foi tomada com DL de 12 mm e ΔP 20 bar que, de acordo com o tópico 7.1.1, também pode ser obtida com (DL 16 mm, ΔP 15 bar), (DL 20 mm, ΔP 10 bar) e, por inferência⁸⁶, (DL 24 mm, ΔP 05 bar). Sendo essa última uma condição que menos perturbaria⁸⁷ um processo em andamento na indústria de óleo e gás, pois resultaria na mínima variação de pressão da linha.

⁸⁴ Melhor ajuste encontrado entre as funções utilizadas.

⁸⁵ Para as mesmas especificações de revestimento e tubo.

⁸⁶ Dado que esses testes não foram feitos, mas que podem ser inferidos pelos resultados do tópico 7.1.1.

⁸⁷ Dado que quanto menos se variar a pressão de uma dada tubulação industrial, para fins de ensaio, tanto melhor.

Tabela 13 - Polinômios de grau 2 ajustados para cada uma das espessuras de revestimento, D é o diâmetro em mm do furo passante no tubo de aço e “L” é a largura da anomalia em mm.

Revestimento	Polinômio ajustado	R ²
6 mm tamponado	$D = -0,0064L^2 + 1,167L - 1,5757$	0,9679
6 mm	$D = 0,0101L^2 - 0,0523L + 17,646$	0,9991
12 mm	$D = -0,0049L^2 + 1,295L - 11,543$	0,9865
18 mm	$D = 0,0061L^2 + 0,1392L + 14,838$	0,9795
24 mm	$D = 0,0033L^2 + 0,3608L + 8,9908$	0,9698

Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante salientar que esses polinômios ajustam a as funções apenas nos intervalos de largura abordados neste texto (Figura 67), ou seja, entre (15 e 80) mm de largura da anomalia. **Tais polinômios não devem ser utilizados fora deste intervalo.**

Apesar do caráter introdutório deste trabalho em relação à quantificação de defeitos, é fundamental salientar de que neste tipo de ajuste polinomial, a incerteza é determinada pelo desvio padrão do resíduo da diferença entre a curva e o polinômio.

7.2.2 Gráficos

Nos gráficos apresentados nas Figuras 64, 65, 66, 67 e 68, nenhum dado foi retirado da flauta 1, que apresenta furos de ϕ (5 e 10) mm. Isso se deve ao fato de que a anomalia no campo de deformações não aflora na superfície da luva de material compósito de forma que possa ser medida com os valores de DL, intensidade de carregamento e com o software e hardware utilizados neste trabalho.

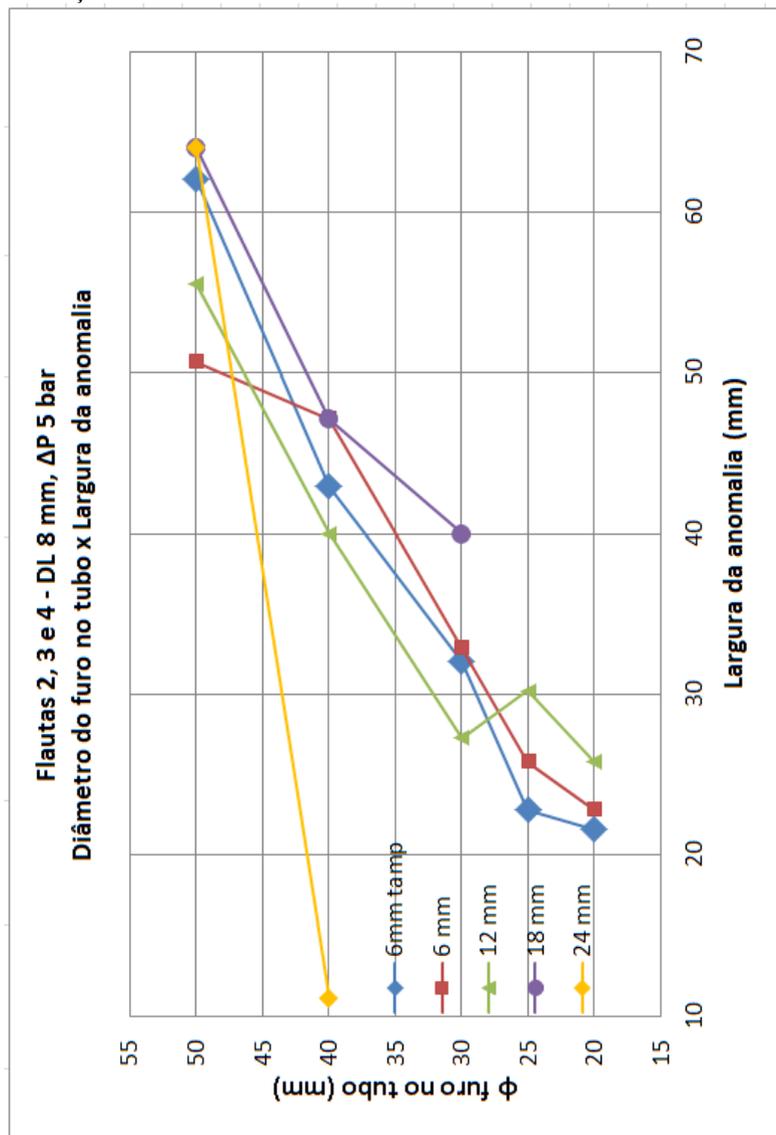
Além disso, não foi possível a extração completa de dados dos revestimentos de (18 e 24) mm de espessura com baixa sensibilidade⁸⁸ devido ao pequeno número de franjas presentes. Dessa forma, as bordas da região de anomalia não ficam bem definidas e a metodologia presente em 6.3 não pôde ser aplicada corretamente. Nesses casos, outros métodos são necessários.

Como exemplo, temos o cálculo de área e volume das imagens de shearografia, como a utilizada por [18]. Tais métodos foram arduamente testados, mas não apresentaram resultados significativos, principalmente

⁸⁸ DL 08 mm e ΔP (05 ou 10) bar.

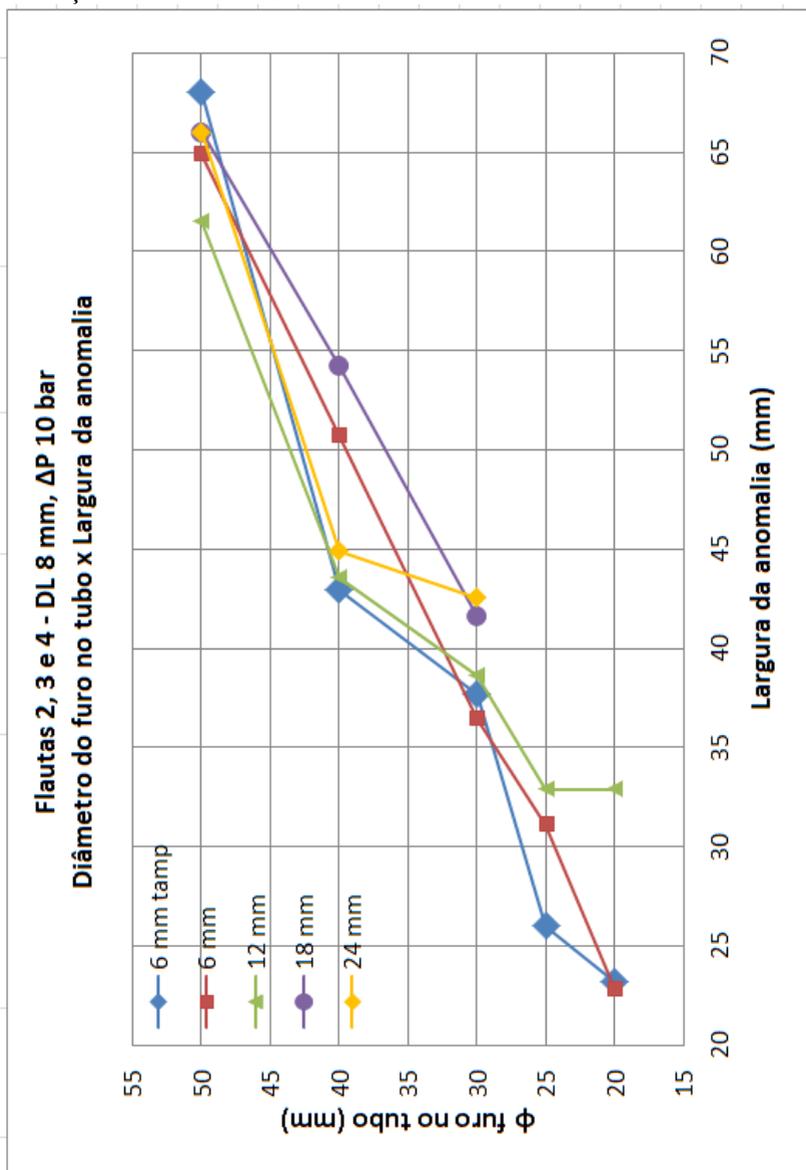
devido à presença de franjas em um número maior do que o software é capaz de contar. Sendo assim, uma nova metodologia, baseada na utilizada por [18], precisa ser desenvolvida.

