

Detecção por Métodos Ópticos de Falhas de Adesão de Revestimentos de Materiais Compostos Usados na Indústria do Petróleo

por

Eng. Raphael Veloso Beppler

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC
Departamento de Engenharia Mecânica - EMC
Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial - PósMCI
Departamento de Engenharia Mecânica - EMC
Laboratório de Metrologia e Automatização - Labmetro

Trabalho apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Metrologia Científica e Industrial na Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

Florianópolis, 12 de junho de 2006

Detecção por Métodos Ópticos de Falhas de Adesão de Revestimentos de Materiais Compostos Usados na Indústria do Petróleo

Eng. Raphael Veloso Beppler

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRE EM METROLOGIA CIENTÍFICA E INDUSTRIAL

e aprovada em sua forma final pelo

Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

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

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Banca Examinadora:

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.
Labmetro – UFSC

Ricardo Sutério, Dr. Eng.
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

André Roberto de Sousa, Dr. Eng.
Examinador Externo
Centro Federal de Educação Tecnológica
CEFET/SC

Resumo

Devido à natureza dos ambientes encontrados na indústria do petróleo, os dutos de transporte estão sujeitos à corrosão e perda de integridade. Para evitar o problema, estes podem ser revestidos com materiais compostos que fornecem resistência à corrosão e, opcionalmente, reforço estrutural.

Apesar da proteção contra corrosão dada pelos revestimentos, após a sua aplicação não é mais possível a inspeção visual da superfície metálica do duto. É por isso que é muito importante garantir uma perfeita adesão entre o revestimento e a superfície do duto para garantir a qualidade do revestimento.

Este trabalho trata da utilização da técnica óptica de *shearography* para a detecção e localização destas falhas de adesão. Esta técnica é do tipo não-destrutiva e consiste na análise das imagens resultantes da interferência entre regiões vizinhas da superfície inspecionada iluminada por laser, medindo o campo de deformações do objeto. Essa é a sua principal vantagem em relação a outras técnicas ópticas que medem apenas o campo de deslocamentos. Sendo assim, a *shearography* é mais sensível a variações no campo de deformações (e conseqüentemente à detecção de falhas) e menos sensível a deslocamentos de corpo rígido. Essa vantagem a torna mais adequada à utilização em campo sem a necessidade de equipamentos para isolamento de calor e vibrações.

Para a medição do campo de deformações, são obtidas imagens do objeto em dois estados diferentes de carregamento, que por sua vez aqui é aplicado utilizando três métodos: carga mecânica, vácuo e aquecimento localizado.

O objetivo final do trabalho é desenvolver um protótipo capaz de detectar um conjunto de falhas artificiais especialmente construídas para este trabalho e validar a aplicabilidade da técnica na detecção destas falhas de adesão.

Abstract

Due to the nature of the environments found in the oil industry, oil and gas pipes are subject to corrosion and integrity loss. To avoid this problem these pipes can be coated with composite materials, providing them corrosion protection and, optionally, structural reinforcements.

Despite the corrosion protection that should be given by the composite coatings, after they are applied it is not possible to visual inspect their metallic surface anymore. It is why it is very important to guarantee perfect adhesion between coating and pipe to guarantee the quality of the coating.

This work is about the use of the optical technique called *shearography* to detect and locate these adhesion defects. It is a non-destructive form of inspection and consists in comparing two images resulting from the interference between neighbor areas from the surface illuminated by a laser, measuring the stress field of the object. This is its main advantage in comparison to other optical techniques who measure only the displacement field. In this way, the *shearography* is more sensitive to the stress field variations (and consequently to the defects detection) and less sensitive to rigid body motions. This advantage turns it more adequate to be used in the field without equipment to isolate vibrations and heat.

To measure the stress field, two pictures of the object are taken in two distinct loading states. The loading is here applied to the pipe using three methods: mechanical stress, surface vacuum and heating.

The main purpose of this work is to develop a prototype which is capable of detecting a series of adhesion defects specifically built and validate the applicability of *shearography* in detecting this special kind of adhesion defects.

Agradecimentos

À minha família, que sempre me incentivou a estudar e a buscar meus objetivos, dando apoio em todas as situações.

À Camila, minha namorada, que sempre me apoiou e soube dividir meu tempo com as atividades do mestrado.

Ao meu orientador, prof. Armando, que além de estar sempre presente foi muito incentivador e parceiro neste trabalho.

Aos colegas do Labmetro: Élcio, Rafael e Priscila que muito colaboraram com este trabalho. Muitos dos resultados não poderiam ter sido obtidos sem a sua ajuda.

Aos colegas da Turma 2003 que sempre foram uma excelente equipe de trabalho.

À fundação CERTI e ao Labmetro pela oportunidade oferecida e todo o apoio dado ao longo do mestrado.

Ao CENPES, por confiar este trabalho ao Labmetro, e em especial ao Eng. Meniconi, que viabilizou vários recursos para a realização do trabalho.

À ANP, pelo seu apoio na forma do programa PRH-34, que além do custeio da bolsa de mestrado está contribuindo significativamente para a pesquisa e o desenvolvimento na área de petróleo no Brasil.

Sumário

Resumo	ii
Abstract	iii
Sumário	v
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
Lista de Símbolos	xi
Capítulo 1	
Introdução	1
1.1 A Indústria de Gás e Petróleo no Brasil	1
1.2 A malha de dutos no Brasil	2
1.3 Corrosão em dutos de transporte de petróleo.....	3
1.4 O escopo do trabalho	4
1.5 Estrutura do documento	5
Capítulo 2	
Uso de Mantas Poliméricas em Dutos	6
2.1 Mantas para Proteção Contra Corrosão	7
2.1.1 Proteção Catódica.....	7
2.1.2 Inibidores de Corrosão.....	8
2.1.3 Revestimentos Metálicos	8
2.1.4 Revestimentos Orgânicos	8
2.2 Mantas para Reforço Estrutural	10
2.3 Mantas encontradas no mercado.....	10

Capítulo 3	
Técnicas para Detecção de Falhas de Adesão	12
3.1 Ultra-som	12
3.1.1 Fundamentos da técnica de ultra-som	12
3.1.2 Aplicação da técnica de ultra-som à detecção de falhas de adesão .	14
3.2 Holografia Eletrônica.....	15
3.2.1 <i>Speckle</i>	15
3.2.2 Interferência.....	16
3.3 <i>Shearography</i>	20
3.3.1 Fundamentos da técnica de <i>shearography</i>	20
3.3.2 Relação entre as deformações do objeto e as mudanças de fase na imagem obtida.....	22
3.3.3 Deslocamento de Fase	25
Capítulo 4	
Protótipo Preliminar para Detecção de Falhas de Adesão	28
4.1 Requisitos do Sistema	28
4.2 Concepção do Sistema	28
4.2.1 Corpos de Prova	28
4.2.2 Aplicação de Carga	30
4.2.3 Iluminação	30
4.2.4 Geração do <i>shearing</i>	31
4.2.5 Deslocamento de Fase	33
4.2.6 Aquisição de Imagens	33
4.3 Procedimento de medição utilizado.....	33
4.4 Resultados obtidos.....	34
4.4.1 Duto com revestimento polimérico (Duto A).....	34
4.4.2 Duto com revestimento à base de fibra de vidro (Duto B).....	37
4.5 Conclusões do protótipo preliminar	39
Capítulo 5	
Protótipo Final para Detecção de Falhas de Adesão	40
5.1 Objetivos	40
5.2 Requisitos.....	40
5.3 Concepção do Sistema	41
5.3.1 Corpos de Prova	41
5.3.2 Aplicação de Carga	42
5.3.3 Iluminação	44
5.3.4 Cabeçote de medição	45

5.3.5	Deslocamento de Fase	46
5.3.6	Aquisição e Tratamento das Imagens	47
5.4	Procedimento de medição utilizado.....	48
5.4.1	Preparativos iniciais	48
5.4.2	Inspeção utilizando carregamento mecânico.....	48
5.4.3	Inspeção utilizando carregamento térmico	48
5.4.4	Inspeção utilizando carregamento a vácuo	49
5.4.5	Procedimentos finais.....	49
5.5	Resultados obtidos.....	49
5.5.1	Duto C (revestimento anticorrosão)	49
5.5.2	Duto D (revestimento estrutural).....	51
5.6	Conclusões do protótipo final	56
5.6.1	Formas de carregamento	56
5.6.2	Corpo de prova C.....	56
5.6.3	Corpo de prova D.....	56
5.6.4	Desempenho do sistema desenvolvido.....	57
Capítulo 6		
Conclusões		58
6.1	Desempenho operacional	58
6.1.1	Protótipo preliminar.....	58
6.1.2	Protótipo final.....	59
6.2	Perspectivas futuras	60
Referências Bibliográficas		62

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Detecção de defeitos utilizando ultra-som pulsado. [5]	13
Figura 3.2 – Reflexão de uma luz coerente sobre uma superfície rugosa. [3]....	15
Figura 3.3 – Granulado óptico (<i>speckle</i>) resultante da iluminação com luz coerente de um objeto rugoso.	16
Figura 3.4 – Franjas de interferência. [8].....	17
Figura 3.5 – Esquema básico de holografia eletrônica com iluminação simples.	18
Figura 3.6 – Mapa de franjas obtido com holografia eletrônica.....	19
Figura 3.7 – Funcionamento da <i>shearography</i> . [1].....	20
Figura 3.8 – Variação do caminho óptico pela deformação do objeto. [1]	22
Figura 3.9 – Vetor Sensibilidade. [1].....	24
Figura 3.10 – Interferômetro de <i>Michelson</i> modificado para geração do <i>shearing</i> e deslocamento de fase.	27
Figura 4.1 – Duto A	29
Figura 4.2 – Bomba hidráulica manual para aplicação de pressão.....	30
Figura 4.3 – Sistema de iluminação utilizando fibra óptica.	31
Figura 4.4 – Cabeçote de medição contendo o interferômetro de <i>Michelson</i> para geração do <i>shearing</i>	32
Figura 4.5 – Fixação do cabeçote de medição ao duto.....	32
Figura 4.6 – Limite superior da falha de adesão no duto A.....	35
Figura 4.7 – Extremidade direita da falha de adesão do duto A.....	35
Figura 4.8 – Extremidade esquerda da falha de adesão no duto A.	36
Figura 4.9 – Delimitação da falha de adesão no duto A.....	36
Figura 4.10 – Limite inferior da falha de adesão no duto B.	37

Figura 4.11 – Extremidade direita da falha de adesão do duto B.....	37
Figura 4.12 – Extremidade esquerda da falha de adesão no duto B.	38
Figura 4.13 – Delimitação da falha de adesão no duto B.....	38
Figura 5.1 – Corpos de prova para o protótipo final. (a) Duto C (à esquerda). (b) Duto D (à direita).	42
Figura 5.2 – Configuração montada para aplicação de carga por força interna. (a) Perspectiva isométrica mostrando a localização do cabeçote de iluminação e medição. (b) Vista superior mostrando o posicionamento do macaco hidráulico interno ao duto.	43
Figura 5.3 – Câmara de vácuo montada sobre o duto C.....	44
Figura 5.4 – Cabeçote de medição.....	46
Figura 5.5 – Atuador piezelétrico.....	47
Figura 5.6 – Falha de adesão 1 no duto C. (a) Carregamento mecânico. (b) Carregamento térmico. (c) Carregamento a vácuo.....	50
Figura 5.7 – Falha de adesão 2 no duto C. (a) Carregamento mecânico. (b) Carregamento térmico. (c) Carregamento a vácuo.....	51
Figura 5.8 – Falha de adesão 1 no duto D. (a) Carregamento mecânico. (b) Carregamento térmico. (c) Carregamento a vácuo.....	52
Figura 5.9 – Falha de adesão 2 no duto D. (a) Carregamento mecânico. (b) Carregamento térmico. (c) Carregamento a vácuo.....	53
Figura 5.10 – Falha de adesão 3 no duto D. (a) Carregamento mecânico. (b) Carregamento térmico. (c) Carregamento a vácuo.....	54
Figura 5.11 – Falha de adesão 4 no duto D. (a) Carregamento mecânico. (b) Carregamento térmico. (c) Carregamento a vácuo.....	55

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Identificação do quadrante de ϕ em função dos sinais do argumento da função arctan.....	26
Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados para a falha de adesão 1 no duto C.	50
Tabela 5.2 – Parâmetros utilizados para a falha de adesão 2 no duto C.	51
Tabela 5.3 – Parâmetros utilizados para a falha de adesão 1 no duto D.	52
Tabela 5.4 – Parâmetros utilizados para a falha de adesão 2 no duto D.	53
Tabela 5.5 – Parâmetros utilizados para a falha de adesão 3 no duto D.	54
Tabela 5.6 – Parâmetros utilizados para a falha de adesão 4 no duto D.	55

Lista de Símbolos

A_r	=	Amplitude da onda sonora refletida
A_i	=	Amplitude da onda sonora incidente
bb_l	=	Barril (equivalente a $0,159 \text{ m}^3$)
ρ	=	Massa específica do material
v	=	Velocidade sônica do material
ρv	=	Impedância acústica do material
λ	=	Comprimento de onda da luz
I	=	Intensidade luminosa
$\Delta\phi$	=	Mudança de fase
ϕ	=	Fase
n	=	Número inteiro
$\delta x, \delta y, \delta z$	=	Comprimento do <i>shearing</i> no objeto nas direções x , y e z .
I_0	=	Amplitude luminosa
γ	=	Modulação do termo de interferência
Δ	=	Variação de fase devido à alteração no caminho óptico
u, v, w	=	Deslocamento de um ponto do objeto nas direções x , y e z
S	=	Posição da fonte luminosa (laser) no espaço
C	=	Posição da câmera no espaço
O	=	Ponto que representa o objeto no espaço
A, B, C	=	Constantes que definem o vetor sensibilidade k_s
$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$	=	Vetores unitários nas direções x , y e z .
ε	=	Deformação [$\mu\text{m}/\text{m}$]
R_s	=	Distância do laser ao objeto
R_c	=	Distância da câmera ao objeto

k_s	=	Vetor sensibilidade
θ	=	Ângulo plano
δl	=	Deslocamento paralelo do espelho
φ	=	Variação de fase decorrente do deslocamento δl do espelho
API	=	Abreviação de “American Petroleum Institute”
I_L	=	Intensidade luminosa [cd]
P_L	=	Potência luminosa [W]
ϕ_L	=	Fluxo luminoso [cd.sr]
ω_L	=	Ângulo espacial do feixe luminoso [sr]
E	=	Iluminamento de uma superfície [lux]
IEEE	=	Abreviação de “Institute of Electrical and Electronics Engineers”
t	=	Tempo
P_v	=	Pressão de vácuo (manométrica)
P_h	=	Pressão no atuador hidráulico (manométrica)

Capítulo 1

Introdução

1.1 A Indústria de Gás e Petróleo no Brasil

A exploração e produção de petróleo no Brasil começaram no século XIX. Os registros das primeiras concessões datam de 1858 nas proximidades de Ilhéus, na Bahia. Até 1907 foram feitas concessões na região costeira do Maranhão e da Bahia, além de São Paulo, próximo à cidade de Rio Claro. [17]

A primeira atividade de perfuração de um poço de petróleo no país foi entre 1892 e 1897, na região de São Paulo, utilizando equipamento importado dos Estados Unidos, sem sucesso no primeiro poço. Essa assim como outras tentativas iniciais foi feita exclusivamente por particulares.

A partir de 1907 começou a atuação de órgãos públicos como o SMGB (Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil), criado no próprio ano de 1907, o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), criado em 1933 e o governo do estado de São Paulo.

Até o final dos anos 30, uma série de pesquisas em busca de petróleo foi feita na Bahia, Sergipe, Alagoas e Amazonas, tanto por órgãos do governo como particulares nacionais e estrangeiros, mas sempre com resultados desanimadores.

Em 1938 foi criado o CNP (Conselho Nacional do Petróleo) e toda a atividade petrolífera passou, por lei, a ser feita por brasileiros. O CNP passou a

controlar todas as atividades de abastecimento, importação, exportação, transporte, distribuição e comércio de petróleo e derivados. As jazidas de petróleo passaram a ser patrimônio da União.

Em 1939 foi descoberto o campo de Lobato, na Bahia, que mesmo sendo considerado sub-comercial, foi um marco na história do petróleo e incentivou novas pesquisas na região. Em 1941 foi perfurado o poço que deu origem ao campo de Candeias, na Bahia, que foi o primeiro campo produtor de petróleo no Brasil.

Com o início das campanhas populares pelo “o petróleo é nosso”, o presidente Getúlio Vargas instituiu o monopólio estatal para a pesquisa, lavra, refino e transporte do petróleo e derivados. Nesta época a produção nacional girava em torno de 2 700 bbl/d (430 m³/d), enquanto o consumo era próximo de 170 000 bbl/d (27 000 m³/d), quase todos importados já na forma de derivados.

Em 1963 o monopólio foi ampliado para as atividades de importação e exportação de petróleo e derivados. A partir de 1968 iniciou-se a busca por petróleo no mar, que hoje é responsável por cerca de 90 % da produção nacional de petróleo.

Em 1997 com a criação da Agência Nacional do Petróleo (ANP), foi quebrado o monopólio estatal e outras empresas passaram a ter o direito a exercer atividade petrolífera no país.

Atualmente, o Brasil possui uma reserva total de cerca de 13,5 x 10⁹ bbl de petróleo (2,15 x 10⁹ m³), sendo 1,4 x 10⁹ bbl (0,22 x 10⁹ m³ - 10 %) em terra (*onshore*) e 12,1 x 10⁹ bbl (1,92 x 10⁹ m³ - 90 %) no mar (*offshore*). As reservas de gás são de 352 x 10⁹ m³, sendo 115 x 10⁹ m³ em terra (33 %) e 236 x 10⁹ m³ no mar (67 %). Dados de fechamento em 2003 [18].

1.2 A malha de dutos no Brasil

O primeiro duto para transporte de petróleo no Brasil data de 1942, ligando a Refinaria Experimental de Aratu ao Porto de Santa Luzia, na Bahia, com 2” (aproximadamente 50 mm) de diâmetro e apenas 1 km de extensão. Também na década de 40 foi construído o primeiro grande oleoduto brasileiro, ligando Santos a São Paulo. Na década de 50 foram construídos vários dutos

para escoar a produção dos campos de petróleo no recôncavo baiano e iniciou-se a organização da Rede Nacional de Oleodutos [17].