Figura 64 - Gráfico do Diâmetro do furo no tubo em função da Largura da anomalia no campo de deformações aflorada na superfície. Condições: DL 8 mm e ΔP 5 bar.



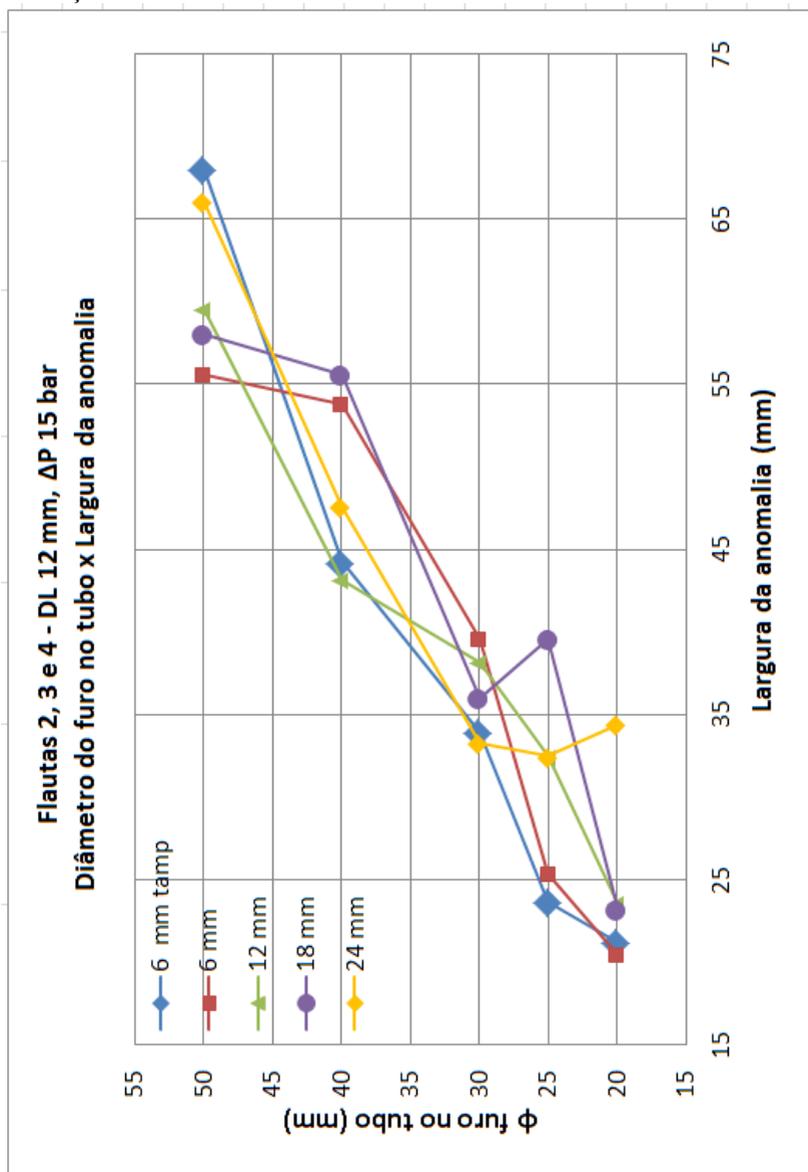
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 65 - Gráfico do Diâmetro do furo no tubo em função da Largura da anomalia no campo de deformações aflorada na superfície. Condições: DL 8 mm e ΔP 10 bar.



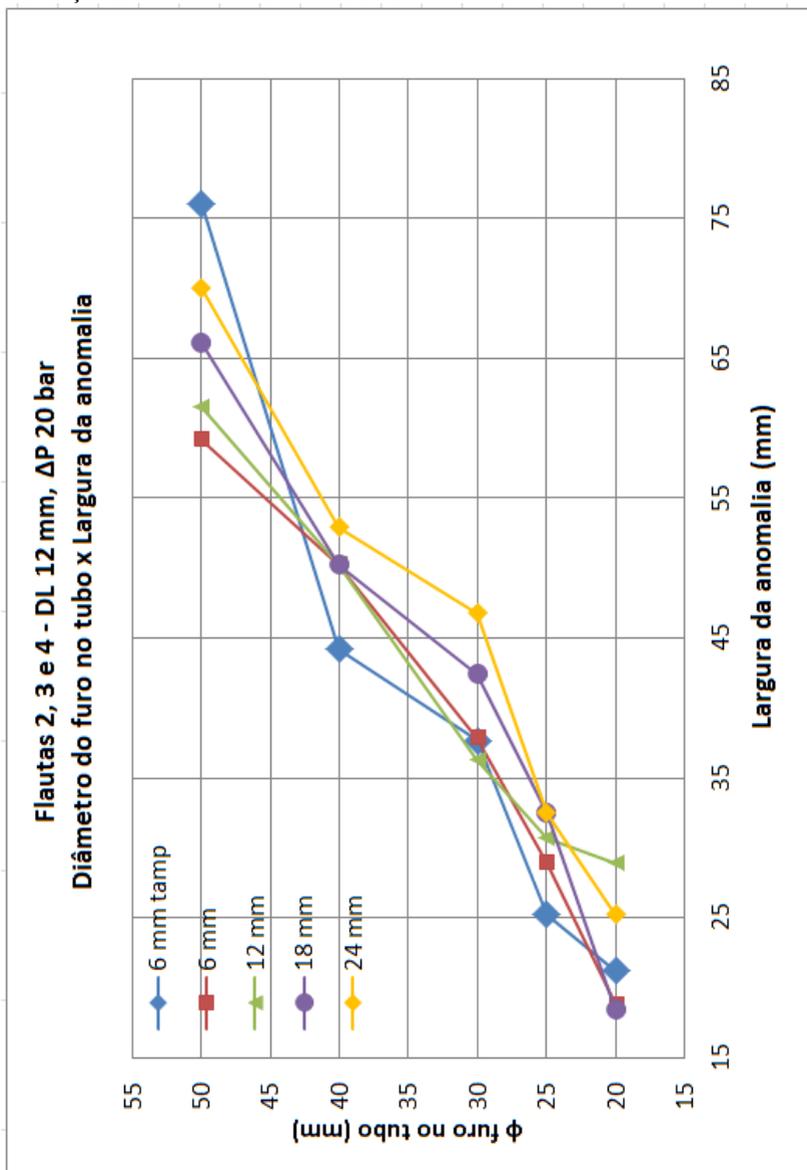
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 66 - Gráfico do Diâmetro do furo no tubo em função da Largura da anomalia no campo de deformações aflorada na superfície. Condições: DL 12 mm e ΔP 15 bar.



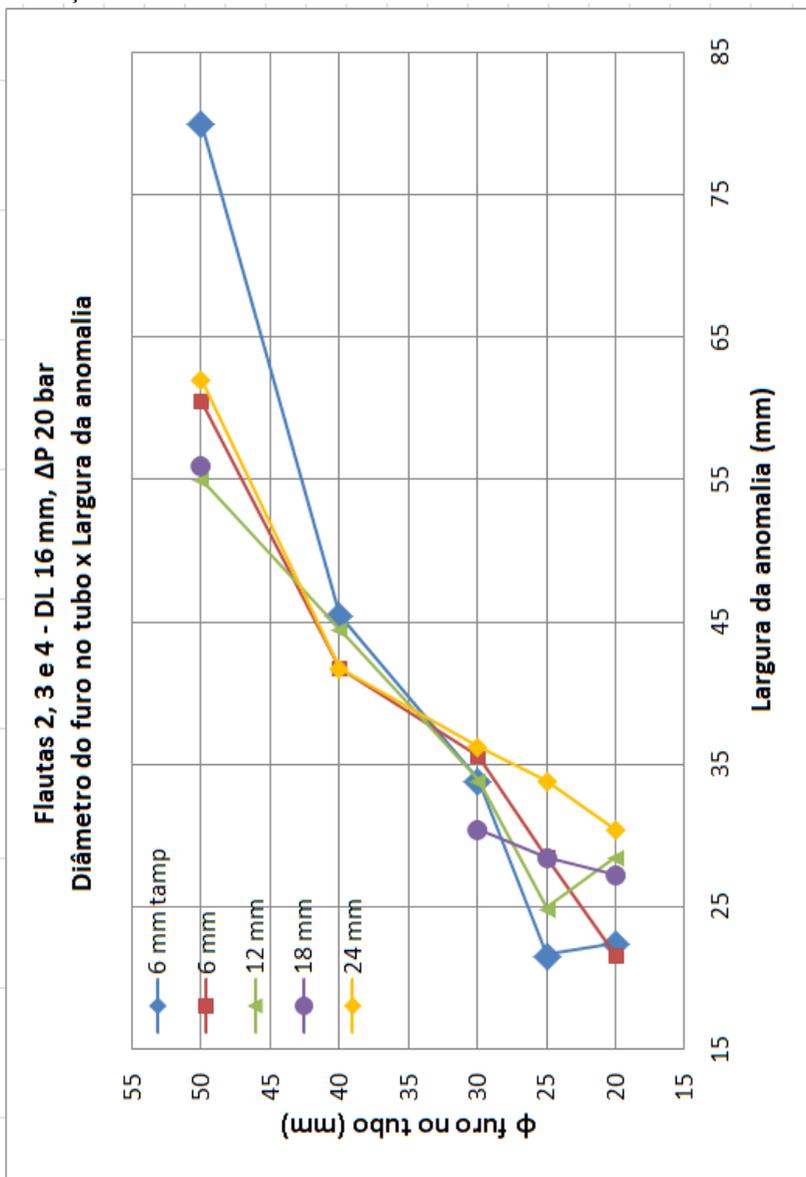
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 67 - Gráfico do Diâmetro do furo no tubo em função da Largura da anomalia no campo de deformações aflorada na superfície. Condições: DL 12 mm e ΔP 20 bar.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 68 - Gráfico do Diâmetro do furo no tubo em função da Largura da anomalia no campo de deformações aflorada na superfície. Condições: DL 16 mm e ΔP 20 bar.



Fonte: Elaborada pelo autor.

7.2.3 Aplicação do método

Após a caracterização de cada espessura do revestimento do fabricante 2, os seguintes passos são sugeridos para inspeção dos corpos de prova:

- 1) Nomear e identificar o corpo de prova e a região de interesse;
- 2) Certificar-se da faixa de pressão que se pode submeter o CP. Prepará-lo para o carregamento com variação de pressão, através da instalação do manômetro e bomba hidráulica;
- 3) Instalar todo o equipamento de shearografia necessário à inspeção;
- 4) Fazer a captura da imagem ao vivo, para futura calibração pixel/mm;
- 5) Realizar o ensaio, de acordo com as condições de DL e ΔP adequadas ao tamanho de defeito monitorado e condição estrutural do CP, respectivamente. Salvar a imagem de inspeção;
- 6) Fazer a calibração pixel/mm para medição da largura do defeito em mm;
- 7) Delimitar as fronteiras e medir as dimensões horizontal e vertical da área relativa as franjas;
- 8) De acordo com as condições adotadas de DL, ΔP e espessura do compósito, selecionar o respectivo polinômio de ajuste;
- 9) Aplicar o valor da largura da anomalia no polinômio e encontrar o valor do respectivo diâmetro do furo;
- 10) Registrar o valor do diâmetro calculado no histórico de inspeção.

7.2.4 Exemplo de aplicação

Supondo a situação em que se faça a inspeção de um revestimento de 6 mm de espessura, sem tamponamento, em um tubo de aço. Adotando as condições de ensaio de DL e CDP (conforme a melhor situação descrita no tópico 7.2.1) DL 12 mm e ΔP 20 bar, ou condição de sensibilidade equivalente⁸⁹. O polinômio que ajusta essa situação é:

$$D = (0,0101L^2 - 0,0523L + 17,646) \text{ mm} \quad (43)$$

⁸⁹ Em termos do balanço entre DL e ΔP .

Onde L representa a largura do defeito aflorado e x, o diâmetro do furo.

Supondo que o defeito aflorado tenha 45 mm de largura (com DL longitudinal), o diâmetro do furo ajustado pelo polinômio será de:

$$\begin{aligned} D &= (0,0101(45)^2 - 0,0523(45) + 17,646) \text{ mm} && (44) \\ &= 35,74 \text{ mm} \end{aligned}$$

Este valor representa o diâmetro do furo no tubo de aço que aflora um defeito de largura 45 mm em um revestimento compósito de 6 mm de espessura, sem tamponamento fornecido pelo Fabricante 2.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo serão abordadas as conclusões deste trabalho e recomendações para trabalhos futuros, incluindo melhorias para os próximos ensaios, equipamentos e corpos de prova.

O objetivo geral deste trabalho foi atingido. O procedimento de inspeção capaz de determinar variações nas dimensões de furos existentes foi apresentado no tópico 7.2, onde foi possível se estabelecer uma relação biunívoca entre o tamanho do furo e os ensaios de shearografia sob determinadas condições experimentais e para um tipo de revestimento.

Os objetivos específicos também foram alcançados. O primeiro, que trata da determinação dos limites de aplicabilidade do procedimento desenvolvido, no que diz respeito ao tamanho dos furos identificáveis para cada espessura do revestimento, é descrito no tópico 7.1.2 e seus resultados são resumidos na Tabela 10.

O segundo tópico dos objetivos específicos trata da sistematização e compilação de uma lista de recomendações do procedimento desenvolvido, bem como recomendações para identificar falsos positivos e falsos negativo. Esses pontos são tratados nos tópicos 6.3.3, 7.1.1 e, principalmente, 7.2.3.