Os anos 60 foram marcados pela construção de vários dutos de grande extensão, como por exemplo, o oleoduto da refinaria Duque de Caixas, no Rio de Janeiro, à Belo Horizonte. A partir de 1970 iniciaram-se grandes obras na área de transporte de petróleo, assim como a produção *offshore* na plataforma continental, marcando a necessidade crescente de dutos submarinos para ligar as plataformas a terra. Na década de 80 foram mais marcantes os gasodutos, construídos para escoar a produção de gás das bacias de Campos e do Espírito Santo.

Finalmente a década de 90 representou um grande avanço na área de dutos, principalmente devido ao uso crescente de sistemas de controle e aquisição de dados por computador para supervisão e acompanhamento das operações. Nesta época houve também a construção do gasoduto Brasil-Bolívia, com mais de 2000 km de extensão trazendo o gás produzido na Bolívia para o Brasil.

Atualmente os dados oficiais mencionam 16 217 km de dutos no Brasil no fechamento de 2003 [18], porém existem informações de empresas como a Petrobras que mencionam 30 318 km de dutos (2004) [17] apenas de sua propriedade.

As informações mostradas permitem ter-se uma idéia da grandiosidade da malha de dutos brasileira e da sua idade. Ao mesmo tempo em que existem grandes dutos novos, com automação e monitoração intensas, existem dutos muito antigos, onde nem a sua localização sob a terra é exatamente conhecida.

1.3 Corrosão em dutos de transporte de petróleo

Além da grande extensão da malha de dutos brasileira, mostrada no item 1.2, o ambiente menos agressivo aos quais os dutos estão expostos é o ar livre. Os dutos mais antigos, presentes nas linhas de grande extensão e nos campos de petróleo terrestres, estão na sua maioria enterrados e portanto sujeitos aos componentes do solo e umidade, um ambiente altamente propício para a corrosão. Como não podem ser inspecionados visualmente, faz-se necessário o uso de *pigs* instrumentados para a sua inspeção e avaliação da corrosão do

duto através da medição da espessura de suas paredes. Quando detectada, a corrosão pode ser contornada pela substituição de um trecho ou de todo o duto, ou pela utilização de mantas poliméricas para revestimento externo do duto.

Devido à característica dos principais campos de petróleo no Brasil – *offshore* – existem também muitos dutos submarinos, cuja manutenção e inspeção são ainda mais complicadas e caras. Neste caso a utilização de reparos utilizando mantas poliméricas pode ser ainda mais econômica.

Além dos casos citados acima, existem pontos críticos dos dutos que estão mais sujeitos a corrosão, como, por exemplo, na região próxima à superfície da água do mar, onde há alternância de umidade e exposição à atmosfera. Nestes casos os métodos convencionais de proteção contra a corrosão não são suficientes, exigindo proteção adicional pela aplicação de pintura ou de mantas poliméricas sobre o duto.

1.4 O escopo do trabalho

Conforme será detalhado no Capítulo 2, a eficiência de proteção contra a corrosão das mantas poliméricas é fortemente dependente da aderência entre a manta e a superfície metálica do duto. Assim também acontece com o reforço estrutural dado pelo uso das mantas.

Ocorre que depois de feito o revestimento utilizando a manta polimérica, não é mais possível efetuar uma inspeção visual sobre o duto, e os efeitos da corrosão sobre uma parte não aderida do revestimento podem ser mais danosos do que se fossem sobre uma superfície exposta do metal.

Daí vem a importância de uma ferramenta capaz de detectar as falhas de adesão nos revestimentos, capaz de garantir a qualidade e eficiência dos mesmos na proteção contra a corrosão e aumento da resistência estrutural do duto.

O escopo do trabalho é o estudo das técnicas existentes, o desenvolvimento da ferramenta para detecção de falhas de adesão e uma avaliação da sua capacidade em detectar essas falhas.

1.5 Estrutura do documento

No Capítulo 1 é mostrada uma introdução ao tema, desde a indústria do petróleo no Brasil até a importância da inspeção de qualidade na adesão dos revestimentos realizados nos dutos.

Já no Capítulo 2 é discutido o revestimento dos dutos utilizando mantas de materiais compostos. São explicados os métodos de prevenção de corrosão, em especial os revestimentos orgânicos, e comentados os revestimentos feitos com propósito de reforço estrutural. Também é feito um breve apanhado das mantas encontradas no mercado atual.

O Capítulo 3 descreve algumas técnicas de detecção de falhas de adesão atualmente disponíveis (ultra-som, holografia eletrônica e a *shearography*), apontando as características, vantagens e desvantagens de cada uma delas.

O Capítulo 4 aborda os ensaios realizados com um protótipo inicial para avaliação da técnica de *shearography*, onde são mostrados alguns detalhes do protótipo, os resultados obtidos com o mesmo e as sugestões levantadas para o protótipo final.

O desenvolvimento e os ensaios realizados com o protótipo final são mostrados no Capítulo 5, onde pode avaliar-se o desempenho do sistema em diferentes tipos de falhas de adesão artificialmente provocadas.

Finalmente, o Capítulo 6 contempla as conclusões finais do projeto, as perspectivas futuras e relata algumas das dificuldades encontradas no decorrer do desenvolvimento.

Capítulo 2

Uso de Mantas Poliméricas em Dutos

Conforme visto no Capítulo 1, a grande malha de dutos no Brasil e as grandes vazões de petróleo que passam por eles implicam em custos altamente significativos de manutenção, tanto pelo custo dos próprios dutos como pelo custo decorrente das paradas de produção. Isto significa que esses dutos devem ter uma alta disponibilidade e confiabilidade para não gerar grandes perdas monetárias.

O primeiro problema a ser enfrentado é a corrosão causada pela exposição a ambientes corrosivos. Entre esses ambientes corrosivos o mais comum no contexto brasileiro é a água do mar. Nesse caso o revestimento é aplicado no duto desde o início da sua operação como forma de prevenção da corrosão.

O segundo problema a ser enfrentado são os reparos a serem feitos nos dutos durante a sua utilização. Os reparos podem ser destinados a resolver problemas de corrosão no duto ou a incrementar especificações de resistência à pressão de linhas antigas sendo reutilizadas para outras aplicações. Em ambos os casos, o reparo utilizando mantas de materiais compostos permite evitar a parada de produção para o trabalho no duto, o que pode economizar muito dinheiro comparando-se com uma substituição de um trecho ou de toda a linha de dutos. Em casos onde o reparo não pode ser considerado permanente, pelo

menos ele pode adiar a manutenção do duto para a próxima parada programada de produção.

2.1 Mantas para Proteção Contra Corrosão

Conforme comentado na Seção 1.3, os dutos fabricados em aço estão sujeitos à corrosão pelo contato com os agentes corrosivos. Existem várias técnicas para prevenção da corrosão, sendo as mais conhecidas: proteção catódica, inibidores de corrosão, revestimento metálico, revestimento orgânico, entre outros. A referência [11] mostra vários conceitos sobre como a corrosão acontece e métodos de prevenção, dos quais alguns serão citados aqui. Outras informações adicionais sobre processos de corrosão podem ser encontradas em [12] e [13].

2.1.1 Proteção Catódica

A proteção catódica é baseada na redução da dissolução do metal pela aplicação de uma corrente catódica, e pode ser feita de duas formas:

- Usando ânodos de sacrifício, que são constituídos de um metal com um potencial de redução menor que o do metal a ser protegido, e que irão funcionar como uma fonte de elétrons corroendo-se no lugar do metal sendo protegido;
- Através de uma corrente elétrica forçada, fornecida por uma fonte externa de corrente, ligando-se o metal a ser protegido ao pólo negativo da fonte de corrente contínua que irá suprir o material com os elétrons necessários para evitar a corrosão do mesmo.

Geralmente a proteção catódica é utilizada em estruturas revestidas, tendo o revestimento como forma primária de proteção.

Uma das peculiaridades da proteção catódica é a necessidade de um meio condutor de corrente elétrica para fechar o circuito, como por exemplo a água do mar, inviabilizando a sua utilização em ambiente atmosférico, por exemplo.

2.1.2 Inibidores de Corrosão

Os inibidores de corrosão reagem quimicamente com a superfície metálica ou com o ambiente à qual ela está exposta, dando à superfície certo grau de proteção. Frequentemente os inibidores de corrosão adsorvem-se na superfície metálica criando um filme protetor da superfície metálica.

A sua forma de comercialização é em solução ou dispersão. Os inibidores retardam o processo de corrosão através de três mecanismos básicos onde a oxidação do metal é reduzida:

- Aumento da polarização catódica ou anódica do metal;
- Redução do movimento ou difusão de íons para a superfície metálica;
- Aumento da resistência elétrica da superfície metálica.

2.1.3 Revestimentos Metálicos

Revestimentos metálicos formam uma camada que altera as propriedades superficiais do objeto para as propriedades do metal sendo aplicado. O objeto então se torna um material composto que possui propriedades além daquelas de cada material quando usado sozinho.

O revestimento forma uma camada resistente à corrosão, enquanto o material original da peça provê a resistência estrutural necessária. Esta camada metálica é geralmente de cromo, níquel, cobre, cádmio ou zinco.

O método de revestimento metálico mais utilizado para proteção contra a corrosão é a galvanização, que envolve a aplicação de zinco metálico sobre o aço carbono. O processo mais comum é a galvanização por banho quente, que consiste em mergulhar o objeto de aço num banho de zinco fundido.

Metalização é definida como a aplicação de revestimentos metálicos muito delgados para proteção contra corrosão ativa (anodos de zinco ou alumínio) ou como uma camada protetora (aços inoxidáveis e ligas metálicas).

2.1.4 Revestimentos Orgânicos

Os revestimentos orgânicos vão desde tintas até mantas espessas aplicadas sobre a superfície metálica a ser protegida da corrosão provocada pelo meio ambiente. A indústria do petróleo produz a maioria dos ingredientes básicos para a formação das resinas sintéticas utilizadas.

Existem vários compostos insaturados derivados de petróleo que são importantes na construção de polímeros de cadeias longas tais como vinil e acrílico. Os solventes necessários para as resinas também são derivados de petróleo, assim como os elementos básicos para revestimentos de epóxi e poliuretano.

Os revestimentos orgânicos podem fornecer proteção contra corrosão à superfície de três diferentes maneiras:

- **Impermeabilidade:** o revestimento orgânico ideal deve ser impermeável e completamente não afetado pelo ambiente específico que ele bloqueia, sendo mais comumente umidade, água ou outro agente corrosivo tal como gases, íons ou elétrons. Além disso, deve ter uma constante dielétrica alta (baixa condutividade) e perfeita adesão à superfície para evitar qualquer presença de agentes corrosivos em contato com a superfície.
- **Inibição:** revestimentos orgânicos inibidores funcionam reagindo com certo ambiente para formar um filme protetor ou barreira na superfície metálica, através da adição de um inibidor químico ao *primer* que prepara a superfície para a aplicação do revestimento.
- **Pigmentos de proteção catódica:** assim como na inibição química, podem ser adicionados aditivos ao *primer* que fazem o papel de proteção catódica. *Primers* inorgânicos baseados em zinco são bons exemplos deste conceito. A proteção catódica irá proteger o material a partir da formação de qualquer dano ao revestimento que deixará a superfície metálica exposta ao ambiente.

Um cuidado especial deve ser dado às áreas não uniformes da superfície metálica a ser revestida como soldas e cantos vivos, onde uma correta preparação da superfície deve ser realizada para garantir uma perfeita adesão do revestimento e inexistência de áreas expostas ao ambiente. Também deve ter-se um cuidado especial com suportes, flanges, juntas enroscadas e outros pontos de contato, que podem danificar o revestimento e expor o material ao ambiente.

2.2 Mantas para Reforço Estrutural

O principal requisito de resistência de um duto é quanto à pressão interna, que é necessária para o escoamento do fluido, e à pressão externa, que aparece quando o duto está submerso num fluido mais denso que o fluido sendo transportado pelo duto, que é o caso de um duto transportando óleo ou gás submerso em água, em instalações *offshore*. A pressão interna gera dois tipos de tensões em um duto: longitudinal, no sentido de “esticar” o duto devido às restrições nas extremidades do duto; e radial, no sentido de “engordar” o duto. A pressão externa provoca tensões radiais sobre o duto podendo levá-lo ao colapso.

A tensão existente na parede do duto é função de seu diâmetro externo, da sua espessura e dos esforços envolvidos (tração, pressões interna e externa, torção e flexão). Se houver uma perda na espessura por corrosão haverá uma concentração local de tensões que poderá levar ao rompimento do duto se houver uma tensão maior que a tensão máxima que o material suporta.

Da mesma maneira, ao aumentar-se a espessura da parede do duto revestindo-o, as tensões sobre as paredes do duto estarão diminuindo e conseqüentemente aumentando sua resistência. Porém para isso é necessário que:

- O revestimento esteja perfeitamente aderido ao duto para que as tensões sejam distribuídas uniformemente sobre o duto e o revestimento;
- O revestimento possua resistência mecânica suficiente para suportar as tensões geradas.

Existe uma boa referência [4] que mostra os detalhes do cálculo das tensões atuantes sobre um duto submetido a diferentes tipos de carregamento.

2.3 Mantas encontradas no mercado

Todas as empresas que fornecem as mantas recomendam um procedimento de instalação envolvendo as seguintes etapas:

- Limpeza e preparação da superfície, removendo o material oxidado e a sujeira que dificultam a adesão do revestimento;

- Nivelamento da superfície, utilizando material epóxi ou equivalente, para que não haja tensões localizadas devido à irregularidade da superfície;
- Aplicação de adesivo sobre a superfície;
- Aplicação do revestimento sobre a superfície com adesivo;
- Cura do revestimento.

As mantas são compostas por compostos poliméricos, reforçados com fibras de vidro, e são curadas ao contato com ar ou água.

A resistência dada pelo revestimento é determinada pela resistência da manta e pelo número de camadas aplicadas. Alguns fabricantes fornecem produtos específicos para aplicação submarina, onde a cura do revestimento se dá pela água salgada; e para partes críticas dos dutos (curvas, joelhos, soldas e outros) onde a montagem e adesão do revestimento são mais complicadas.

As referências [14], [15] e [16] fornecem bastante material sobre o assunto.

Capítulo 3

Técnicas para Detecção de Falhas de Adesão

3.1 Ultra-som

3.1.1 Fundamentos da técnica de ultra-som

Desde os tempos mais remotos são utilizadas técnicas para a detecção de defeitos baseando-se no fato de que um defeito em um objeto metálico produz uma alteração na sua frequência natural, o que é facilmente percebido ouvindo-se o som emitido pelo objeto quando esse é estimulado por um impacto. [5]

Entretanto desta maneira somente grandes defeitos podem ser detectados, mesmo utilizando-se técnicas mais avançadas para avaliação do som naturalmente emitido pelo objeto. Este problema é devido ao grande comprimento de uma onda sonora em um meio metálico. Por exemplo, o comprimento de uma onda sonora de 260 Hz tem aproximadamente 2,5 m na maioria dos metais. Aumentando-se a frequência da onda sonora utilizada para alguns MHz, pode chegar-se a comprimentos de onda da ordem de 6 mm – o que possibilita a identificação de pequenas falhas através da técnica de ultra-som.

As primeiras tentativas de utilização da técnica de ultra-som eram baseadas em um transmissor colocado em um lado do corpo de prova em conjunto com um receptor do outro lado. Quando havia a presença de um defeito interno ao corpo de prova, o sinal detectado pelo receptor era bastante atenuado.

Mais tarde evoluiu-se para um sistema baseado na reflexão do som pela falha no material, sendo o receptor colocado ao lado do transmissor ou até mesmo o próprio transmissor utilizado como receptor. Ao emitir um pulso sonoro, conhecendo-se o tempo de chegada da reflexão na superfície oposta do material, qualquer sinal que chegue antecipadamente revela a presença de uma falha no material, conforme pode se visto na Figura 3.1. Esta técnica elimina a necessidade da presença de um receptor na face oposta ao transmissor, facilitando a execução da inspeção.

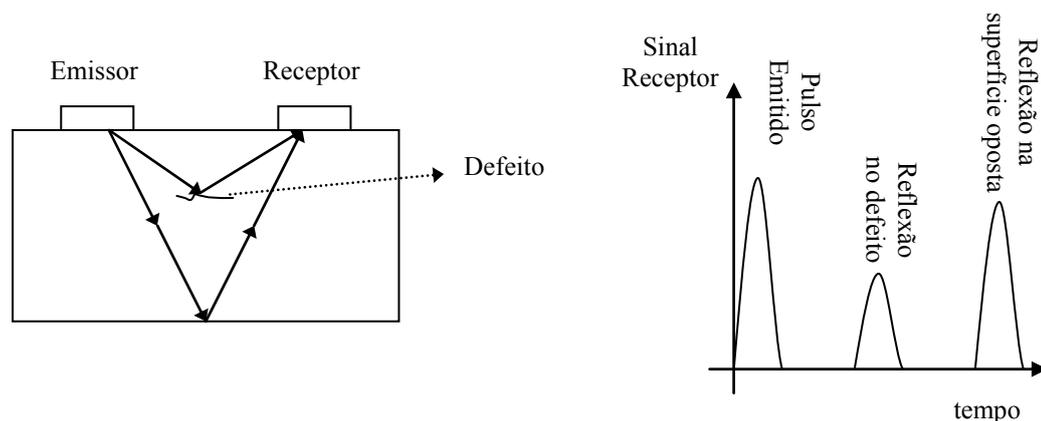


Figura 3.1 – Detecção de defeitos utilizando ultra-som pulsado. [5]

Um dos problemas encontrados na técnica de ultra-som é como fazer com que a energia sonora entre no material. Por melhor que seja o acabamento da superfície, é impossível garantir um contato suficiente entre a superfície e o transmissor piezelétrico. Basta um pequeno filme de ar para bloquear a passagem da energia sonora, por isso é comum a utilização de um líquido acoplador (geralmente óleo) para aumentar a eficiência da entrada da energia sonora no material.

A reflexão da energia sonora acontece na superfície limite entre dois materiais diferentes e é dependente da diferença entre as impedâncias

acústicas (ρv) dos dois materiais. No caso mais simples em que a onda incide normalmente sobre a interface entre os dois materiais, a razão entre a amplitude da onda refletida e a amplitude da onda incidente pode ser calculada pela Equação 3.1 [5]. Quanto maior a diferença de impedâncias acústicas, maior a amplitude da onda sonora refletida.

$$\frac{A_r}{A_i} = \frac{(\rho v)_1 - (\rho v)_2}{(\rho v)_1 + (\rho v)_2} \quad (3.1)$$

3.1.2 Aplicação da técnica de ultra-som à detecção de falhas de adesão

O ultra-som é bastante utilizado para a medição da espessura da parede de dutos. Muitos “*pigs*”, que são equipamentos utilizados para limpar internamente os dutos em operação, são equipados com transdutores ultrassônicos para avaliar a perda de material por corrosão nas paredes do duto.

Entretanto, conforme mostra a Equação 3.1, a grande diferença de impedâncias acústicas entre o ar e o aço faz com que seja impossível detectar as reflexões sonoras internas ao aço devido à sua amplitude ser muito pequena quando comparada à amplitude das reflexões na interface ar-aço. No caso dos *pigs*, a técnica funciona muito bem quando o duto está cheio de líquido e a diferença de impedâncias acústicas é menor, ou na melhor das hipóteses, com equipamentos bastante avançados e relação sinal/ruído bastante alta, funciona com gás sob pressão dentro do duto. [7]

Para operações externas ao duto, como é o caso da inspeção das falhas de adesão do revestimento, a única maneira de conseguir detectar a reflexão interna é utilizando um líquido acoplador para fazer com que o som entre no metal, tal como é feito em inspeções de soldas com ultra-som. Além disso, a inspeção através da técnica de ultra-som é usualmente feita pontualmente, elevando consideravelmente o tempo necessário para a inspeção de uma grande área, o que não acontece com as técnicas ópticas que serão descritas a seguir.

3.2 Holografia Eletrônica

3.2.1 Speckle

Quando um objeto com uma superfície contendo rugosidades maiores que o comprimento de onda da luz (λ) é iluminado, as ondas são refletidas aleatoriamente em todas as direções, conforme mostra a Figura 3.2. As ondas refletidas interferem entre si formando um padrão de interferência consistindo de regiões claras e escuras aleatoriamente distribuídas no espaço, que correspondem respectivamente às interferências construtivas e destrutivas geradas.

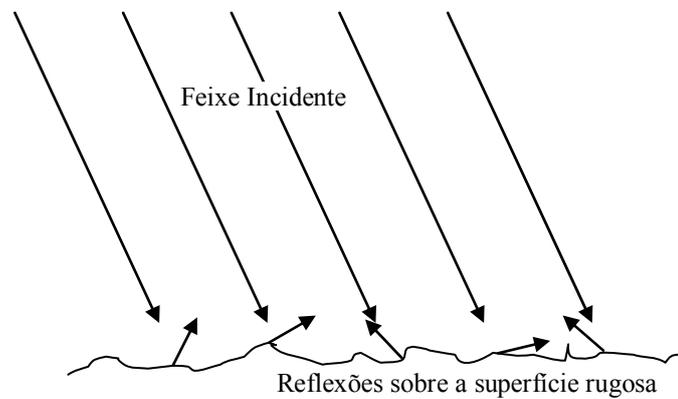


Figura 3.2 – Reflexão de uma luz coerente sobre uma superfície rugosa. [3]

Utilizando luz branca este efeito é dificilmente observável devido à pequena coerência espacial e temporal dessa luz. Aplicando a iluminação de um laser, entretanto, pode ver-se claramente um aspecto granular à luz refletida pela superfície, tal como mostra a Figura 3.3. Esse granulado óptico é conhecido na literatura técnica como “*speckle*”, que significa “mancha” em inglês.

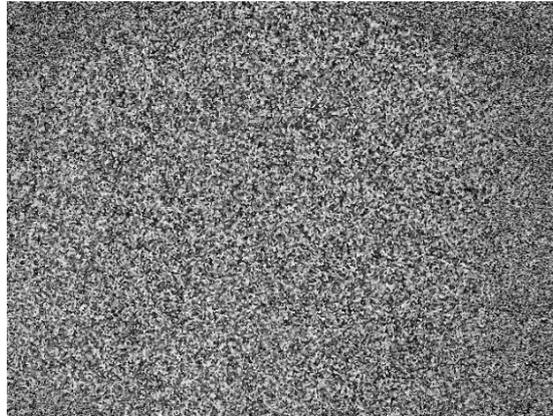


Figura 3.3 – Granulado óptico (*speckle*) resultante da iluminação com luz coerente de um objeto rugoso.

Ao contrário do que inicialmente possa imaginar-se, o tamanho dos grãos do *speckle* não depende da rugosidade do objeto, mas sim da abertura da íris da lente objetiva utilizada para a captura da imagem. Naturalmente o *speckle* é um ruído ‘branco’ contendo todo o espectro de freqüências. Através da variação da abertura da íris varia-se a freqüência espacial de corte, o que modifica diretamente o tamanho dos grãos observados.

Inicialmente o *speckle* foi considerado apenas como ruído, atrapalhando bastante na obtenção de imagens com iluminação laser e principalmente na interpretação de franjas. Mais recentemente pensou-se: “Se não se pode livrar-se do *speckle*, por que não utilizá-lo?”. Dois dos métodos de medição que utilizam o *speckle* são o ESPI (*electronic speckle pattern interferometry*) e o SPSI (*speckle pattern shearing interferometry*), mais comumente conhecidos como holografia eletrônica e *shearography*, respectivamente. [1]

3.2.2 Interferência

Quando duas ondas luminosas são combinadas ou superpostas, diz-se que ocorre a interferência entre elas.

O resultado da interferência é uma soma vetorial das amplitudes de cada onda luminosa, e sendo assim, a intensidade da onda resultante da interferência entre as duas ondas A e B é dada pela Equação 3.2 [8].

$$I = I_A + I_B + 2 \cdot \sqrt{I_A \cdot I_B} \cdot \cos(\Delta\phi) \quad (3.2)$$

sendo

$$\Delta\phi = \phi_A - \phi_B \quad (3.3)$$

Dessa maneira, a intensidade da onda luminosa resultante (I) depende das intensidades de cada onda (I_A e I_B) e da diferença de fase entre elas ($\Delta\phi$). Mantendo uma das ondas luminosas fixas e variando a fase da outra, tem-se uma variação da intensidade luminosa que será função unicamente da fase da onda luminosa variável. Essa variação de fase normalmente está associada à variação do caminho óptico percorrido pela onda. Este é o princípio da interferometria, com a qual podem medir-se deslocamentos através da variação de intensidade da onda luminosa resultante.

A fase da onda pode variar infinitamente, entretanto seu efeito visual na interferência é o mesmo para qualquer ângulo cômputo e por isso refere-se aos limites de -180° a $+180^\circ$. A intensidade da onda resultante irá variar de 0 a $4.I_A$ se $I_A = I_B$. Isso significa que a intensidade luminosa da onda resultante irá assumir valores de intensidade nula em regiões onde a interferência for totalmente destrutiva ($\Delta\phi=180^\circ$) até uma intensidade máxima em regiões onde a interferência for totalmente construtiva ($\Delta\phi=0^\circ$). As regiões claras e escuras são denominadas franjas de interferência, conforme pode ser visto na Figura 3.4 que mostra o aspecto visual resultante da interferência entre dois feixes luminosos.

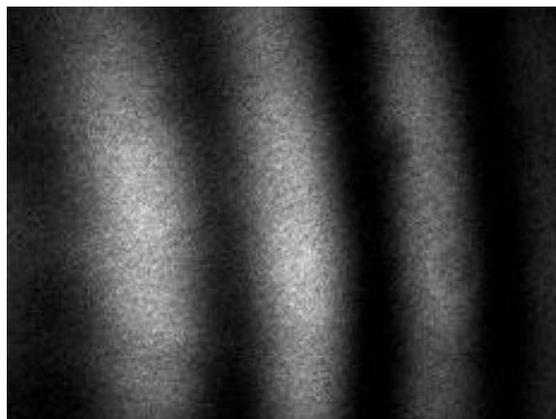


Figura 3.4 – Franjas de interferência. [8]

Considerando como exemplo uma onda luminosa proveniente de um laser de cor vermelha, onde o comprimento de onda λ é aproximadamente 670 nm, pode-se utilizar a interferometria para medir deslocamentos com

ordem de grandeza de frações do comprimento de onda, ou seja, de dezenas de nanômetros, apenas medindo a diferença de fase das franjas de interferência resultantes.

Por ser uma técnica interferométrica, a holografia eletrônica é baseada no mesmo princípio, porém neste caso a interferência pode ser feita entre as imagens de duas superfícies: uma fixa que serve de referência e outra variável onde se deseja medir o deslocamento de cada ponto observado a partir das franjas de interferência resultantes.

O esquema básico de holografia eletrônica utilizando iluminação simples pode ser visto na Figura 3.5.

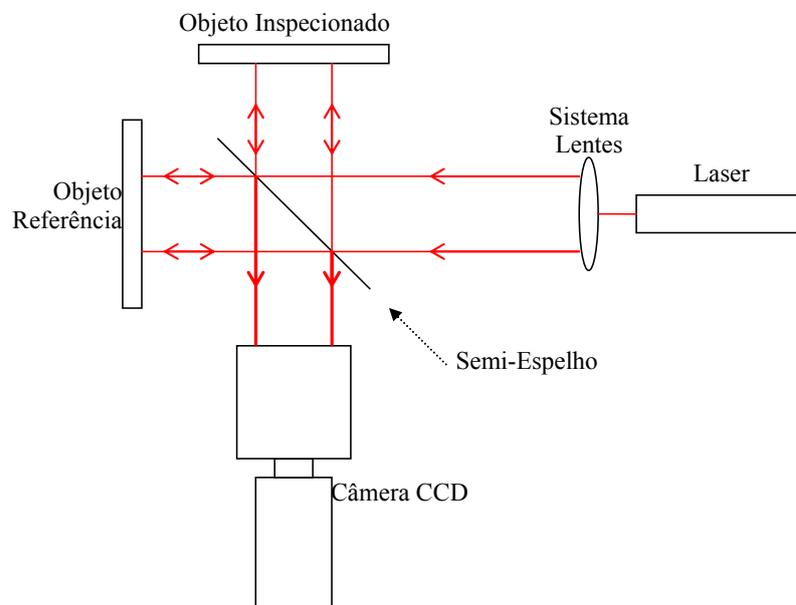


Figura 3.5 – Esquema básico de holografia eletrônica com iluminação simples.

Neste esquema a câmera enxerga uma imagem resultante a partir da interferência entre a imagem de cada objeto (referência e inspecionado), sendo a intensidade luminosa de cada ponto influenciada pela diferença de fases dos respectivos pontos em cada imagem. O objeto de referência é mantido totalmente fixo e cada ponto do objeto inspecionado normalmente sofre pequenos deslocamentos decorrentes da deformação do objeto provocada pela aplicação de uma carga. Estes deslocamentos irão gerar mudanças de fase na imagem do objeto inspecionado e conseqüentemente mudanças de intensidade na imagem vista pela câmera. Ao capturarem-se duas imagens com a câmera,

uma antes da aplicação da carga e outra depois da aplicação da carga, e calcular a diferença entre as duas, a imagem resultante representará a variação de fase da imagem de cada ponto do objeto. Esta variação de fase é relacionada com o deslocamento sofrido por cada ponto do objeto, na ordem de grandeza de dezenas de nanômetros a poucos micrometros. Na Figura 3.6 pode se ver a alternância de regiões claras (que correspondem a variações de fase da forma $2 \cdot n \cdot 180^\circ$, sendo n um número inteiro) e regiões escuras (que correspondem a variações de fase da forma $(2 \cdot n + 1) \cdot 180^\circ$). As alternâncias entre regiões claras e escuras são conhecidas como franjas, e a figura é denominada Mapa de Franjas.

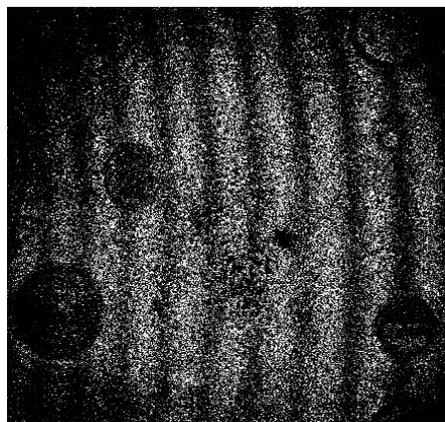


Figura 3.6 – Mapa de franjas obtido com holografia eletrônica.

Esta medição do deslocamento de cada ponto do objeto inspecionado pode ser aplicada à detecção de falhas de adesão pelo fato de que elas geram uma alteração no padrão de deformações do objeto que pode ser detectada através de não homogeneidades das franjas geradas pela holografia eletrônica.

Entretanto, a elevadíssima sensibilidade da holografia eletrônica a todo e qualquer deslocamento a torna de difícil aplicação em campo onde a mínima variação de posição de objeto pode inviabilizar todo o processo. Em laboratório a técnica é aplicada utilizando-se equipamentos para isolar vibrações e interferências externas possibilitando o funcionamento do equipamento.

Através da sua capacidade de medição de campos de micro deslocamentos podem se encontrar diversas aplicações da técnica de holografia eletrônica: medição de campo de tensões em objetos carregados, medição de tensões residuais, análise de vibrações, entre outras.

3.3 Shearography

3.3.1 Fundamentos da técnica de shearography

O conceito básico da *shearography* é a interferência entre dois padrões *speckle* obtidos de regiões próximas de uma mesma superfície. O resultado é um padrão de interferência resultante da diferença de fase entre esses dois padrões *speckle*. Dados dois pontos, P_1 e P_2 , do objeto a ser analisado, serão gerados dois pares de pontos correspondentes, um para cada imagem, conforme a Figura 3.7. Uma excelente referência sobre o assunto pode ser encontrada em [1], e outros exemplos de aplicações em [19], [20] e [21].

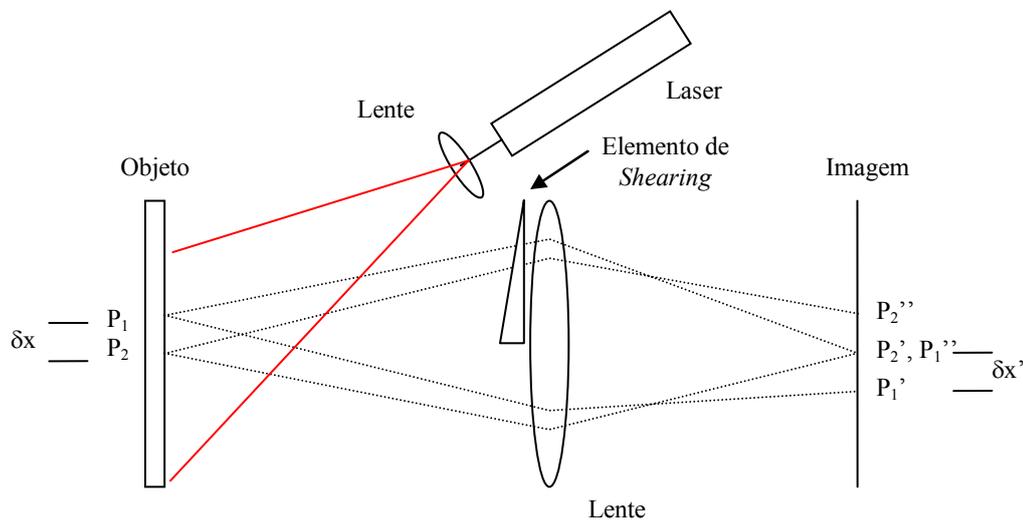


Figura 3.7 – Funcionamento da *shearography*. [1]

No ponto P_2' (P_1''), a fase da onda resultante é igual à diferença de fase entre a luz emitida por P_1 e por P_2 :

$$\phi(P_2') = \phi(P_1) - \phi(P_2) = \phi(x + \delta x, y) - \phi(x, y) \quad (3.4)$$

Dessa maneira pode ver-se que a fase da onda resultante depende da diferença entre as fases de dois pontos separados por uma distância δx . Isso mostra a dependência da *shearography* com o deslocamento relativo entre os dois pontos e não do deslocamento absoluto de cada um deles. Se os dois pontos sofrerem o mesmo deslocamento, a mudança de fase entre os dois também será a mesma e portanto nenhuma alteração do padrão de interferências será vista na imagem. Esta característica peculiar da

shearography é muito importante, pois mostra a sua insensibilidade a deslocamentos que ocorrem em todo o objeto (conhecidos como movimentos de corpo rígido). Na prática essa propriedade implica em condições mais relaxadas de isolamento a perturbações externas para realização das medições, sendo a *shearography* mais indicada à aplicação em campo que a holografia eletrônica.

A distribuição de intensidades do objeto sem carga aplicada é dada por:

$$I = 2I_0(1 + \gamma \cos \phi) \quad (3.5)$$

Sendo I_0 a amplitude luminosa que é assumida ser igual para os dois pontos vizinhos, e ϕ é um ângulo de fase aleatório. γ é a modulação para o termo de interferência.

Aplicando a carga ao objeto, uma mudança no caminho ótico ocorre devido à deformação da sua superfície, o que provoca uma mudança de fase relativa entre os dois pontos vizinhos. A distribuição de intensidades é alterada, sendo representada por:

$$I' = 2I_0[1 + \gamma \cos(\phi + \Delta)] \quad (3.6)$$

Quando as duas imagens são capturadas e a diferença entre elas é calculada, o resultado é mostrado em valores absolutos, já que não é possível se ter intensidades luminosas negativas:

$$|I_s| = |I - I'| = \left| 4I_0 \left[\sin\left(\phi + \frac{\Delta}{2}\right) \sin \frac{\Delta}{2} \right] \right| \quad (3.7)$$

Através da diferença entre duas imagens, podem visualizar-se as franjas correspondentes à deformação do objeto, entretanto não se pode recuperar o valor do deslocamento de fase Δ já que o valor de intensidade de cada ponto depende também de I_0 e de ϕ que não são conhecidos. A solução para a obtenção do valor do deslocamento de fase é a utilização da técnica de *deslocamento de fase*, a ser descrita na Seção 3.3.3.