8.1 ASPECTOS POSITIVOS

Este trabalho investigou a viabilidade de quantificar o tamanho de defeitos constituídos de furos passantes existentes em tubulações de aço recobertas por revestimentos de materiais compósitos a partir de inspeções realizadas com shearografia com carregamento por variação de pressão. Para determinar uma relação quantitativa entre o tamanho do defeito e parâmetros das franjas observadas foram dimensionados corpos de prova tipo flauta com diferentes tamanhos de defeitos e espessuras de revestimentos.

Os corpos de prova tipo flauta foram inicialmente ensaiados com carregamento térmico e, posteriormente, por pressurização interna. Esta pressurização interna se mostrou de melhor desempenho, produzindo imagens com qualidade muito melhor que o carregamento por aquecimento. As franjas se apresentaram de forma muito mais nítida e bem definidas.

Através de uma sequência de ensaios, foi possível extrair dados numéricos das imagens da inspeção e correlacioná-los com os tamanhos dos defeitos. Os dados foram melhor ajustados por polinômios de

segundo grau, sendo que os coeficientes (para cada espessura do compósito em particular) foram levantados. Pelo fato das funções serem monotonicamente crescentes, com poucas exceções, foi possível estimar o diâmetro de furos sob o compósito⁹⁰, dado que o polinômio característico do compósito desse fabricante foi determinado. Espera-se, com essa metodologia, monitorar o avanço da corrosão⁹¹ interna de tubulações sob revestimentos compósitos.

Para as várias condições ensaiadas, foi determinado um limiar de sensibilidade para detecção de defeitos com shearografia com carregamento por pressurização, conforme Tabela 10. Os defeitos foram classificados de acordo com sua dificuldade de inspeção. Para os defeitos classificados como “Regulares”, são sugeridos ensaios adicionais com mudança da direção e intensidade do deslocamento lateral, para confirmação da presença de tais defeitos.

A inspeção de revestimentos espessos (da ordem de 18 mm ou mais) é de mais difícil execução, mas é viável pelo carregamento por variação de pressão. No dia-a-dia da indústria de óleo e gás é bastante complicado e pouco provável se interromper a produção para aplicação uma variação de pressão no tubo. Mesmo assim, esta variação da pressão da linha inspecionada ainda é muito mais rápida, menos invasiva e de impacto e custo sobre a produção de pelo menos uma ordem de grandeza menor que uma substituição de trecho. Nesse sentido, o carregamento por variação de pressão apresenta-se como uma solução aceitável nesse cenário crítico, que é a produção de petróleo em ambiente *offshore*.

8.2 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES DE MELHORIAS

Devido aos níveis selecionados para o deslocamento lateral e os níveis de carregamento por pressurização aplicados, uma quantidade expressiva de imagens apresentou um número maior de franjas do que é possível contar a olho nu ou se processar com softwares atualmente utilizados. Esta constatação sugere que possam ser usados diferentes níveis de carregamento, ou de deslocamento lateral. Para tal, será necessária a aquisição de manômetros com menores faixas de medição, para que se possam fazer medições confiáveis em valores menores de pressão manométrica.

⁹⁰ Para o mesmo tipo de tubo, com furos cilíndricos passantes e revestimento de mesmo material e espessura.

⁹¹ Relacionando com o crescente aumento no diâmetro do furo.

Os carregamentos aplicados nos furos de 5 mm de diâmetro não produziram efeitos que afloraram na superfície do compósito. Já os furos de 10 mm de diâmetro afloraram apenas com revestimentos de espessura menor ou igual a 12 mm (⁹²), conforme Tabela 10.

Os revestimentos de diferentes fabricantes apresentaram desempenhos significativamente diferentes. Isso significa que é necessário se fazer uma bateria de testes para cada produto existente no mercado, a fim de levantar os comportamentos de cada um deles em testes semelhantes aos realizados neste trabalho.

Adicionalmente, existe uma componente subjetiva, devido ao usuário, na delimitação das bordas da região onde foi medida a largura da anomalia. Essa componente depende fortemente da qualidade e contraste da imagem gerada e, para as várias imagens geradas neste trabalho, pode ser estimada entre 1 e 3 pixels.

8.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

8.3.1 Tabela para carregamento por aquecimento

Seria desejável a compilação de uma tabela prática e orientativa, a exemplo da Tabela 10, porém com as respostas ao carregamento por aquecimento. É importante que o maior número de variáveis seja considerado. Como exemplo podemos citar o maior número de ensaios em corpos de prova com as mesmas características⁹³, mais corpos de prova com diferentes tamanhos e formas de furos⁹⁴, outras espessuras de revestimentos⁹⁵ e materiais de diferentes fornecedores⁹⁶. O ensaio de tais corpos de prova é importante para que seja avaliada as capacidades

⁹² Utilizando os equipamentos (especialmente o Laser de alta intensidade) e sob as condições de ensaios utilizadas nesse trabalho, ou seja, DL até 16 mm e ΔP até 20 bar.

⁹³ Para avaliação de reprodutibilidade das medições entre diferentes corpos de prova com as mesmas características construtivas.

⁹⁴ Para levantamento de mais dados relacionados ao comportamento do afloramento na superfície do efeito da deformação causado pelos defeitos.

⁹⁵ Principalmente as mais utilizadas em campo. Tais dados também seriam interessantes para criação de um modelo que envolva a espessura do revestimento como uma variável quantitativa.

⁹⁶ Dado que as instalações industriais contêm revestimentos de mais de um fornecedor.

dos equipamentos desenvolvidos e para a compilação de uma maior quantidade de tabelas de dados.

8.3.2 Projeto e construção de novos corpos de prova

Como mencionado no capítulo 5, foram construídos mais dois conjuntos de flautas. Espera-se, em um futuro breve, que ambos os conjuntos sejam revestidos por luvas compósitas de outros fabricantes, a fim de se realizarem ensaios e análise de dados semelhantes. Com isso serão gerados dados comparativos e, principalmente, os coeficientes dos polinômios que caracterizam cada um dos demais revestimentos. Através dessa abordagem, um modelo de inspeção pode ser criado.

O corpo de prova tipo flauta deve ser modificado para incluir um furo roscado na lateral do tubo, próximo à sua borda. O objetivo é utilizar esse furo para o preenchimento com água, evitando assim a necessidade de suspender o corpo de prova para fins de purgar o ar ainda presente.

Segundo informações levantadas, a corrosão em ambiente *offshore* se dá muito mais intensamente na parte externa de tubulações do que na parte interna. Partindo dessa informação, seria interessante caracterizar a geometria externa de um processo de corrosão comum em campo, de forma que se gerem corpos de prova não apenas com furos cilíndricos passantes, mas também com furos cegos. Através dessa recomendação, ensaios mais próximos da realidade poderiam ser realizados.

Outra componente que pode ser melhorada é o tamanho dos corpos de prova tipo flauta. Em lugar de usar CPS longos, os mesmo poderiam ser curtos. No APÊNDICE 4 é feito um comparativo entre suas características de cada caso.

8.3.3 Ensaios de revestimentos de outros fornecedores

Assim como nesse trabalho, é recomendado que se utilize como base a norma ISO/PDTS 24817:2011, além do contato com os fornecedores de materiais compósitos, que trabalham com espessuras de revestimentos escalonadas.

8.3.4 Avaliar a evolução da corrosão

Deverão ser realizadas medições em corpos de prova com corrosão controlada e progressiva em datas diferentes⁹⁷ (com níveis diferentes de corrosão) para avaliar a capacidade do sistema quantificar a evolução dos tamanhos dos defeitos.