Outro ponto importante a ressaltar é que o mostrado acima só é válido para deslocamentos muito menores que os grãos de *speckle* da imagem, caso contrário ocorre decorrelação e passa-se a ver a diferença de fase entre pontos diferentes do objeto, o que é totalmente aleatório segundo a própria natureza do *speckle*.

3.3.2 Relação entre as deformações do objeto e as mudanças de fase na imagem obtida

Esquemáticamente através da Figura 3.8 pode ser vista a relação entre as deformações do objeto e as conseqüentes mudanças relativas de fase visíveis na imagem. Na figura, P_1 e P_2 são dois pontos distintos do objeto que devido ao *shearing* representado por $(\delta x, \delta y, \delta z)$ são sobrepostos na imagem; P_1^* e P_2^* são as novas posições dos pontos P_1 e P_2 após a movimentação (u, v, w) e $(u+\delta u, v+\delta v, w+\delta w)$ dos mesmos. A fonte luminosa é representada pontualmente no ponto $S(x_s, y_s, z_s)$ e a câmera também representada pontualmente no ponto $C(x_c, y_c, z_c)$, assumindo que o tamanho da imagem na câmera é muito menor que a distância da câmera ao objeto.

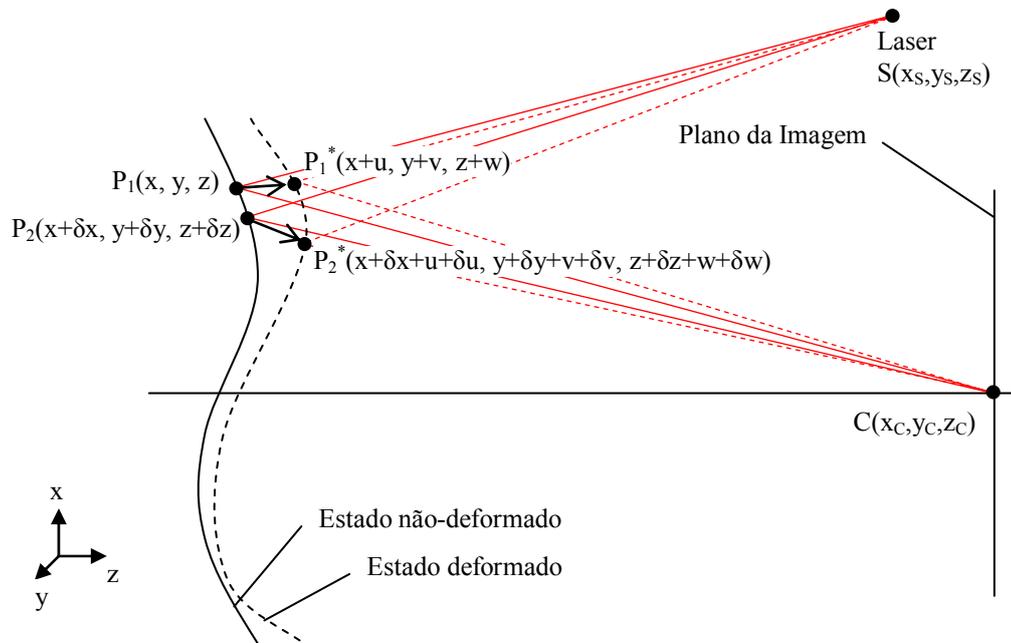


Figura 3.8 – Variação do caminho óptico pela deformação do objeto. [1]

Sendo as deformações do objeto definidas por:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} & \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} & \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} \\
 \varepsilon_{xy} &= 2 \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \varepsilon_{yz} &= 2 \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \varepsilon_{xz} &= 2 \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

Assumindo que o tamanho do objeto é muito menor que as distâncias do laser e da câmara ao mesmo, pode se deduzir que as distâncias do laser ao objeto R_s e da câmara ao objeto R_c são:

$$\begin{aligned} R_s &= \overline{SO} \approx \overline{SP_1} \approx \overline{SP_1^*} \approx x_s^2 + y_s^2 + z_s^2 \\ R_c &= \overline{OC} \approx \overline{P_1C} \approx \overline{P_1^*C} \approx x_c^2 + y_c^2 + z_c^2 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Então ocorre que a variação de fase na imagem em função da deformação do objeto, para um *shearing* somente na direção x é dada por:

$$\begin{aligned} \Delta_x &= \left(A \frac{\delta u}{\delta x} + B \frac{\delta v}{\delta y} + C \frac{\delta w}{\delta z} \right) \delta x \\ A &= \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x_s - x}{R_s} + \frac{x_c - x}{R_c} \right) \\ B &= \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{y_s - y}{R_s} + \frac{y_c - y}{R_c} \right) \\ C &= \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{z_s - z}{R_s} + \frac{z_c - z}{R_c} \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Se o *shearing* for pequeno o suficiente, pode escrever-se que:

$$\Delta_x = \left(A \frac{\partial u}{\partial x} + B \frac{\partial v}{\partial x} + C \frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta x \quad (3.11)$$

Analogamente, se o *shearing* for na direção y , tem-se que:

$$\Delta_y = \left(A \frac{\partial u}{\partial y} + B \frac{\partial v}{\partial y} + C \frac{\partial w}{\partial y} \right) \delta y \quad (3.12)$$

Pode-se ainda reescrever a Equação 3.11 como:

$$\Delta_x = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \vec{k}_s \cdot \vec{i} + \frac{\partial v}{\partial x} \vec{k}_s \cdot \vec{j} + \frac{\partial w}{\partial x} \vec{k}_s \cdot \vec{k} \right) \delta x \quad (3.13)$$

Sendo \vec{k}_s chamado de *vetor sensibilidade*. Considerando que o laser encontra-se no plano xz com um ângulo θ_{xz} com a direção z (Figura 3.9), que o objeto é plano e que novamente as dimensões do objeto e do sensor da câmara são muito menores que as distâncias do objeto e do laser à câmara, tem-se que:

$$\begin{aligned} \vec{k}_s &= A \cdot \vec{i} + B \cdot \vec{j} + C \cdot \vec{k} \\ \vec{k}_s &= \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sin \theta_{xz} \cdot \vec{i} + (\cos \theta_{xz} + 1) \cdot \vec{k} \right) \end{aligned} \quad (3.14)$$

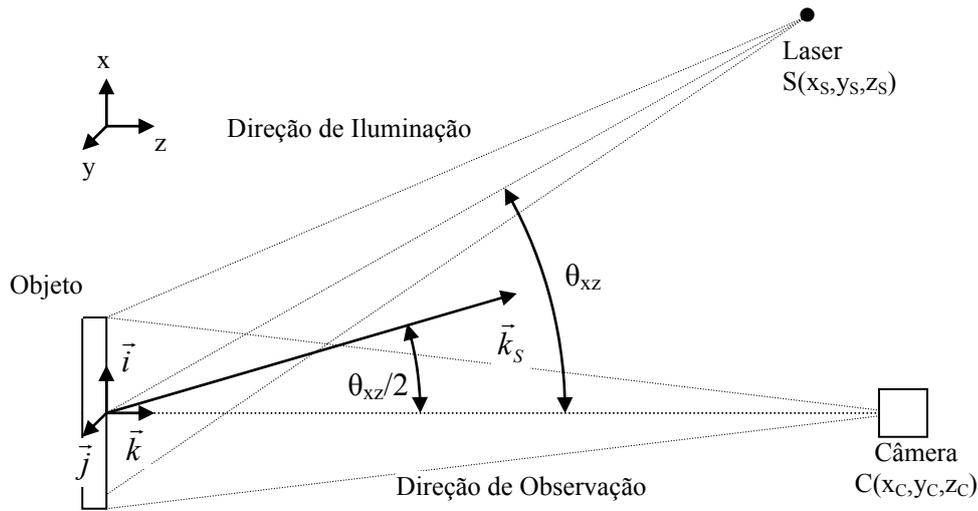


Figura 3.9 – Vetor Sensibilidade. [1]

E desta maneira, a variação de fase é:

$$\begin{aligned}\Delta_x &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \delta x}{\lambda} \left[\sin \theta_{xz} \frac{\partial u}{\partial x} + (\cos \theta_{xz} + 1) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \\ \Delta_y &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \delta y}{\lambda} \left[\sin \theta_{xz} \frac{\partial u}{\partial y} + (\cos \theta_{xz} + 1) \frac{\partial w}{\partial y} \right]\end{aligned}\quad (3.15)$$

Analogamente, se a iluminação for feita no plano yz :

$$\begin{aligned}\Delta_x &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \delta x}{\lambda} \left[\sin \theta_{yz} \frac{\partial v}{\partial x} + (\cos \theta_{yz} + 1) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \\ \Delta_y &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \delta y}{\lambda} \left[\sin \theta_{yz} \frac{\partial v}{\partial y} + (\cos \theta_{yz} + 1) \frac{\partial w}{\partial y} \right]\end{aligned}\quad (3.16)$$

E finalmente, se a iluminação for perpendicular ao objeto (no eixo z), tem-se que $\theta_{xz} = \theta_{yz} = 0^\circ$:

$$\begin{aligned}\Delta_x &= \frac{4 \cdot \pi \cdot \delta x}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \\ \Delta_y &= \frac{4 \cdot \pi \cdot \delta y}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial y}\end{aligned}\quad (3.17)$$

Concluindo, a componente fora do plano $\partial w / \partial x$ ou $\partial w / \partial y$ pode ser medida com uma simples iluminação perpendicular à superfície do objeto. A componente no plano $\partial u / \partial x$, $\partial v / \partial x$, $\partial u / \partial y$ ou $\partial v / \partial y$ nunca pode ser medida com uma simples iluminação porque para ter-se $\cos(\theta) + 1 = 0$ é preciso uma iluminação paralela

à superfície do objeto, o que é impraticável ainda mais considerando a superfície de um duto que é cilíndrica.

Caso o objeto não seja plano ou seu tamanho não seja desprezível em relação à distância à câmera e à fonte de luz, as componentes representadas nas equações divergirão dos valores de deformação sobre a superfície, entretanto os valores medidos ainda são úteis quando *shearography* é utilizada como uma ferramenta qualitativa de teste não destrutivo (NDT – *Nondestructive Testing*).

3.3.3 Deslocamento de Fase

Conforme a Equação 3.7, a intensidade luminosa de cada ponto da imagem obtida com a diferença das imagens do objeto em estado natural e estado carregado tem sua intensidade dependente da intensidade média I_0 , da fase original ϕ e da variação de fase Δ . Destes o único valor que interessa é o valor de Δ , que está diretamente ligado à deformação do ponto. Para recuperar-se o valor de Δ , utiliza-se a técnica de deslocamento de fase, a ser descrita a seguir.

Através da utilização do interferômetro modificado de *Michelson* como elemento de *shearography* (conforme a Figura 3.10 a seguir), pode impor-se uma variação de fase adicional à imagem através do deslocamento paralelo de um dos espelhos. Deslocando paralelamente o espelho em δl , o caminho óptico varia em $2\delta l$ e a fase adicional inserida é calculada por [1]:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2\delta l \quad (3.18)$$

Dessa maneira, adquirem-se imagens com quatro deslocamentos de fase diferentes:

$$\begin{aligned} I_1 &= 2I_0 [1 + \cos \phi] \\ I_2 &= 2I_0 [1 + \cos(\phi + 90^\circ)] \\ I_3 &= 2I_0 [1 + \cos(\phi + 180^\circ)] \\ I_4 &= 2I_0 [1 + \cos(\phi + 270^\circ)] \end{aligned} \quad (3.19)$$

É possível combinar as equações 3.19 e explicitar o valor da fase da seguinte maneira:

$$\phi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad (3.20)$$

Como a função *arctan* retorna apenas valores no 1º e no 4º quadrantes, utilizam-se os valores do numerador e do denominador para ajustar o valor encontrado de ϕ ao quadrante correto, de acordo com a Tabela 3.1:

$I_4 - I_2$	$I_1 - I_3$	Quadrante de ϕ
+	+	I (0° a 90°)
+	-	II (90° a 180°)
-	-	III (180° a 270°)
-	+	IV (270° a 360°)

Tabela 3.1 – Identificação do quadrante de ϕ em função dos sinais do argumento da função *arctan*.

Dessa maneira, a imagem resultante da técnica de deslocamento de fase corresponde à fase da luz refletida por cada ponto objeto. Esta imagem é chamada de mapa de fases. Capturando quatro imagens do objeto em estado natural e quatro imagens do objeto em estado carregado, o valor de Δ pode ser encontrado pela diferença entre os valores de fase encontrados para cada estado do objeto. A subtração dos mapas de fases antes e depois do carregamento do objeto é chamada de mapa de variação de fases.

Porém ainda há um problema: o valor de Δ recuperado está entre 0° e 360°, devido à natureza periódica das funções trigonométricas que representam a intensidade luminosa em função da fase. O valor correto de Δ pode ser obtido através de um algoritmo de remoção do salto de fase. São algoritmos especializados e complexos que fogem ao escopo deste trabalho, mas estão fartamente documentados na bibliografia. [1]

Para gerar o deslocamento de fase, utiliza-se uma configuração modificada do interferômetro de *Michelson* contendo um espelho regulável em inclinação (horizontal e/ou vertical) para geração do *shearing*, e outro espelho deslocável nanometricamente de forma paralela por um atuador piezolétrico para impor uma variação de fase constante ao longo de toda a imagem, conforme a Figura 3.10.

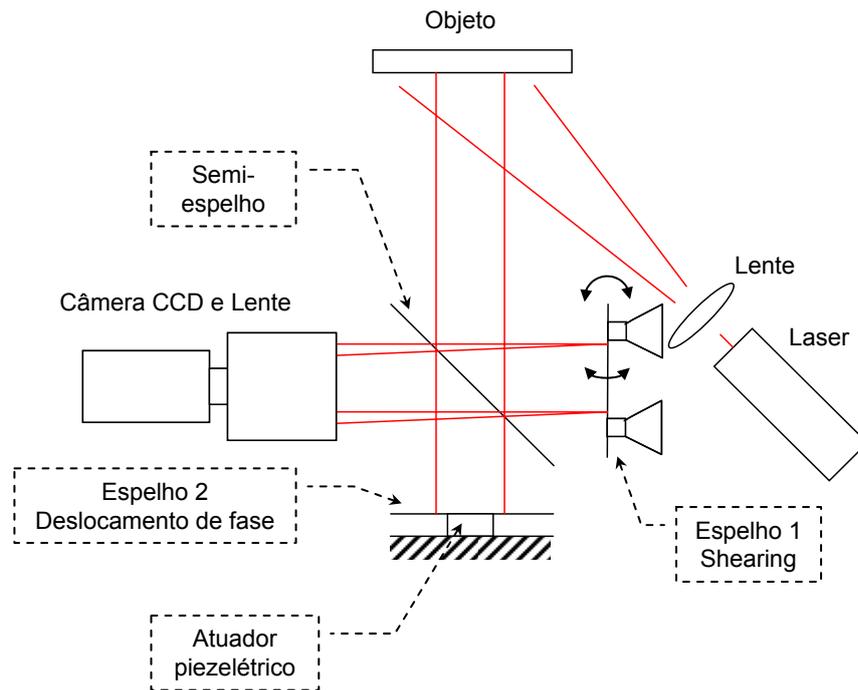


Figura 3.10 – Interferômetro de *Michelson* modificado para geração do *shearing* e deslocamento de fase.

Capítulo 4

Protótipo Preliminar para Detecção de Falhas de Adesão

4.1 Requisitos do Sistema

Nesta fase inicial, o objetivo principal do sistema é avaliar a capacidade da técnica de *shearography* em detectar falhas de adesão nos revestimentos compostos utilizados em dutos.

Desta maneira, tentar-se-á localizar as falhas de adesão artificialmente criadas nos revestimentos dos dutos e experimentalmente avaliar a melhor combinação de direção de iluminação e *shearing* para a detecção das falhas.

Além disso, deseja-se manter uma coerência com o futuro produto que será utilizado em campo, de modo a não obter resultados possíveis somente em laboratório.

4.2 Concepção do Sistema

4.2.1 Corpos de Prova

Como corpos de prova foram utilizados dois dutos metálicos confeccionados em aço API 5L x 46, com dimensões nominais de 274 mm de diâmetro, 7 mm de espessura, e aproximadamente 1,5 m de comprimento. O

primeiro, denominado duto A, foi revestido em um trecho no centro do comprimento com material polimérico da cor branca fosca e o segundo, denominado duto B, foi revestido também na parte central do comprimento, mas com material polimérico na cor amarelo brilhante. Os revestimentos provêm de diferentes fabricantes e têm características distintas.

Os revestimentos aplicados nos corpos de prova foram preparados para produzir artificialmente falhas de adesão obtidas através da aplicação de trechos de filmes de polietileno entre o revestimento e a parede do duto, impedindo a adesão do revestimento na região onde o filme foi aplicado. Entretanto a localização, a extensão e a forma dessas áreas foram mantidas em segredo pelo fabricante dos corpos de prova para não influenciar os testes de avaliação do protótipo. Podemos ver a foto do duto A na Figura 4.1, sendo o duto B semelhante em tamanho e forma diferindo apenas o tipo de revestimento, como poderá ser visto posteriormente na Figura 4.13.



Figura 4.1 – Duto A.

4.2.2 Aplicação de Carga

Em função da disponibilidade de equipamentos e facilidade de instalação, foi escolhido para a aplicação de carga um sistema hidráulico manual para aplicação de pressão interna ao duto.

Ambos os dutos foram testados pelo fornecedor até a pressão de 9 MPa, sendo recomendado para testes a sua utilização de até 6 MPa.

O duto foi preenchido com água e a bomba hidráulica manual injeta óleo no sistema, produzindo pressão interna no duto. A bomba é mostrada na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Bomba hidráulica manual para aplicação de pressão.

4.2.3 Iluminação

De forma a tornar a iluminação suficiente flexível para a experimentação de diferentes configurações, foi utilizado um laser de Hélio-Neônio com 20 mW de potência e $\lambda = 632,8$ nm, acoplado a um feixe de fibras ópticas que permite mudar a direção de iluminação facilmente. A configuração de iluminação pode ser vista na Figura 4.3.