Para tornar a capacidade de determinar o tamanho do furo mais confiável, um estudo relacionado ao desempenho dos revestimentos compósitos ao longo do tempo é necessário, ou seja, um levantamento das características mecânicas após um dado envelhecimento devido à idade, ciclos de carregamento e exposição à radiação ultravioleta⁹⁸.

8.3.5 Aquisição e análise de dados

É necessário o desenvolvimento de um modelo teórico, analítico ou numérico, que estabeleça a relação entre a largura do efeito do defeito aflorado na superfície e a geometria do furo.

Um aspecto de grande interesse à indústria de óleo e gás seria o desenvolvimento de um modelo multivariável, ou seja, que leve em consideração os diferentes tamanhos de defeito, tipo e tamanho de revestimentos, variação de pressão, deslocamento lateral e as demais variáveis que os sistemas futuros possam abranger.

Para fins de análise geométrica dos dados adquiridos, seria interessante agregar uma nova funcionalidade ao software existente. Trata-se de uma função de correção geométrica da imagem. Uma alternativa simples seria, após posicionar todo o sistema de shearografia, fotografar um padrão 2D⁹⁹ e processar essa imagem a fim de gerar uma matriz de correção das aberrações causadas pelo sistema óptico utilizado no momento. Adicionalmente, no caso de geometrias mais simples, como a cilíndrica de um tubo ou um costado também poderia ser levado em conta, para fins de análise geométrica da anomalia aflorada na superfície.

Posteriormente, todas as imagens de shearografia (para os ensaios com a mesma posição de câmera) seriam processadas com essa matriz de correção e, aliada a isso, seria feita a conversão pixel X mm. Com isso seriam reduzidas as incertezas com que as dimensões seriam determinadas a partir das imagens.

⁹⁷ Com espaçamento, por exemplo, de 6 meses e/ou 1 ano.

⁹⁸ Devido à incidência de luz solar direta.

⁹⁹ Por exemplo, no formato de um tabuleiro de xadrez.

Adotou-se a resolução padrão (800x600) do conjunto software/câmera para se adquirir as imagens. O tempo de processamento foi baixo e a coleção de arquivos, não muito grande em termos de tamanho de arquivos. Entretanto, recomenda-se aumentar esse valor até o limite máximo do equipamento utilizado, pois as imagens processadas a posteriori conterão muito mais informação útil a uma avaliação quantitativa.

Além disso, é recomendado que se utilize a câmera mais próxima ao corpo de prova, para uma melhoria da relação pixel/mm. Adicionalmente, é necessário o desenvolvimento de uma metodologia para medição da largura do defeito que não seja subjetiva.

8.3.6 Fase pós projeto

Um procedimento de armazenamento dos corpos de prova e de backup dos seus dados experimentais e relatórios parciais se faz necessário, tendo em vista o seu valor como elemento único dentro a coleção (de corpos de prova) presente no LABMETRO. Esta coleção é de fundamental importância para as pesquisas futuras, testes e validação de novos equipamentos e novas técnicas, bem como a geração de dados relativos à medições alheias a esta dissertação.

REFERÊNCIAS

1. WILLEMANN, D. P.; ALBERTAZZI JR., A. G.; MENICONI, L. C. **Detecção de Falhas de Adesão entre Mantas Poliméricas e Dutos usando Interferometria de Deslocamento Lateral**. XXIV CONAEND. São Paulo-SP: [s.n.]. 2006.
2. JORDÃO, M.; SOUZA, E. D. C. **Curso Inspeção de tubulações e dutos industriais**. Rio de Janeiro: Instituto de Pós-Graduação do Petróleo, 2012. 314 p.
3. WILLEMANN, D. P.; ALBERTAZZI, A. G.; MENICONI, L. C. Um sistema prático para identificação e localização de defeitos em revestimentos de materiais compósitos utilizando shearografia, IN: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 9, 2007, Salvador. Anais. Salvador, 2007.
4. STEINCHEN, W.; YANG, L. **Digital Shearography: theory and application of digital speckle pattern shearing interferometry**. Washington: SPIE Press, 2003.
5. SCHÖNTAG, J. M. **Caracterização da profundidade de defeitos em materiais compósitos utilizando shearografia com carregamento vibracional**. 2009. 107 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 2009.
6. REITZ, J. R.; MILFORD, F. J.; CHRISTY, R. W. **Fundamentos da teoria eletromagnética**. 1ª. ed. São Paulo-SP: Campus, 1982.
7. NETO, C. J. **Termografia aplicada a detecção e dimensionamento de descontinuidades em tubulações de material compósito**. 2009. 103 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Inspeção de Equipamentos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS. 2009.
8. SOUZA, J. P. **Inspeção de defeitos em revestimentos de materiais compósitos aplicados em tanques metálicos utilizando shearografia**. 2012. 121 f. Dissertação

- (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 2012.
9. REINHART, T. J.; CLEMENTS, L. L. **Engineered Materials Handbook**. Ohio: ASM International, v. 1, Composites, 1987. 27-34 p.
 10. KAPADIA, A. **Best Practice Guide. Non Destructive Testing of Composite Materials**. National Composites Network e TWI Ltd. Disponível em: <http://www.compositesuk.co.uk/LinkClick.aspx?fileticket=14Rxzdzdjkjw=&>. Acesso em: 01 de setembro de 2013.
 11. GAY, D.; HOA, V. S.; TSAI, W. S. **Composite materials, Design and Applications**. London: CRC PRESS, 2003.
 12. PERRUT, V. A. **Análise de reparo de tubos com defeito transpassante por meio de materiais compósitos**. 2009. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ. 2009.
 13. GIBSON, A. G. **The cost effective use of fibre reinforced composites offshore**. Relatório técnico. University of Newcastle, UK. Newcastle upon Tyne. 2003.
 14. MARINHO, C. A. et al. Inspeção de Tubos de Resina Reforçada por Fibras de Vidro. **Revista Abendi**, São Paulo-SP, p. Sec1:46-50, Dezembro 2010. ISSN 1980-1599.
 15. REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. **Compósitos estruturais, tecnologia e prática**. São Paulo-SP: Artiber, 2011.
 16. LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: Ciência e tecnologia**. São Paulo-SP: Edgar Blücher, 2006.
 17. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 2581-07**. Standart Practice for Shearography of Polymer Matrix Composites, Sandwich Core Materials and Filament-Wound Pressure Vessels in Aerospace Applications. [S.l.]. 2008.
 18. LINS, K. P. **Procedimento para avaliação de profundidade de defeitos em placas de materiais compósitos usando shearografia com excitação térmica**.

2012. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 2012.
19. MARQUES, P. V. Apostila do curso de ensaio não destrutivos. Departamento de Engenharia Mecânica-UFMG. **Universidade Federal de Minas Gerais**, 2013. Disponível em: <<http://demec.ufmg.br/disciplinas/ema867end%20-%20pos/InspVis.pdf>>. Acesso em: 16 Setembro 2013.
 20. ASTM D 2563-70, Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts. [S.l.]. Revalidade em 1987.
 21. MARINHO, C. A. et al. **Inspeção de Tubos de Resina Reforçada por Fibras de Vidro com Termografia**. 9^a COTEQ - Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos. Salvador-BA: Anais do COTEQ. 2007.
 22. FERREIRA, E. D. S. **Inspeção de revestimentos de proteção anticorrosiva através do método "Holiday detector"**. VIII Seminário nacional de ensaios não destrutivos. São Paulo-SP. 1988.
 23. SPY. **Pipeline Inspection Company Ltd.**, 2013. Disponível em: <<http://picltd.com/PRODUCTS/HOLIDAYS/>>. Acesso em: 16 Setembro 2013.
 24. ANDREUCCI, R. **Radiologia industrial**. São Paulo-SP: Abende, Julho/2003.
 25. NARDELLI, V. C. **Medição geométrica utilizando tomografia computadorizada por raios-x: melhoria do desempenho metrológico através da seleção sistemática dos parâmetros de configuração**. 2012. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 2012.
 26. KAK, A. C.; SLANEY, M. **Principles of computerized tomographic imaging**. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE): IEEE Press, 1988.
 27. PEDRINI, G. Holography. In: YOSHIKAWA, T. **Handbook of OPTICAL METROLOGY - Principles**

- and Applications.** Boca Ration, FL: CRC Press, 2008. Cap. 7, p. 234-235.
28. WILLEMANN, D. P. **Desenvolvimento de uma Roseta Óptica para medição de tensões e deformações utilizando Holografia Eletrônica.** 2002. 117 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 2002.
 29. FANTIN, A. V. et al. **A computational tool to highlight anomalies on shearographic images.** Proc. SPIE 8788, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII, 87880L (May 13, 2013); doi:10.1117/12.2020978. Muchich, Germany: SPIE. 2013.
 30. MALLICK, P. K. **Composites Engineering Handbook.** 1st. ed. Ann Arbor: University of Michigan. ISBN 0-8247-9304-8, 1997.
 31. BEPLER, R. V. **Detecção por métodos ópticos de falhas de adesão de revestimentos de materiais compostos usados na indústria do petróleo.** 2006. 64 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 2006.
 32. MENNER, P.; BUSSE, G. Shearographic detection of thermal waves for non-destructive testing, Institute of Polymer Technology - Non-Destructive Testing. In: International Society for Optical Engineering, Florianópolis, 2010. Proceedings, Florianópolis, 2010.
 33. PAES, Á. D. S. et al. Inspeção de defeitos em materiais compósitos utilizando shearografia e excitação por vibração, In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO, 30, 2012. São Paulo. Anais. São Paulo, 2012.
 34. WILLEMANN, D. P. **Detecção de defeitos em juntas adesivas de tubos compósitos com shearografia, termografia e ultra-som.** In: Congresso nacional de ensaios não destrutivos, 26, 2008, São Paulo. Anais. São Paulo, 2008.
 35. ZILIO, S. C. **ÓPTICA MODERNA.** São Carlos-SP:

- Instituto de Física de São Carlos-USP, 2007.
36. PAES, D. S.; SILVA, F. A. A. **Inspecção de defeitos em materiais compósitos com shearografia e excitação por vibração**. Universidade Federal de Santa Catarina, Relatório do trabalho final da disciplina Metrologia Óptica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis-SC, p. 18. 2010.
 37. HECHT, E. **Óptica**. 2ª. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
 38. ACOEM GRUPO. Acoem Grupo. **Acoem**, 2013. Disponível em: <<http://www.acoemgroup.com.br/Analise-Mecanica-Dinamica-DMA-4-19-70-aplicacoes>>. Acesso em: 13 Setembro 2013.
 39. BUTTERS, J. N.; LEENDERTZ, J. A. A double exposure technique for speckle pattern interferometry. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, 4 (4):277 (1971).
 40. MALACARA, D. **Optical Shop Testing**. 3rd. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. ISBN 978-0-0471-48404-2, 2007.
 41. PETROBRAS N-13. **Requisitos técnicos para serviços de pintura**. CONTEC Comissão de Normas Técnicas. SC-14 Pintura e Revestimentos Anticorrosivos. . Rev J. 08/2011.
 42. PETROBRAS N-2137. **Determinação de Descontinuidades em Película Seca de Tinta**. CONTEC Comissão de Normas Técnicas. SC 14 Pintura e Revestimentos Anticorrosivos. . Rev. C. 07/207.
 43. PETROBRAS N-2631. **Pintura interna de tubulações**. CONTEC Comissão de Normas Técnicas. SC-14 Pintura e Revestimentos Anticorrosivos. . 12/1999.
 44. PETROBRAS N-2843. **Revestimentos Interno de tubos**. SC-14 Pintura e Revestimentos Anticorrosivos. . Rev. A. 08/2011.
 45. PETROBRAS N-2912. **Tinta Epóxi "Novolac"**. CONTEC Comissão de Normas Técnicas. SC-14 Pintura e Revestimento Anticorrosivo. . 08/2011.
 46. PETROBRAS N-2841. **Qualificação de revestimentos anticorrosivos, à base de tintas em pó, sobre superfícies galvanizadas**. CONTEC Comissão de Normas Técnicas.

- SC-14 Pintura e Revestimentos Anticorrosivos. [S.l.]. 03/2011.
47. WOLFRAM RESEARCH COMPANY. **Wolfram Alpha**, 2013. Disponível em: <<http://www.wolframalpha.com/>>. Acesso em: 23 Setembro 2013.
 48. ASTM D 2563-70. . Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts. , p. . Revalidate em 1987.

APÊNDICE 1: VETOR DE POYNTING E IRRADIÂNCIA

A potência por unidade de área que se propaga em uma determinada direção \vec{k} é dada pelo vetor de Poynting, que é definido como :

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (45)$$

Onde \vec{E} é o vetor campo elétrico e \vec{H} é o campo magnético.

Usando relação entre \vec{H} e \vec{E} [35] [6], temos:

$$\begin{aligned} \vec{S} &= \vec{E} \times \frac{(\vec{k} \times \vec{E})}{\mu\omega} = \frac{1}{\mu\omega} [-\vec{E}(\vec{k} \cdot \vec{E}) + \vec{k}(\vec{E} \cdot \vec{E})] = \frac{E^2}{\mu\omega} \vec{k} \\ &= \frac{E_0^2}{\mu\omega} [\cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)]^2 \vec{k} \end{aligned} \quad (46)$$

Onde \vec{k} é o vetor de onda,

μ é a permeabilidade magnética do meio,

ω é a velocidade angular da onda eletromagnética em questão

e \vec{r} é o vetor que define a direção e sentido de propagação da luz.

Os detectores existentes não possuem velocidade suficiente para acompanhar a variação rápida do campo elétrico e, sendo assim, fazem uma média temporal do sinal. Portanto, devemos calcular a média temporal do vetor de Poynting, isto é:

$$\begin{aligned} \langle \vec{S} \rangle &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \vec{S}(\vec{r}, t) dt \\ &= \frac{E_0^2}{\mu\omega T} \int_{t_0}^{t_0+T} [\cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)]^2 dt \vec{k} \end{aligned} \quad (47)$$

Utilizando a identidade do arco duplo do cosseno e integrando no período, dado por $T = 2\pi/\omega$, temos que:

$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{E_0^2}{2\mu\omega} \vec{k} = \frac{1}{2} \text{Re}\{\vec{E} \times \vec{H}\} \quad (48)$$

Com isso, define-se a densidade de fluxo radiante ou irradiância como:

$$I = |\langle \vec{S} \rangle| = \frac{E_0^2}{2\mu\omega} k = \frac{E_0^2}{2\mu v} = \frac{1}{2} cn \epsilon_0 E_0^2 \quad (49)$$