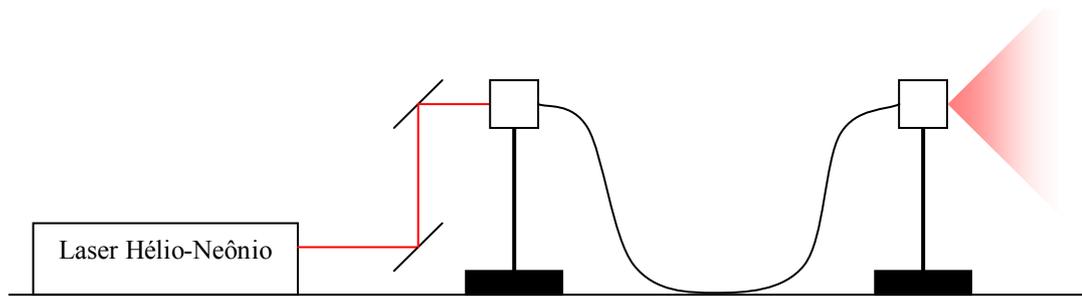


Figura 4.3 – Sistema de iluminação utilizando fibra óptica.

Através da movimentação do segundo suporte da fibra a direção de iluminação pode ser facilmente mudada. Embora este sistema seja bastante versátil, não é indicado para trabalhos em campo visto que é necessário aguardar-se alguns minutos até que a fibra óptica estabilize-se, pois antes deste tempo a acomodação e variação de forma da fibra óptica provocam variações excessivas de fase na imagem que dificultam, ou mesmo impedem a medição.

4.2.4 Geração do *shearing*

Para a geração do *shearing* e deslocamento de fase foi montado um cabeçote de medição baseado no interferômetro de *Michelson* mostrado anteriormente (Figura 3.10). Uma representação tridimensional do cabeçote de medição pode ser vista na Figura 4.4, onde se vêem o espelho ajustável manualmente através do parafuso para regulagem do tamanho do *shearing*, e o espelho movimentado nanometricamente pelo atuador piezelétrico, além do semi-espelho que permite que a imagem chegue aos dois espelhos e depois promova a sobreposição e interferência das duas imagens na câmera.

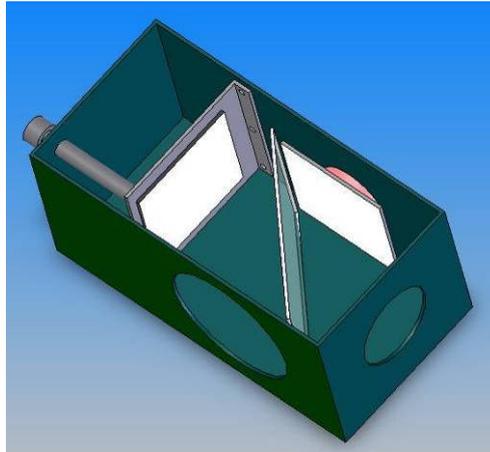


Figura 4.4 – Cabeçote de medição contendo o interferômetro de *Michelson* para geração do *shearing*.

Ao cabeçote de medição foram adicionados e fixados a câmera e suportes para sua fixação ao duto, que se faz através de três pequenos ímãs que aderem à superfície metálica do duto: dois na parte superior e um na parte inferior. Como vantagem deste sistema tem-se a sua praticidade e flexibilidade para mudar o sistema de posição e como desvantagem a obrigatoriedade de manterem-se os dois ímãs superiores na parte não revestida do duto para conseguir manter o sistema suspenso. O mesmo pode ser visto na Figura 4.5.

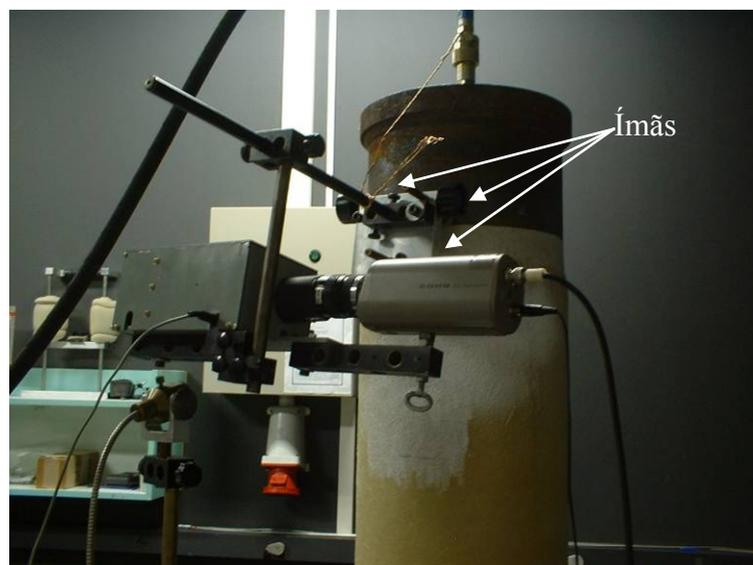


Figura 4.5 – Fixação do cabeçote de medição ao duto.

4.2.5 Deslocamento de Fase

Para realizar o deslocamento de fase foi utilizado um atuador piezelétrico acoplado a um dos espelhos do interferômetro de *Michelson*. O atuador piezelétrico é ativado por uma fonte de tensão contínua regulada manualmente.

Já que a relação tensão de alimentação versus deslocamento do atuador piezelétrico é desconhecida, foi necessário efetuar uma calibração do atuador piezelétrico. Para isto foi efetuado o seguinte procedimento:

1. Captura de imagem de referência;
2. Aplicação de pressão ao duto;
3. Visualização de “Franjas ao Vivo” através do software, que consiste em mostrar ao vivo a subtração entre a imagem atual e a imagem de referência gravada no item 1;
4. Partindo-se da tensão 0 V, variar a tensão até o deslocamento de 360° das franjas, obtendo-se a tensão de calibração V_C ;
5. Desligando-se a fonte de tensão, comparar as franjas com as obtidas com 0 V e efetuar ajustes em V_C caso seja necessário.

Tendo-se o valor de V_C , os valores para deslocamentos de fase menores (90°, 180° e 270°) podem ser obtidos através de interpolação linear.

A calibração efetuada encontrou o valor de 90 V para um deslocamento de 360°. Logo o valor a ser utilizado será 0,25 V/°.

4.2.6 Aquisição de Imagens

A aquisição de imagens é feita através de uma câmera monocromática, que em conjunto com a placa de captura fornece uma imagem com 640 *pixels* de largura por 480 *pixels* de altura.

4.3 Procedimento de medição utilizado

Para a execução dos ensaios, foi adotado o seguinte procedimento:

1. Iluminação da área a ser inspecionada, ajustando a fibra óptica na direção adequada e aguardando o tempo necessário para sua acomodação (em torno de 10 a 15 min);

2. Fixação do sistema de medição ao duto utilizando as bases magnéticas;
3. Alinhamento do interferômetro, ajustando o tamanho do *shearing* desejado;
4. Geração do mapa de fases para o objeto sem carga, através da aquisição de 4 imagens deslocando o atuador piezelétrico em 0°, 90°, 180° e 270° e cálculo de fase através da Equação 3.20;
5. Aquisição de 'Franjas ao Vivo' para visualização das franjas em tempo real;
6. Aplicação de Carga, até que surja uma boa quantidade de franjas (poucas franjas não permitem a visualização do efeito, muitas franjas não podem ser vistas devido à limitação da resolução da câmera e da presença de ruído nas imagens);
7. Geração do mapa de fases para o objeto com carga, da mesma maneira como foi feita no item 4;
8. Cálculo do mapa de variação de fase pela diferença dos mapas de fases;
9. Filtragem do mapa de variação de fase;
10. Análise visual dos resultados.

4.4 Resultados obtidos

4.4.1 Duto com revestimento polimérico (Duto A)

Para o duto A após a varredura do revestimento para a localização da falha de adesão, a mesma foi encontrada na parte inferior do revestimento, próxima à borda do mesmo.

A localização do limite superior da falha pode ser facilmente observada através da Figura 4.6, onde a falha de adesão está representada pela área destacada.

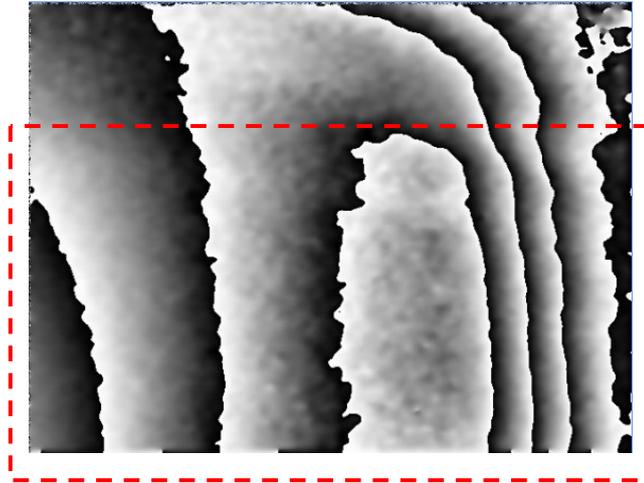


Figura 4.6 – Limite superior da falha de adesão no duto A.

A Figura 4.7 mostra a localização da extremidade direita da falha de adesão. Na parte esquerda da imagem há um número maior de franjas do que na parte direita, mostrando uma descontinuidade que revela a presença da falha.

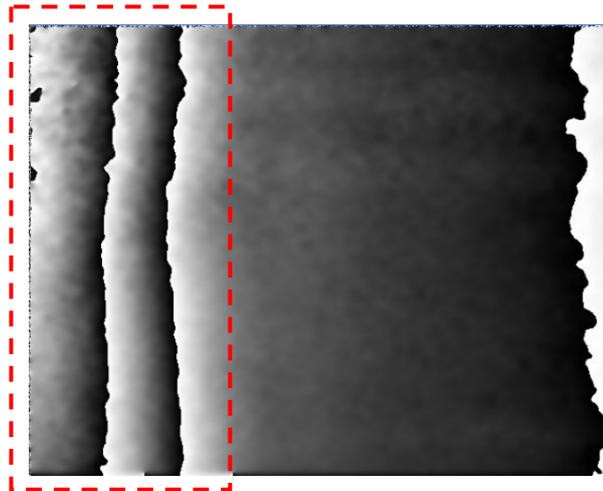


Figura 4.7 – Extremidade direita da falha de adesão do duto A.

E finalmente, a outra extremidade (esquerda) pode ser vista na Figura 4.8 .

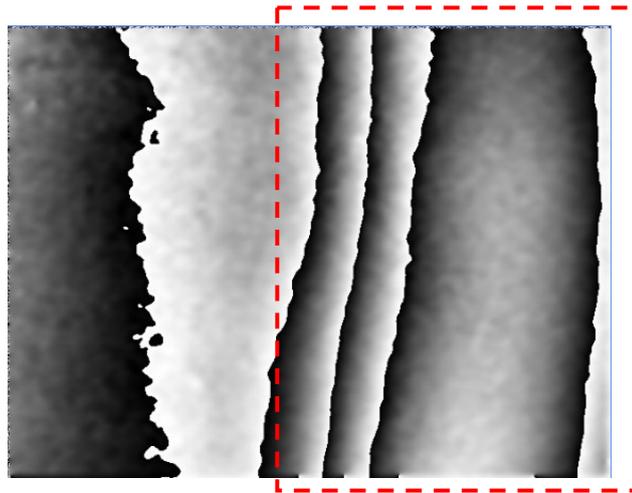


Figura 4.8 – Extremidade esquerda da falha de adesão no duto A.

Através do recurso “franjas ao vivo”, que embora ofereça uma pior qualidade visual das franjas, é possível demarcar com clareza a extremidade da falha de adesão. A delimitação total das bordas da falha de adesão pode ser vista na Figura 4.9.

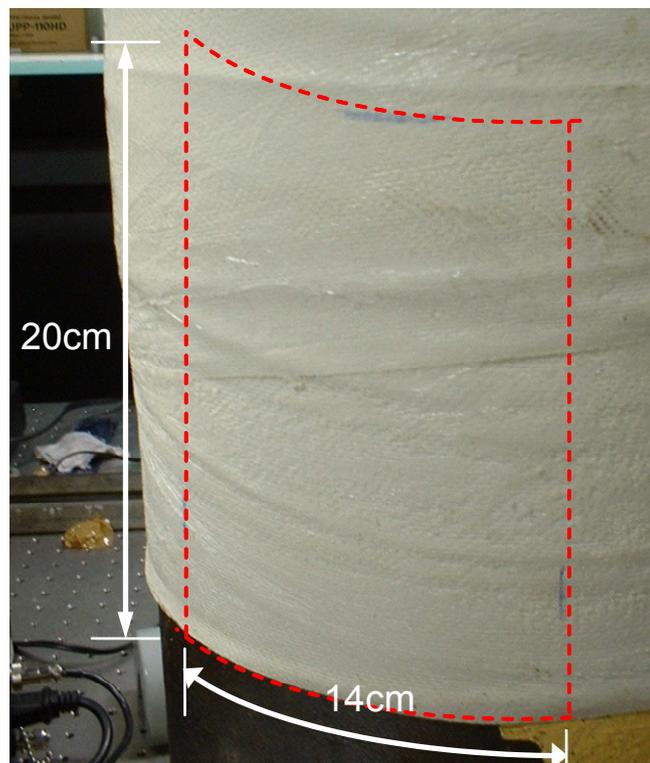


Figura 4.9 – Delimitação da falha de adesão no duto A.

4.4.2 Duto com revestimento à base de fibra de vidro (Duto B)

Para o duto B, a falha de adesão foi encontrada próxima à borda superior do revestimento.

A delimitação da falha pode ser vista na Figura 4.10, na Figura 4.11 e também na Figura 4.12.

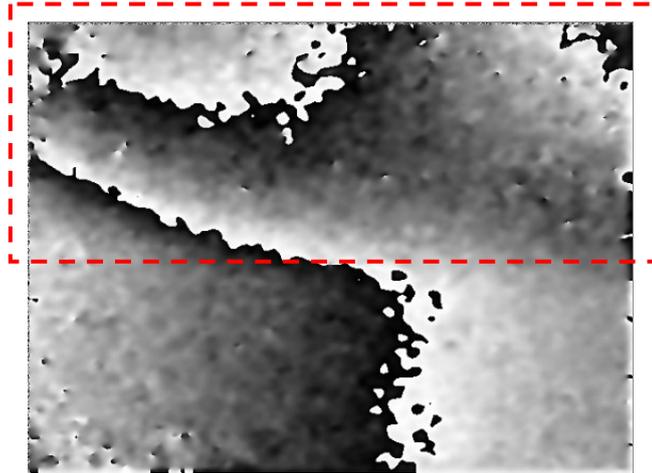


Figura 4.10 – Limite inferior da falha de adesão no duto B.

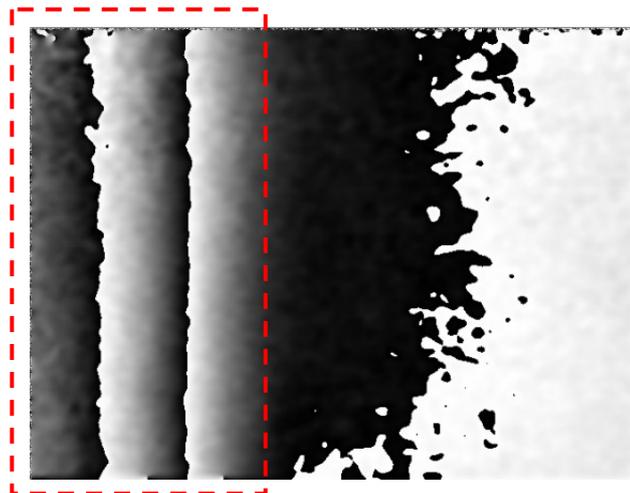


Figura 4.11 – Extremidade direita da falha de adesão do duto B.

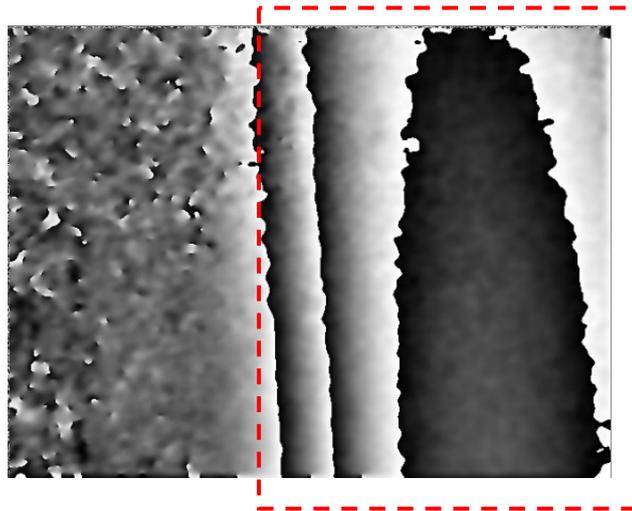


Figura 4.12 – Extremidade esquerda da falha de adesão no duto B.

Da mesma maneira do que foi feito com o duto A, as extremidades da falha de adesão puderam ser demarcadas sobre o duto utilizando o recurso “franjas ao vivo” do software, obtendo o resultado mostrado na Figura 4.13 .



Figura 4.13 – Delimitação da falha de adesão no duto B.

4.5 Conclusões do protótipo preliminar

Apesar das limitações do protótipo preliminar, tais como a resolução limitada da câmera, a pequena abertura da lente utilizada e a potência do laser relativamente baixa, foi possível detectar as falhas de adesão com clareza.

O revestimento de cor amarela mostrou-se excessivamente brilhante atrapalhando um pouco o ensaio, mas fazendo-se uma pintura com tinta branco-fosca a qualidade das imagens foi bastante incrementada, tornando-as do mesmo nível das imagens do duto A.

A melhor combinação direção de iluminação e direção do *shearing* encontrada foi o *shearing* horizontal e a iluminação quase normal à superfície do duto, ou seja, medindo a componente $\partial w/\partial x$.

As recomendações para o próximo protótipo são:

- Teste de outros métodos de aplicação de carga ao duto, tais como calor e vácuo, que são mais adaptados à realidade posterior em campo;
- Aumento da área analisada por imagem e da qualidade da mesma, através da utilização de uma lente com maior abertura, de um laser com potência maior e de uma câmera com maior resolução, evitando a captura de várias imagens para a delimitação da falha de adesão;
- Desenvolvimento de um cabeçote de medição mais compacto e portátil que possibilite medições em áreas mais afastadas da borda do revestimento, o que foi impossibilitado pelo sistema com ímãs.

Capítulo 5

Protótipo Final para Detecção de Falhas de Adesão

Em virtude do sucesso do protótipo preliminar mostrando a viabilidade da técnica na busca de falhas de adesão nas mantas de material compostos em dutos, foi desenvolvido um protótipo definitivo específico para este trabalho.

5.1 Objetivos

Dada a comprovação da capacidade da técnica de *shearography* em detectar as falhas de adesão em revestimentos compostos usados em dutos, o presente protótipo tem como objetivos:

- Avaliar diferentes técnicas de aplicação de carga ao duto, mais voltadas à utilização em campo;
- Verificar a capacidade da técnica utilizando componentes de melhor qualidade, tal como um laser com maior potência e câmera com maior resolução.

5.2 Requisitos

Em primeiro lugar com este novo protótipo tentou-se superar as deficiências encontradas no primeiro protótipo. Para isso criaram-se alguns requisitos básicos adicionais ao projeto:

- Aplicação de carga através de aquecimento e vácuo na superfície do revestimento;
- Sistema de câmera e lente capaz de enxergar uma área correspondente à semicircunferência do duto em largura, com uma resolução maior na tentativa de detectar menores falhas de adesão;
- Laser com maior potência capaz de iluminar com intensidade suficiente toda a área vista pela câmera;
- Capacidade de trabalhar com dutos de 500 mm de diâmetro;
- Automação do sistema de deslocamento de fase facilitando a inspeção, diminuindo o tempo entre as imagens deslocadas em fase e conseqüentemente aumentando a qualidade das franjas obtidas;
- Portabilidade do cabeçote de medição possibilitando a inspeção também da área central do revestimento.

5.3 Concepção do Sistema

5.3.1 Corpos de Prova

Foram utilizados dois dutos de 500 mm de diâmetro (20”) e aproximadamente 1,6 m de comprimento como corpos de prova, que podem ser vistos na Figura 5.1. O primeiro, chamado de duto C, foi revestido com quatro camadas de manta polimérica, representando um revestimento da ordem de 4 mm de espessura que é tipicamente o valor usado com fins de proteção somente contra corrosão. O segundo, denominado duto D, foi revestido com vinte e seis camadas de manta polimérica, resultando num revestimento com cerca de 26 mm de espessura, representando um revestimento típico destinado a reforço estrutural.

Também aqui, em ambos os corpos de prova foram artificialmente provocadas falhas de adesão entre a manta polimérica e o duto e entre as camadas da manta polimérica, utilizando para isso filmes de polietileno que não apresentam aderência com o adesivo utilizado, a serem detectados pelo

sistema. Na Figura 5.1 podem ser vistos os corpos de prova utilizados com o novo sistema desenvolvido.



Figura 5.1 – Corpos de prova para o protótipo final. (a) Duto C (à esquerda). (b) Duto D (à direita).

5.3.2 Aplicação de Carga

Para a aplicação de carga, foram utilizadas três formas distintas: (a) aplicação de força interna para variação da forma do duto por meio de macaco hidráulico, (b) aquecimento da superfície externa do revestimento e (c) aplicação de vácuo sobre a superfície do revestimento. Convém notar que diferentemente do método de aplicação de carga utilizado no protótipo preliminar (aplicação de pressão interna), nenhum destes métodos exige que o duto esteja cheio de líquido e selado.

O macaco hidráulico foi posicionado na parte interna do duto e é acionado por uma bomba hidráulica manual. Através dele são geradas forças de tração de até 1 kN sempre de dentro para fora e perpendicularmente à região

analisada. A configuração montada para esta forma de aplicação de carga pode ser vista na Figura 5.2.

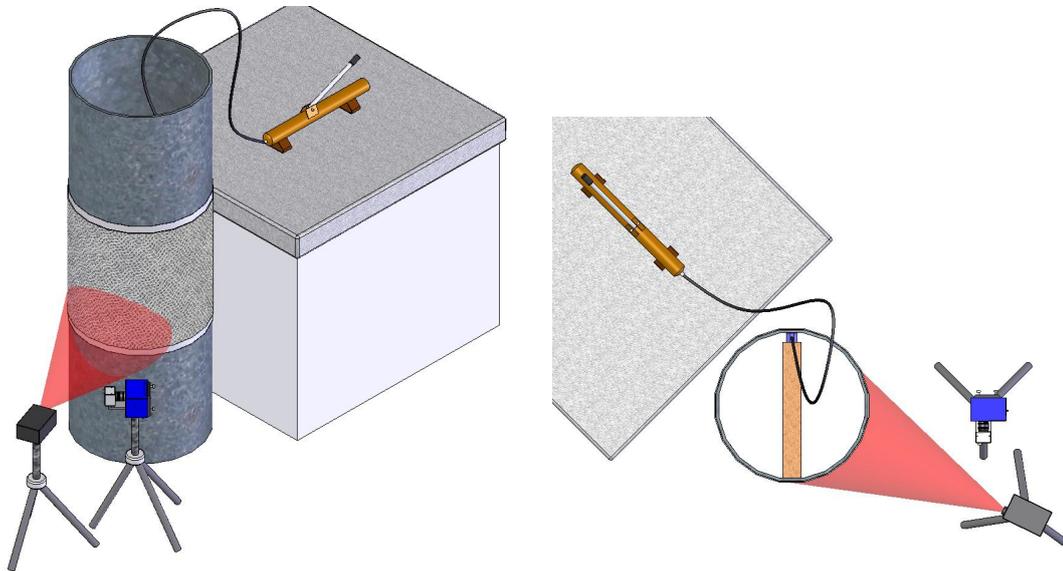


Figura 5.2 – Configuração montada para aplicação de carga por força interna. (a) Perspectiva isométrica mostrando a localização do cabeçote de iluminação e medição. (b) Vista superior mostrando o posicionamento do macaco hidráulico interno ao duto.

Para o aquecimento da superfície externa foram utilizados dois equipamentos: (a) uma lâmpada halógena de 1000 W de potência e (b) um soprador de ar quente (um secador de cabelo comum). Quando a lâmpada foi utilizada, a mesma permaneceu a uma distância de aproximadamente 40 cm do duto e foi mantida ligada por períodos de 10 a 15 s. Quando o soprador de ar quente foi utilizado, foi adotada uma distância de 80 cm do duto e períodos de ativação de 15 a 30 s.

A aplicação de vácuo parcial se deu em regiões de 300 X 400 mm², através da utilização de uma câmara vedada com janela de vidro curva e uma bomba de vácuo. A aplicação foi iniciada a partir de pressões negativas de 400 mmHg (aproximadamente -53,3 kPa, pressão manométrica) e aplicando-se diferenças de pressão da ordem de 50 mmHg (aproximadamente 6,7 kPa) para o duto C, e 150 mmHg (aproximadamente 20 kPa) para o duto D. Os valores das diferenças de pressão foram encontrados experimentalmente de forma a melhor evidenciar as falhas de adesão em cada duto. A câmara de vácuo utilizada pode ser vista instalada sobre o duto na Figura 5.3.



Figura 5.3 – Câmara de vácuo montada sobre o duto C.

5.3.3 Iluminação

Visando aumentar a área a ser inspecionada por imagem, foi especificado um laser de maior potência. Para o cálculo da potência necessária, foi considerada uma área de 500 X 500 mm², que equivale a uma cobertura de metade da circunferência do duto. Pela definição de candela, uma fonte de luz com intensidade luminosa de 1 cd é equivalente a uma fonte luminosa de (1/683) W de potência emitida em um ângulo de 1 sr, para um comprimento de onda de 550 nm. Sendo assim, a intensidade luminosa do laser na direção do feixe pode ser calculada pela Equação 5.1. [9]

$$I_L = \frac{\frac{P_L}{\omega_L}}{\left(\frac{1}{683}\right) W/sr} cd \quad (5.1)$$

O fluxo luminoso é a intensidade luminosa multiplicada pelo ângulo espacial do feixe (Equação 5.2).

$$\phi_L = I_L \cdot \omega_L = \frac{P_L}{\left(\frac{1}{683}\right) W/sr} cd \quad (5.2)$$

E finalmente, o iluminamento da superfície, que é o fluxo luminoso por unidade de área, é dado pela Equação 5.3.

$$E = \frac{\phi_L}{S} = \frac{\frac{P_L}{\left(\frac{1}{683}\right)W/sr} cd}{S} \quad (5.3)$$

Logo, para se obter 500 lux de iluminamento numa superfície de 500 X 500 mm², o laser deverá ter a potência indicada na Equação 5.4.

$$\frac{\frac{P_L}{\left(\frac{1}{683}\right)W/sr} cd}{S} = \frac{\frac{P_L}{\left(\frac{1}{683}\right)W/sr} cd}{(500mm)^2} \geq 500lux \quad (5.4)$$

$$P_L \geq 183mW$$

Foi encontrado no mercado um laser diodo com potência de 200 mW e comprimento de onda de 670 nm. Infelizmente os testes iniciais com este laser não foram bem sucedidos devido à potência luminosa real estar aquém da especificação e à falta de coerência espacial do laser, o que diminuiu bastante a qualidade das franjas obtidas. Por isso o laser foi substituído por um laser de He-Ne de 10 mW de potência disponível no laboratório, o que limitou a área de inspeção a um diâmetro de 250 mm com um iluminamento de aproximadamente 139 lux. Para o sistema em campo deverá ser encontrada uma solução que apresente maior potência luminosa sem perda da coerência espacial e temporal do laser, até porque o sistema estará sujeito à interferência da iluminação natural do ambiente.

5.3.4 Cabeçote de medição

Foi novamente empregada a configuração do interferômetro de *Michelson*. Entretanto, foi projetado um cabeçote de medição específico para esta aplicação, alojando a câmera selecionada e os componentes do interferômetro.

As vantagens do cabeçote atual em relação ao anterior são:

- Menores dimensões, aproximadamente 120 X 100 X 160 mm³;
- Melhor portabilidade, sendo fixado em um tripé facilitando a montagem;

- Acoplamento específico para a câmera utilizada;
- Parafusos para regulagem do *shearing* horizontal e vertical externamente;

O cabeçote de medição e suas partes podem ser vistos na Figura 5.4.

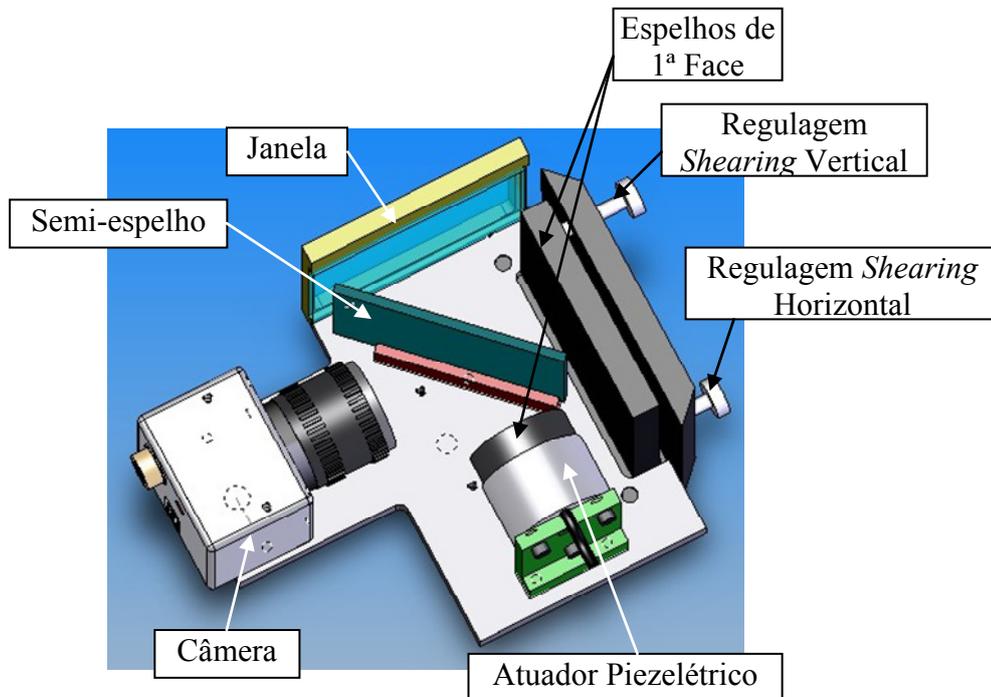


Figura 5.4 – Cabeçote de medição.

5.3.5 Deslocamento de Fase

Para realizar o deslocamento de fase, foi adquirido um atuador piezelétrico (Figura 5.5) para deslocar nanometricamente o espelho do interferômetro e gerar o deslocamento de fase, acoplado ao cabeçote de medição. O atuador piezelétrico escolhido é próprio para aplicações ópticas e possui um deslocamento máximo de 6 μm quando excitado com uma tensão de 1000 V (máxima), obtendo-se uma sensibilidade de 6 nm/V, que por ser bastante baixa confere uma ótima resolução ao atuador piezelétrico e portanto uma melhor qualidade das imagens adquiridas pela técnica de deslocamento de fase. [6]



Figura 5.5 – Atuador piezelétrico.

O atuador piezelétrico é alimentado por um amplificador de tensão capaz de fornecer de -30 V a +150 V na saída para uma entrada de -5 V a +5 V que é alimentada por uma placa de conversão digital-analógica instalada no microcomputador que realiza a aquisição de imagens. Apesar de não cobrir a tensão máxima do atuador piezelétrico, a tensão de 150 V gerada é capaz de gerar um deslocamento do espelho de 900 nm, o que equivale a aproximadamente 484° considerando o comprimento de onda do laser de 670 nm. Como a técnica de deslocamento de fase necessita de uma variação de fase máxima de 270° , o conjunto amplificador de tensão e atuador piezelétrico escolhido é o que apresenta a melhor resolução sem comprometer a faixa de deslocamento necessária.

5.3.6 Aquisição e Tratamento das Imagens

Para aumentar a capacidade do sistema em detectar pequenas falhas de adesão, adquiriu-se uma câmera de alta resolução, capaz de capturar imagens com 1600 X 1200 *pixels*. Além da maior resolução, a câmera apresenta dimensões menores: 50 X 40 X 50 mm³, e encaixe para lentes do tipo “C-Mount”, que utiliza lentes menores que as convencionais, diminuindo o tamanho total do cabeçote de medição.

Além disso, a câmera utiliza uma interface digital IEEE-1394 (*firewire*) já presente no microcomputador utilizado, eliminando a necessidade de uma placa de captura e aumentando a qualidade das imagens capturadas, pois o sinal é transmitido digitalmente desde a câmera até o microcomputador.

O software utilizado para a visualização dos mapas de fase pode basicamente executar as seguintes funções:

- Filtro de fase 3 X 3 ou 7 X 7 para diminuir os ruídos da imagem;

- Animação das franjas acrescentando uma fase constante em toda a imagem e variável com o tempo;
- Remoção dos saltos de fase;
- Remoção da deformação média da imagem, através da escolha manual de uma rampa equivalente às franjas de fundo que é subtraída da imagem.

5.4 Procedimento de medição utilizado

5.4.1 Preparativos iniciais

1. Iluminação da área a ser inspecionada, posicionando o tripé e a direção do laser;
2. Ajuste do tripé e do cabeçote de medição para visualizar a área iluminada. O tripé permaneceu a distâncias entre 0,7 e 1,2 m da superfície do duto;
3. Alinhamento do interferômetro, ajustando o tamanho do *shearing* desejado, no caso 25 mm;
4. Instalação interna do atuador hidráulico, perpendicularmente à normal da superfície a ser inspecionada;
5. Execução dos três carregamentos em seqüência, sem alterar os outros parâmetros para garantir a homogeneidade dos testes;

5.4.2 Inspeção utilizando carregamento mecânico

1. Aquisição do primeiro mapa de fases;
2. Aplicação de pressão no atuador hidráulico P_h ;
3. Aquisição do segundo mapa de fases;
4. Alívio da pressão no atuador hidráulico;

5.4.3 Inspeção utilizando carregamento térmico

1. Aquecimento com lâmpada de 1000 W por período inicial t_1 ;
2. Espera por tempo t_2 para a completa transferência de calor por condução;
3. Aquisição do primeiro mapa de fases;

4. Espera de tempo t_3 para resfriamento do duto;
5. Aquisição do segundo mapa de fases;

5.4.4 Inspeção utilizando carregamento a vácuo

1. Instalação da câmara de vácuo;
2. Aplicação da pressão manométrica inicial P_{Vi} ;
3. Aquisição do primeiro mapa de fases;
4. Aplicação da pressão manométrica final P_{Vf} ;
5. Aquisição do segundo mapa de fases;
6. Alívio da pressão de vácuo e desinstalação da câmara;

5.4.5 Procedimentos finais

1. Filtragem dos mapas de variação de fase obtidos através do software;
2. Remoção da deformação média no mapa de variação de fase obtido através do carregamento mecânico;
3. Salvamento das imagens obtidas e análise visual dos resultados.

5.5 Resultados obtidos

5.5.1 Duto C (revestimento anticorrosão)

Devido à menor espessura do revestimento, as falhas de adesão neste duto foram mais facilmente detectadas. Neste duto existem duas falhas de adesão, que serão descritas a seguir.

A primeira falha de adesão encontrada está localizada na borda superior do revestimento e possui dimensões de 110 X 304 mm², dentre os quais apenas 263 mm de altura estão efetivamente na parte revestida e o restante está na parte que possui apenas a primeira camada de revestimento. Através de todas as três formas de carregamento foi possível detectá-la. As imagens obtidas podem ser vistas na Figura 5.6 e os parâmetros utilizados na Tabela 5.1.