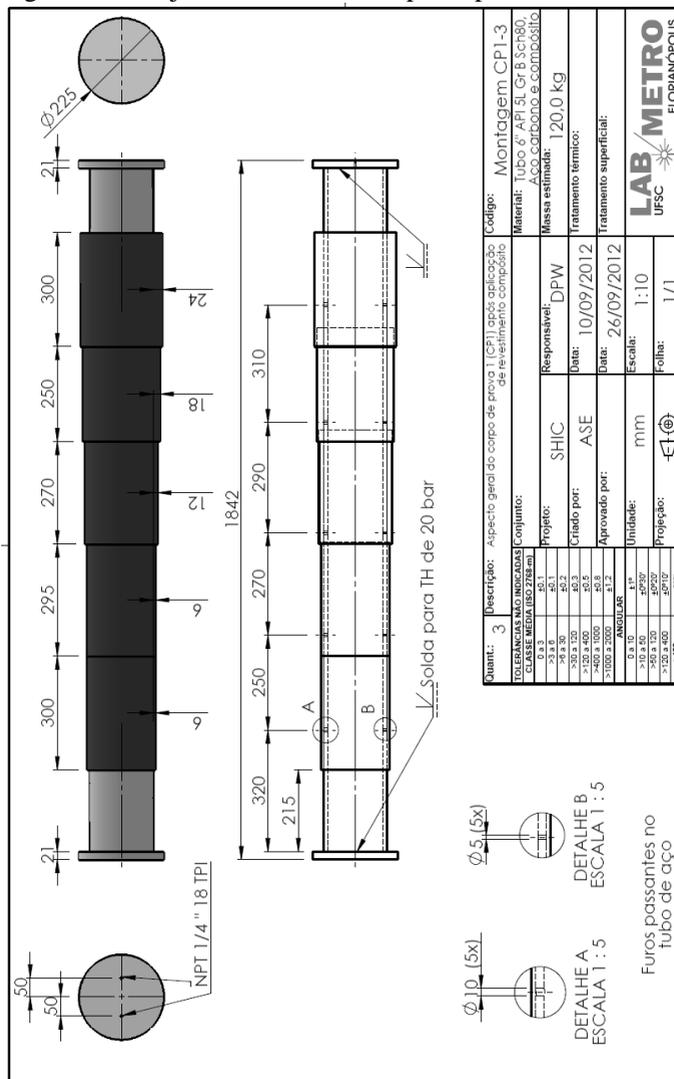
Onde “c” é a velocidade da luz e n é o índice de refração do meio.

A irradiância possui unidades de W/m^2 e que é bastante útil na prática, pois permite relacionar a intensidade de luz com o campo elétrico.

APÊNDICE 2 : CORPOS DE PROVA CP1, CP2 E CP4

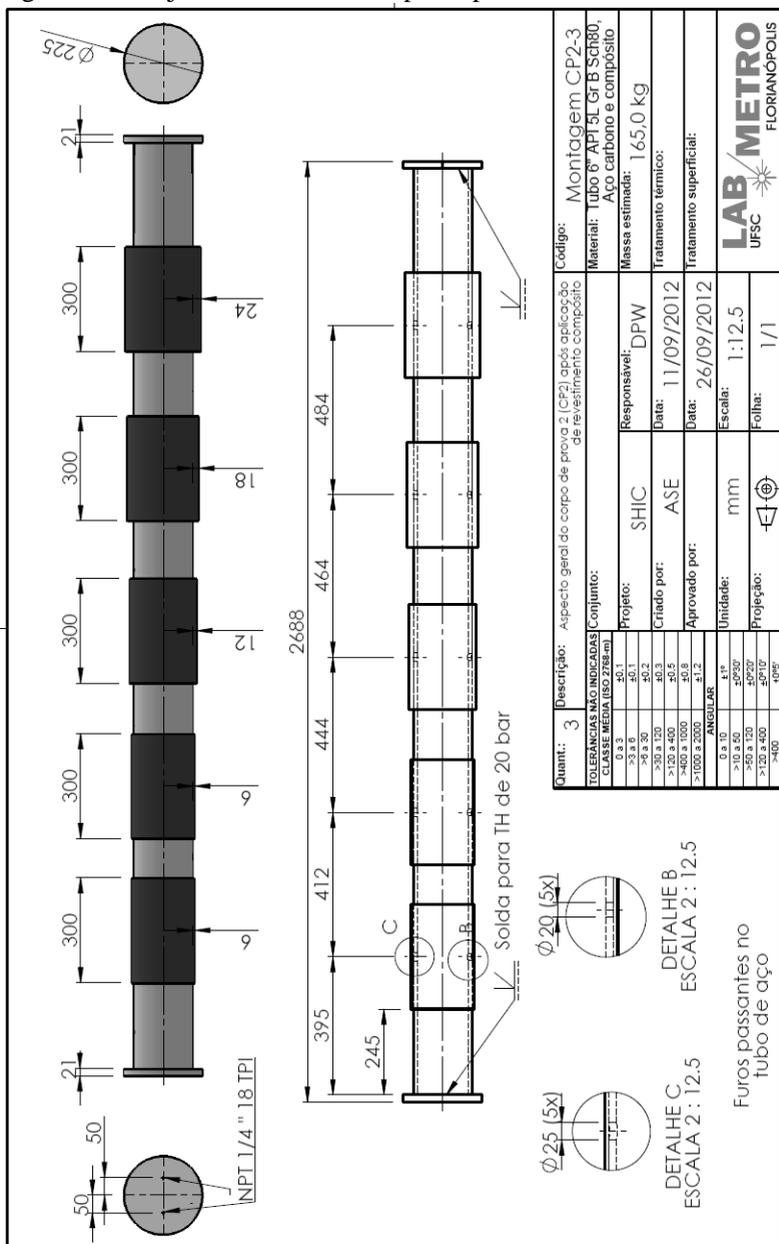
São apresentados os projetos das Flautas 1, 2 e 4, bem como as luvas de material compósito que as envolvem.

Figura 69 - Projeto mecânico do corpo de prova "Flauta 1".



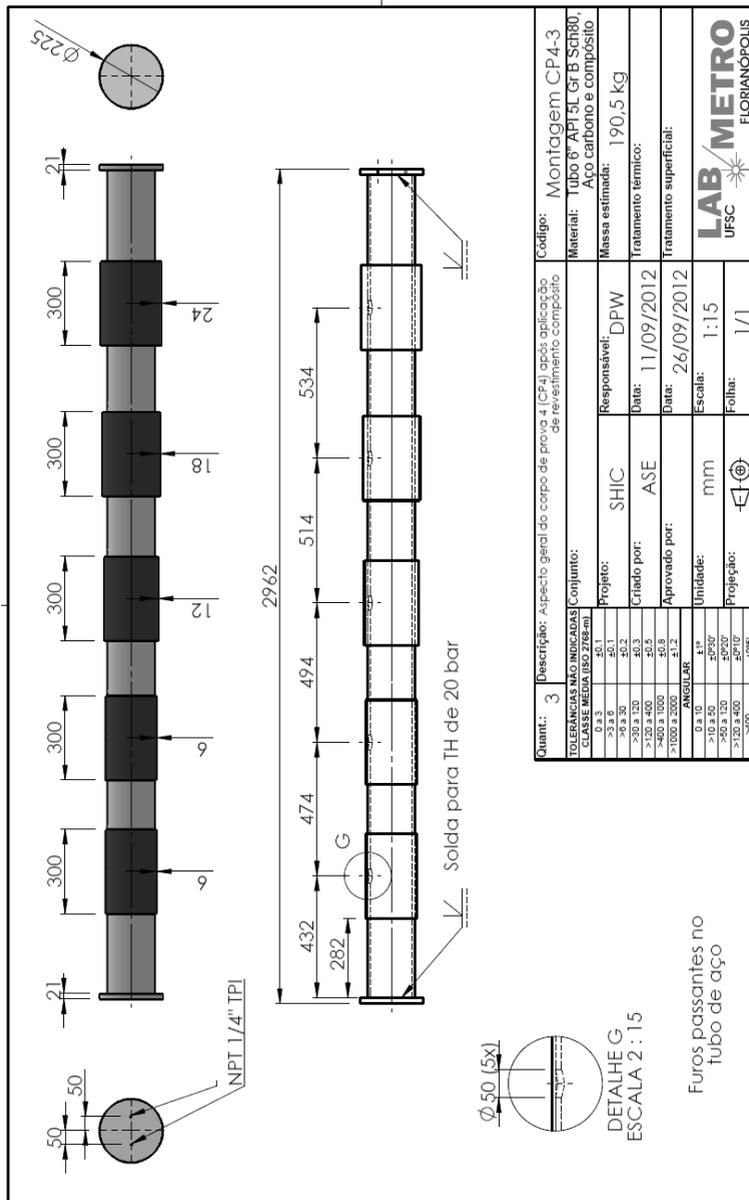
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 70 - Projeto mecânico do corpo de prova "Flauta 2".