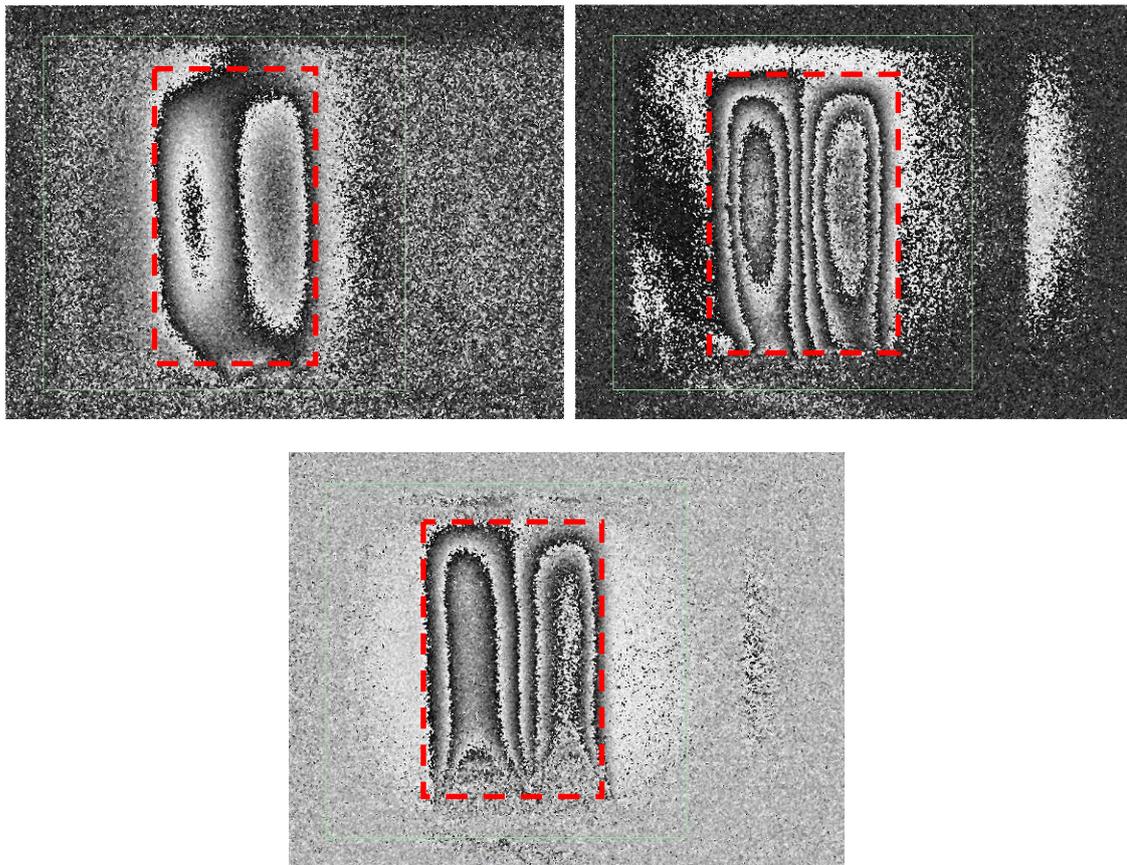


Figura 5.6 – Falha de adesão 1 no duto C. (a) Carregamento mecânico. (b) Carregamento térmico. (c) Carregamento a vácuo.

t_1	10 s
t_2	0 s
t_3	7 s
P_{Vi}	-450 mmHg (-60,0 kPa)
P_{Vf}	-400 mmHg (-53,3 kPa)
P_h	500 kPa

Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados para a falha de adesão 1 no duto C.

A segunda falha de adesão foi encontrada no lado diametralmente oposto à primeira falha e mais próxima ao centro do revestimento, com dimensões de 107 X 107 mm². Também esta falha foi evidenciada através das três formas de aplicação de carga, como pode ser visto na Figura 5.7. Os parâmetros do ensaio estão na Tabela 5.2.

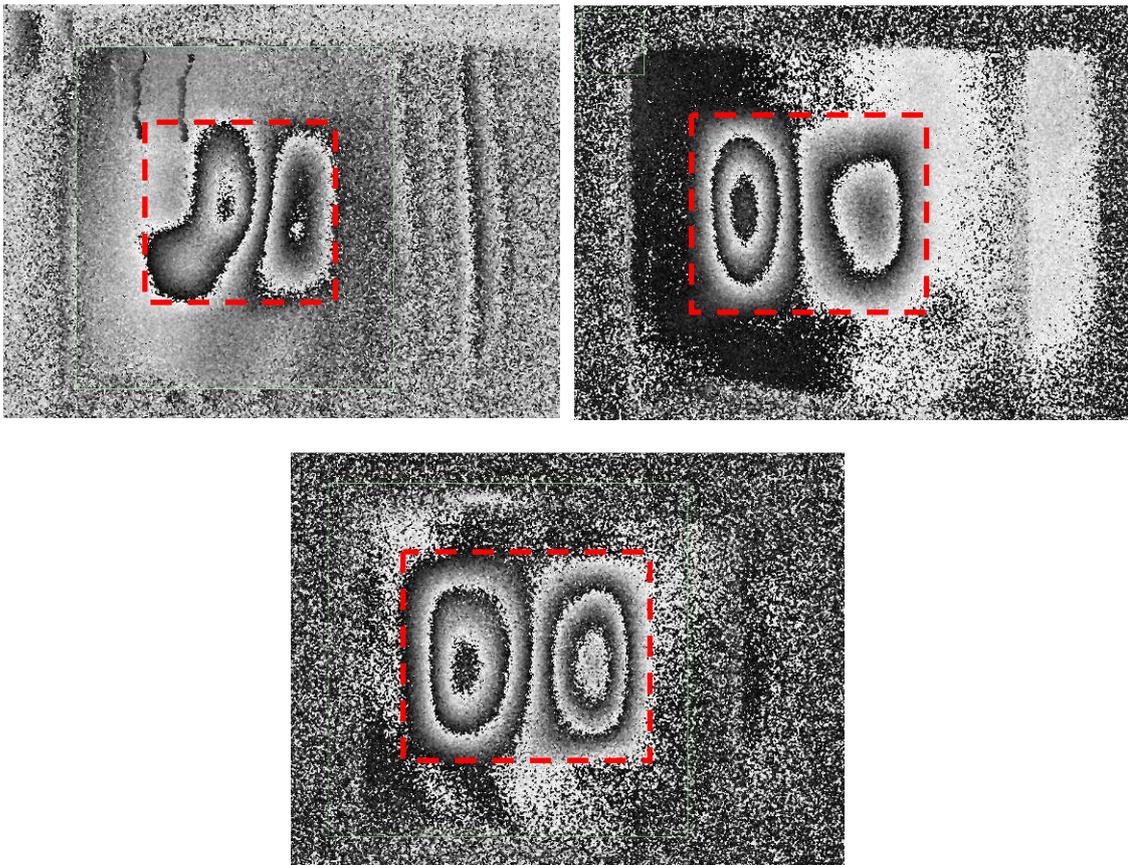


Figura 5.7 – Falha de adesão 2 no duto C. (a) Carregamento mecânico. (b) Carregamento térmico. (c) Carregamento a vácuo.

t_1	10 s
t_2	0 s
t_3	7 s
P_{Vi}	-400 mmHg (-53,3 kPa)
P_{Vf}	-350 mmHg (-46,7 kPa)
P_h	500 kPa

Tabela 5.2 – Parâmetros utilizados para a falha de adesão 2 no duto C.

5.5.2 Duto D (revestimento estrutural)

No duto D foram encontradas quatro falhas de adesão, sendo que três delas provocadas por folhas de polietileno e uma provocada por plástico bolha.

Neste duto foi mais difícil detectar falhas de adesão devido à maior espessura do revestimento. A primeira falha foi encontrada na parte central do revestimento, com dimensões de 107 X 107 mm². Esta falha não apareceu claramente através de nenhuma das formas de carregamento utilizadas, já que

está localizada entre o duto e a primeira camada do revestimento. Apenas pôde ser detectada com certa dificuldade através do carregamento mecânico e no carregamento a vácuo, conforme a Figura 5.8. Os parâmetros utilizados no ensaio podem ser encontrados na Tabela 5.3.

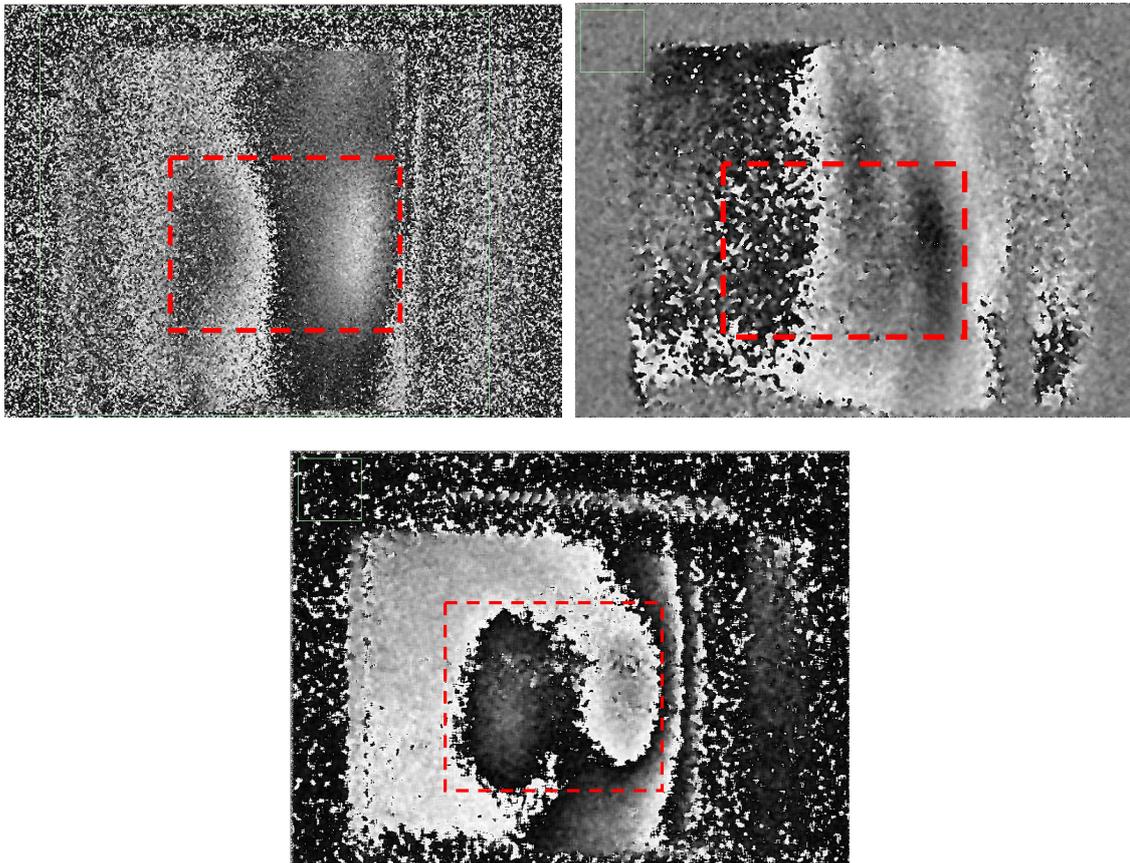


Figura 5.8 – Falha de adesão 1 no duto D. (a) Carregamento mecânico. (b) Carregamento térmico. (c) Carregamento a vácuo.

t_1	3 min
t_2	8 min
t_3	7 s
P_{Vi}	-600 mmHg (-80,0 kPa)
P_{Vf}	-500 mmHg (-66,7 kPa)
P_h	500 kPa

Tabela 5.3 – Parâmetros utilizados para a falha de adesão 1 no duto D.

A segunda falha de adesão encontrada também possui dimensões de 107 X 107 mm², e foi encontrada à 90° à esquerda da primeira. Devido à localização da falha entre a décima terceira e a décima quarta camadas do revestimento, sua detecção foi mais clara que a da primeira falha. O

carregamento térmico apresentou dificuldade na delimitação da falha, mas foi capaz de acusar a sua presença. Com o carregamento mecânico foram obtidas franjas mais claras mostrando a falha, e finalmente com o carregamento a vácuo detectou-se com a maior clareza a falha, conforme pode ser visto na Figura 5.9, sendo os parâmetros utilizados mostrados na Tabela 5.4.

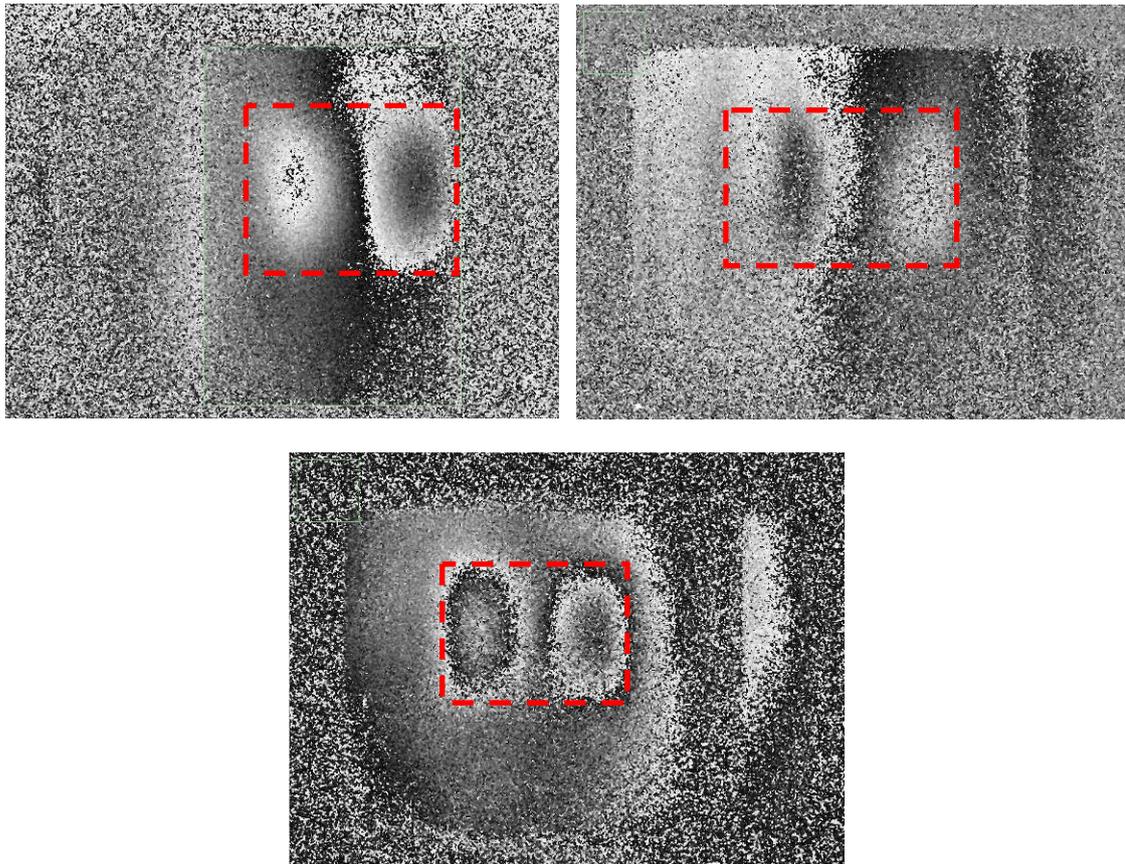


Figura 5.9 – Falha de adesão 2 no duto D. (a) Carregamento mecânico. (b) Carregamento térmico. (c) Carregamento a vácuo.

t_1	2 min
t_2	6 min
t_3	7 s
P_{Vi}	-450 mmHg (-60,0 kPa)
P_{Vf}	-400 mmHg (-53,3 kPa)
P_h	400 kPa

Tabela 5.4 – Parâmetros utilizados para a falha de adesão 2 no duto D.

A terceira falha de adesão foi provocada pela inserção do plástico bolha, à 90° à direita da primeira, e que se deu também entre a décima terceira e a décima quarta camadas do revestimento. Todos os três métodos de

carregamento conseguiram detectar a falha, embora o carregamento a vácuo tenha modificado um pouco os limites externos da falha. A Figura 5.10 mostra os resultados obtidos com todas as formas de carregamento utilizando os parâmetros da Tabela 5.5.

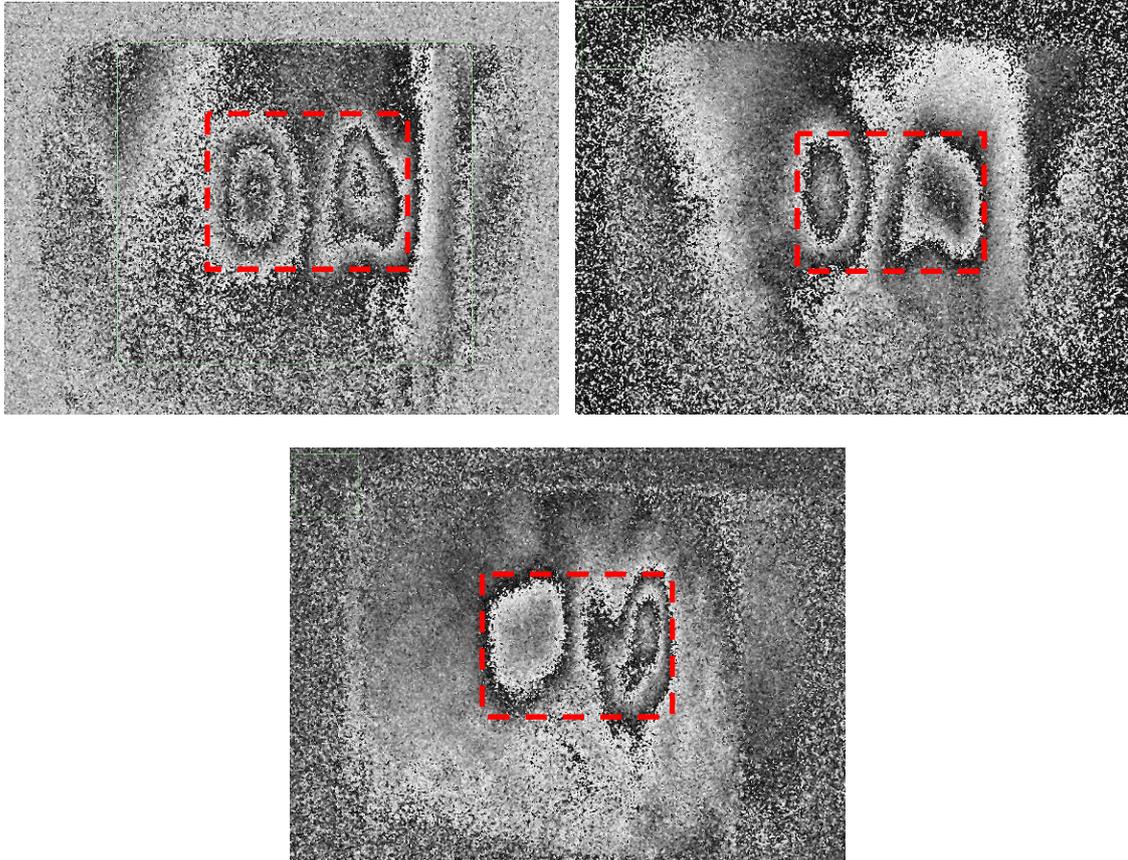


Figura 5.10 – Falha de adesão 3 no duto D. (a) Carregamento mecânico. (b) Carregamento térmico. (c) Carregamento a vácuo.

t_1	2 min
t_2	6 min
t_3	7 s
P_{Vi}	-450 mmHg (-60,0 kPa)
P_{Vf}	-400 mmHg (-53,3 kPa)
P_h	400 kPa

Tabela 5.5 – Parâmetros utilizados para a falha de adesão 3 no duto D.

Finalmente, a quarta falha de adesão foi encontrada diametralmente oposta à primeira, próximo à borda superior do revestimento, com dimensões de 110 X 304 mm². Esta falha encontra-se entre a superfície do duto e a primeira camada da manta. Devido ao maior tamanho desta falha, sua detecção

foi possível com todas as formas de carregamento, conforme pode ser visto na Figura 5.11, e com definição bastante clara com o carregamento a vácuo, com os parâmetros mostrados na Tabela 5.6.

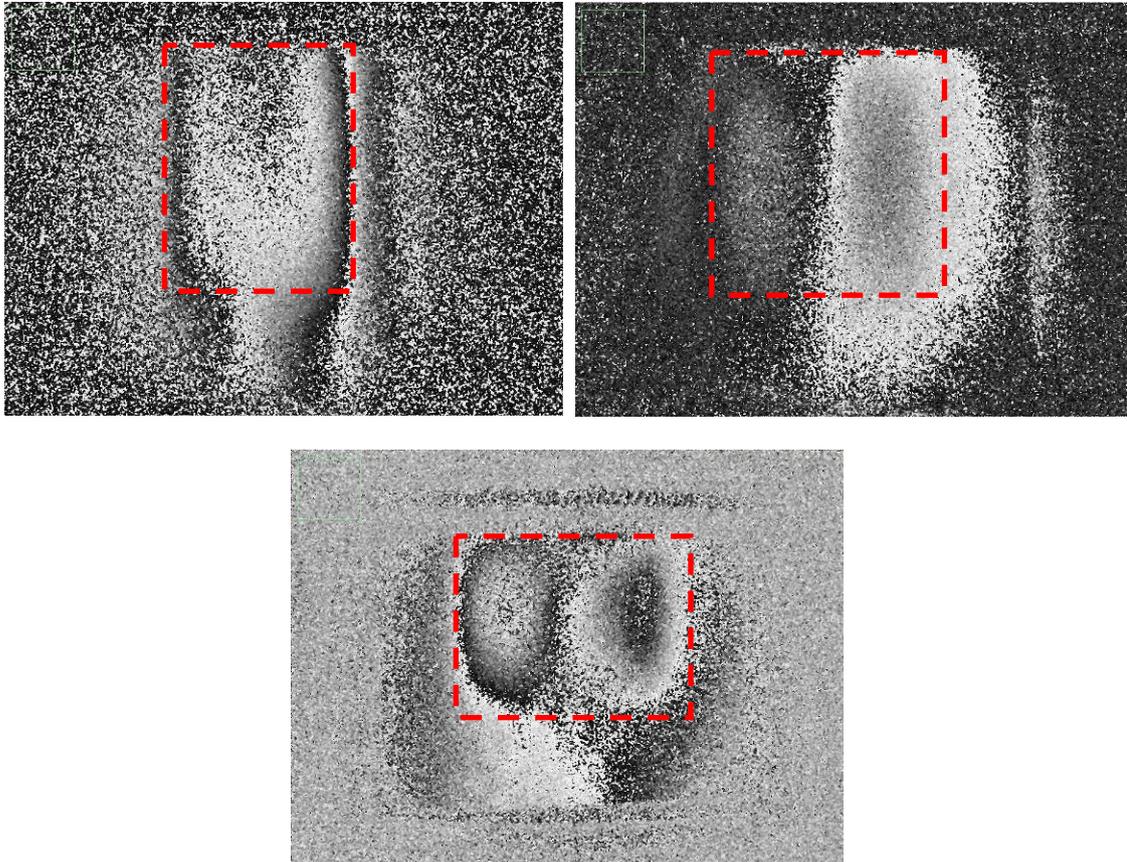


Figura 5.11 – Falha de adesão 4 no duto D. (a) Carregamento mecânico. (b) Carregamento térmico. (c) Carregamento a vácuo.

t_1	3,5 min
t_2	8 min
t_3	8 s
P_{Vi}	-500 mmHg (-66,7 kPa)
P_{Vf}	-400 mmHg (-53,3 kPa)
P_h	500 kPa

Tabela 5.6 – Parâmetros utilizados para a falha de adesão 4 no duto D.

5.6 Conclusões do protótipo final

5.6.1 Formas de carregamento

Todas as formas de carregamento utilizadas mostraram-se capazes de detectar as falhas de adesão em diferentes condições, apesar das diferentes qualidades visuais obtidas.

O carregamento mecânico em questão só pode ser utilizado em dutos abertos, o que definitivamente inviabiliza a sua utilização em campo. Uma alternativa seria uma carga de compressão diametral de fora para dentro do duto. Tal carga, entretanto, poderia levar a danos na superfície do revestimento, além do fato de não estar sendo aplicada diretamente na região sendo analisada.

O carregamento térmico mostrou-se operacionalmente simples, especialmente fora do ambiente de laboratório e pode ser considerado como a melhor forma para revestimentos de pequena espessura, desde que não existam fortes correntes de ar agindo sobre a superfície do duto.

Por fim, a aplicação de vácuo apresentou melhores resultados na detecção das falhas de adesão em ambos os casos (revestimentos de 4 mm e 26 mm). Embora seja mais trabalhosa que as outras técnicas de aplicação de carga, é viável a sua utilização em campo.

5.6.2 Corpo de prova C

Neste corpo de prova as falhas de adesão artificialmente criadas foram claramente delimitadas por todos os métodos de carregamento. As diferenças entre as dimensões fornecidas e as detectadas pelo sistema foram da ordem de no máximo 2 a 3 cm.

Neste caso o sistema é totalmente viável para a detecção de falhas de adesão, qualquer que seja o método de carregamento.

5.6.3 Corpo de prova D

Devido à maior espessura da manta, a detecção das falhas de adesão neste corpo de prova revelou-se mais difícil. Os melhores resultados obtidos

foram através das técnicas de aplicação de vácuo e carregamento mecânico, porém esta última é contra-indicada para uso em campo, ficando a primeira como forma recomendada de aplicação de carga.

A aplicação de carga por aquecimento mostrou-se bastante antiquada neste caso, pois além de apresentar menor qualidade na detecção das falhas de adesão, ainda exigia um tempo bem maior (da ordem de 6 a 10 min) para que o calor pudesse atingir as camadas mais internas do revestimento. Dessa forma o aquecimento é contra indicado para revestimentos mais espessos.

5.6.4 Desempenho do sistema desenvolvido

A utilização da técnica de deslocamento de fase trouxe grandes avanços na qualidade das imagens obtidas, assim como a animação criada pelo *software* adicionando uma fase constante em toda a imagem e variável no tempo. Isto possibilitou a visualização clara das descontinuidades que representam as falhas de adesão do revestimento.

A utilização de tripés para o cabeçote de medição e para o laser cumpriu seu papel, apresentando flexibilidade suficiente para permitir a fácil varredura de toda a superfície do revestimento. Porém o dimensionamento do cabeçote de medição não permitiu o aproveitamento de todo o campo de visão oferecido pela lente da câmera, diminuindo um pouco o campo de visão efetivo.

Embora a potência do laser diodo adquirido para o sistema fosse elevada, a sua coerência espacial limitada prejudicou drasticamente a qualidade das franjas, sendo que um laser de He-Ne de apenas 10 mW mostrou-se bastante superior para a aplicação. Para aplicações em campo deve ser utilizado um laser de maior potência que possua coerência espacial suficiente a fim de sobrepor os efeitos da iluminação ambiente.

Capítulo 6

Conclusões

O trabalho mostrou o desenvolvimento de um sistema para a detecção de falhas de adesão em revestimentos compostos utilizados na indústria do petróleo aplicando-se a técnica de *shearography*. Será mostrada a seguir uma síntese das conclusões ao longo do texto e as perspectivas futuras em relação ao sistema e as técnicas utilizadas.

6.1 Desempenho operacional

6.1.1 Protótipo preliminar

Apesar das limitações do protótipo preliminar, foi possível detectar as falhas de adesão artificiais com clareza. Este protótipo permitiu um bom aprendizado da técnica de *shearography* e trouxe várias considerações para o protótipo final que não seriam feitas sem esta fase:

- Aplicação de carga no duto por outros métodos que sejam viáveis e práticos em campo;
- Capacidade de investigação de uma área maior, para minimizar o tempo total de inspeção do duto;
- Uso de câmera com maior resolução e laser mais potente para maior qualidade das imagens;

- Desenvolvimento de um cabeçote de medição mais compacto e portátil que possibilite medições na parte central do revestimento.

Além disso, o protótipo cumpriu a sua função de utilizar apenas componentes disponíveis no laboratório minimizando o custo inicial do projeto. Os resultados obtidos superaram as expectativas iniciais e levaram a um desafio maior no protótipo final, incluindo mantas de maior espessura e falhas de adesão de menores dimensões.

6.1.2 Protótipo final

Com este protótipo, todas as três formas de carregamento utilizadas mostraram-se capazes de detectar as falhas de adesão em diferentes condições, apesar das diferentes qualidades visuais obtidas.

O carregamento mecânico apresentou ótimos resultados, entretanto só pode ser utilizado em dutos abertos, o que definitivamente inviabiliza a sua utilização em campo.

O carregamento térmico mostrou-se operacionalmente simples, especialmente fora do ambiente de laboratório e pode ser considerado como a melhor forma para revestimentos de pequena espessura, desde que não existam fortes correntes de ar agindo sobre a superfície do duto. Porém a qualidade das imagens ficou aquém da obtida com os outros métodos.

Por fim, a aplicação de vácuo apresentou os melhores resultados na detecção das falhas de adesão em ambos os casos (revestimentos de 4 mm e 26 mm). Embora seja mais trabalhosa que as outras técnicas de aplicação de carga, é viável a sua utilização em campo.

A qualidade das imagens e a visualização das discontinuidades nas franjas foram bastante melhoradas pelas técnicas aplicadas, como o deslocamento de fase e a animação com adição de fase constante em toda a imagem e variável com o tempo.

O laser diodo adquirido não cumpriu os requisitos de potência e coerência espacial exigidos pelo sistema, forçando a utilização de um laser de menor potência, porém de maior coerência espacial, comprometendo a área de inspeção.

Novamente os resultados superaram as expectativas, pois todas as falhas de adesão puderam ser detectadas, mesmo as localizadas sob um revestimento bastante espesso. A técnica de aplicação de vácuo, que no início foi vista com algumas ressalvas, acabou mostrando-se a melhor opção para aplicação de carga, com uma qualidade muito boa das imagens e uma portabilidade razoavelmente grande.

Apesar da simplicidade, a utilização de tripés para a iluminação e o cabeçote de medição mostrou excelentes resultados, até melhores do que os resultados obtidos com o sistema fixado ao duto como no primeiro protótipo com uma maior portabilidade.

O sistema é considerado um sucesso e está adequado para o início da próxima fase, que consiste no desenvolvimento do sistema para uso em campo, do qual não se esperam muitas modificações a partir do sistema atual.

6.2 Perspectivas futuras

A primeira melhoria a ser feita no sistema é a adição de um laser potente e com coerência espacial suficientemente grande. O preço dos produtos encontrados no mercado é geralmente alto para este tipo de laser, e uma grande parte deles possui dimensões excessivamente grandes para este sistema. Uma das alternativas viáveis para este sistema é a utilização de vários diodos laser, cada um deles iluminando uma área menor, o que pode ser feito sem problemas [1], porém necessita o desenvolvimento de um sistema de iluminação específico para este projeto. Outra linha de trabalho é a utilização de laser com comprimento de onda na faixa do infravermelho, pois existem mais opções no mercado com esta característica e alta potência, porém cria-se o risco adicional de lidar-se com um laser de alta potência e invisível ao olho humano, e cuidados adicionais devem ser criados na utilização do sistema.

O cabeçote de medição deve ser redimensionado para o campo visual oferecido pela lente da câmera, ou então utilizada uma lente com menor campo visual (maior comprimento focal) sob a pena de se necessitar de uma distância maior ao duto para poder abranger toda a área desejada.

Para atingir um maior nível de automação do sistema, poderá ser desenvolvido o software para interpretação das franjas e indicação automática

das áreas das falhas de adesão sobre a imagem em tempo real do duto. Além disso, o software poderia encarregar-se de efetuar a otimização dos parâmetros de medição como, por exemplo, a carga aplicada sobre o duto.

Pretende-se sempre melhorar cada vez mais a qualidade das imagens obtidas, para a detecção de falhas de adesão cada vez menores e em camadas mais profundas do revestimento, assim como um estudo sobre a confiabilidade das inspeções realizadas para se conhecer o percentual de sucesso das mesmas.

Outra sugestão de melhoria é a implementação do acompanhamento da falha de adesão com o tempo, que pode ser útil em casos onde o reparo não pode ser imediatamente realizado.

Em breve o sistema será testado pela primeira vez em campo. O teste será feito numa plataforma *offshore* de produção de petróleo, onde está presente um nível bastante alto de interferências externas que permitirá avaliar a robustez do sistema em campo. A partir deste teste será iniciado o projeto do sistema final para uso em campo.

Referências Bibliográficas

- [1] STEINCHEN W.; YANG L.; “Digital Shearography – Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry”, The International Society for Optical Engineering, SPIE Press, Washington, USA, 2003.
- [2] HECHT E.; ZAJAC A.; “Optics”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, Philippines, 1974.
- [3] GASVIK K. J.; “Optical Metrology”, John Wiley & Sons Ltd, England, 1995.
- [4] SCHIEL F.; “Introdução à resistência dos materiais”, Harbra, São Paulo, 1984.
- [5] BANKS B.; OLDFIELD G. E.; RAWDING H.; “Ultrasonic Flaw Detection in Metals”, Prentice-Hall Inc, USA, 1962.
- [6] Site da Piezomechanik. <http://www.piezomechanik.com>. 01/06/2004.
- [7] TEITSMA A.; “Gas-Coupled Ultrasonic Inspection of Pipelines”. Pipeline & Gas Journal. August 2003.
- [8] WILLEMANN D. P.; “Desenvolvimento de uma Roseta Óptica para Medição de Tensões e Deformações utilizando Holografia Eletrônica”. Dissertação de Mestrado. UFSC. 2002.
- [9] Site MySpace – Artigos e Informações Técnicas. <http://myspace.eng.br>. 20/05/2004.

- [10] Pipeline & Gas Journal. “Key Topics: What’s Best Coating in Ultra Deep Water and in the Field”. October 2004.
- [11] Site da Corrosion Doctors. <http://www.corrosion-doctors.org>. 05/06/2005.
- [12] FONTANA M. G.; “Corrosion Engineering”, McGraw-Hill, 3rd edition, New York, USA 1986.
- [13] GENTIL V.; “Corrosão”, LTC, 3^a edição, Rio de Janeiro, 1996.
- [14] Site da RUST Engenharia. <http://www.rust.com.br>. 29/07/2005.
- [15] Site da Clock Spring Company LP. <http://www.clockspring.com>. 29/07/2005.
- [16] Site da Neptune Research Inc. <http://www.synthoglass.com>. 29/07/2005.
- [17] Site da Petrobras Petróleo Brasileiro S.A. <http://www.petrobras.com.br>. 31/07/2005.
- [18] Site da Agência Nacional de Petróleo. <http://www.anp.gov.br>. 31/07/2005.
- [19] Ettemeyer AG; “Nondestructive Large Area Testing Using Shearography”. http://www.dantec-ettemeyer.com/pdf/shearography_ndt_01_02.pdf. 13/08/2003.
- [20] FINDEIS D. M.; GRYZAGORIDIS J.; “Evaluation of Material Defects Detected Using ESPI and Shearography”. <http://www.ndt.uct.ac.za/Papers/ppv97.pdf>. 14/08/2003.
- [21] FINDEIS D. M.; GRYZAGORIDIS J.; “Optical Non Destructive Testing Methods Using Continuous Wave, Pulsed or Diode Type Lasers”. <http://www.arofe.army.mil/Conferences/NDE-workshop/Gryzagoridis2.pdf>. 26/01/2004.

- [22] ANJOS G. V. M.; SYDENSTRICKER T. H. D.; AMICO S. C.; PAREDES R. S. C.; “Proteção de Dutos e Tubulações Industriais Contra Meios Corrosivos Através da Utilização de Revestimentos AL/Polímeros”, 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia – MG, maio de 2003.
- [23] COLLREP J.; MAYER T.; SUN J.; SCHERLING D.; “Shearography Testing on Aerospace CFRP Components and Other Compounds”, NDE2002 National Seminar of ISNT, Chennai - India, dezembro de 2002.
- [24] Site da isi-sys Industrial Speckle Interferometry Systems. <http://www.shearwin.com>. 26/01/2004.
- [25] Site da Laser Shearography (UK) Ltd. <http://www.laser-ndt.co.uk>. 27/01/2004.
- [26] Site da Laser Testing Instruments Ltd. <http://www.lasertesting.co.uk>. 19/04/2004.
- [27] Site da Trilion Quality Systems. <http://www.trilion.com>. 19/04/2004.
- [28] Site da Optonor Optical Testing & Metrology. <http://www.optonor.no>. 26/01/2004.
- [29] Site da Steinbichler Optotechnik. <http://www.steinbichler.de>. 27/01/2004.
- [30] Site do The online Journal of Nondestructive Testing. <http://www.ndt.net>. 27/01/2004.
- [31] RUSSEL S. S.; LANSING M. D.; HORTON C. M.; GNACEK W. J.; “Probability of Detection of Defects in Coatings with Electronic Shearography”, NASA Technical Memorandum 108493, junho de 1995.
- [32] RUSSEL S. S.; HORTON C. M.; “Vacuum Chamber for Shearography Nondestructive Evaluation”, NASA Technical Memorandum 108516, setembro de 1996.