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 71 - Projeto mecânico do corpo de prova "Flauta 4".



APÊNDICE 3: PROCESSO DE PRESSURIZAÇÃO

Para fins de documentação do projeto, são descritos os passos para pressurização dos corpos de prova tipo “Flauta”:

- 1) O corpo de prova é suspenso pela girafa;
- 2) Utiliza-se um balde de 20 litros, suspenso acima do nível do tubo;
- 3) Com uma mangueira (de ar comprimido), injeta-se a água do balde no tubo através do furo no flange, Figura 72;
- 4) Ao final do processo, quando a água atinge o nível do furo superior, retira-se o balde e a mangueira;
- 5) O plugue roscado é devidamente conectado no furo inferior. A conexão em formato de “T” é conectada no furo superior. Em uma das extremidades (desse conector) é conectado o manômetro e, na outra, o conector da bomba hidráulica manual;
- 6) Abomba hidráulica é posicionada em um nível acima do conector em “T”. Óleo é colocado na bomba e injetado no tubo, com objetivo de preencher o espaço ocupado pelo ar, Figura 73.
- 7) Após expurgar todo o ar possível para a inclinação máxima do tubo, o mesmo é colocado novamente na horizontal;
- 8) Posiciona-se e fixa-se (com o uso de cintas e calços) o tubo sobre o palete, de forma que o tubo ocupe sua posição final, para inspeção.

Figura 72 - Processo de injeção de água na Flauta 1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 73 - Processo de expurgo do ar, completamento com óleo e pressurização.



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE 4: CONSIDERAÇÕES SOBRE A TAMANHO DE NOVOS CORPOS DE PROVA

A seguir são apresentadas as considerações relevantes às geometrias dos corpos de prova futuros.

Caso 1: Corpos de prova tubulares longos e com vários furos reparados.

Vantagens:

- 1) Conjunto de poucos corpos de prova é suficiente para abordagem das situações de interesse;
- 2) Facilidade no transporte entre universidade e empresas de fabricação dos tubos e as de revestimento compósito;
- 3) Facilidade no alinhamento entre câmara e defeitos, uma vez que o corpo de prova é posicionado sob um palete, a certa distância da borda do mesmo, o tripé que suporta o cabeçote de shearografia é mais facilmente instalado a mesma distância das superfícies a serem medidas, Figura 74. Outra vantagem é que o ângulo entre a posição do furo e a horizontal é sempre o mesmo, gerando imagens e resultados mais fáceis de serem comparados.

Desvantagens:

- 1) A movimentação dos corpos de prova torna-se difícil, pois os mesmos são grandes e de massas elevadas. Depois de instalados e preenchidos com água, evita-se ao máximo a sua movimentação.

Caso 2: Corpos de prova tubulares curtos, com dois furos (em faces opostas) e apenas um reparo.

Vantagens:

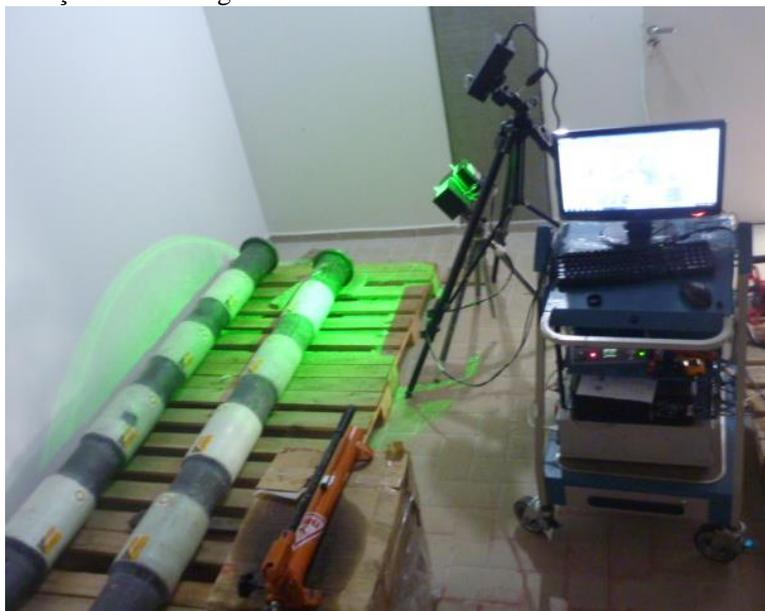
- 1) Facilidade na movimentação. Não é necessário o uso de empilhadeira ou girafa para movimentar, suspender, preencher com água e afins.
- 2) O processo de preenchimento do tubo com água e sua pressurização seria mais rápido e prático.

Desvantagens:

- 1) O custo para fabricação de tais corpos de prova é muito maior, uma vez que envolve o corte, solda e acabamento de muitos tubos e flanges.

Para qualquer que seja a opção de construção de novos corpos de prova, é crucial que os projetos sejam baseados nas normas técnicas adequadas, Tabela 14, que podem ser obtidas no “Canal do Fornecedor”, no site da Petrobras¹⁰⁰.

Figura 74 - Corpo de prova posicionado paralelamente à borda do palete, permitindo melhor controle da distância da superfície medida e o cabeçote de shearografia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 14 - Normas técnicas vigentes utilizadas para o projeto, montagem e fabricação de vasos de pressão.

Número	Título	Tipo	SC	Edição
N-1500 E	VASOS DE PRESSÃO - FOLHA DE DADOS (Classificação: PÚBLICO)	PD	02	Out/2010
N-2688 A	1ª Emenda - TESTE DE PRESSÃO EM SERVIÇO DE VASOS DE PRESSÃO E CALDEIRAS (Classificação: NP-1)	PR	23	Jun/2009
N-0133 K	SOLDAGEM (Classificação: PÚBLICO)	PR	26	Ago/2012
N-0253 K	PROJETO DE VASO DE PRESSÃO (Classificação: PÚBLICO)	PR	02	Dez/2010
N-0268 G	FABRICAÇÃO DE VASO DE PRESSÃO (Classificação: PÚBLICO)	PR	02	Mar/2012
N-0269 F	MONTAGEM DE VASO DE PRESSÃO (Classificação: PÚBLICO)	PR	02	Mai/2012
N-0381 L	EXECUÇÃO DE DESENHOS E OUTROS DOCUMENTOS TÉCNICOS EM GERAL (Classificação: PÚBLICO)	PR	12	Abr/2012
<i>ASME BPVC Section. II – Part: D – Boiler Vessel Code – Section II – Materials – Part D – Properties (Customary).</i>				
<i>ANSI AISC 360-5 – Specification for Structural Steel Buildings.</i>				
NP-1 Nível de Proteção 1, (PR) Procedimento/ (E) Especificação/ (M) Método/ (PD) Padronização/ (T) Terminologia/ (S) Simbologia/ (C) Classificação.				

Fonte: Elaborada pelo autor.