

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
ENGENHARIA MECATRÔNICA

RENATO MACHADO DE SOUZA

AUTOMATIZAÇÃO DE DESLOCAMENTO LATERAL EM UM
INTERFERÔMETRO DE SHEAROGRAFIA

FLORIANÓPOLIS, JULHO 2018

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
ENGENHARIA MECATRÔNICA

RENATO MACHADO DE SOUZA

**AUTOMATIZAÇÃO DE DESLOCAMENTO LATERAL EM UM
INTERFERÔMETRO DE SHEAROGRAFIA**

Trabalho de conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos requisitos para
obtenção do título de engenheiro em
Engenharia Mecatrônica.

Professor Orientador: Dr. Eng. André
Roberto de Sousa.
Coorientador: Dr. Eng. Mauro Eduardo
Benedet

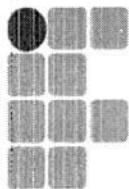
FLORIANÓPOLIS, JULHO 2018.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Souza, Renato Machado de
Automatização de Deslocamento Lateral em um Interferômetro
De Shearografia / Renato Machado de Souza ; orientação
de André Roberto de Sousa; coorientação de Mauro
Eduardo Benedet. - Florianópolis, SC, 2018.
56p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Mecatrônica. Departamento
Acadêmico de Metal Mecânica.
Inclui Referências.

1. Petróleo e Gás. 2. Materiais compósitos. 3. Shearografia.
4. Automatização. I. Sousa, André Roberto
de . II. Benedet, Mauro Eduardo. III. Instituto Federal
de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Metal
Mecânica. IV. Título.



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **RENATO MACHADO DE SOUZA**, matrícula nº **142004734-5**, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **AUTOMATIZAÇÃO DE DESLOCAMENTO LATERAL EM UM INTERFERÔMETRO DE SHEAROGRAFIA**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 04 de Julho de 19.

Prof. Orientador do TCC: André Roberto de Souza

AUTOMATIZAÇÃO DE DESLOCAMENTO LATERAL EM UM INTERFERÔMETRO DE SHEAROGRAFIA

RENATO MACHADO DE SOUZA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro em Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, de Julho de 2018.

Banca Examinadora:

André Roberto de Sousa, Dr. Eng.

Mauro Eduardo Benedet, Dr. Eng.

Valdir Noll, Dr. Eng.

Cynthia Beatriz Scheffer Dutra, Dra. Eng.

RESUMO

Materiais compósitos vem sendo empregados com crescente frequência na indústria de petróleo e gás, como revestimentos de estruturas, tanques e tubulações. A aplicação destes revestimentos visa prolongar a vida útil destas estruturas sem substituição das partes degradadas, além de proporcionar economia de recursos financeiros, uma vez que na maioria dos casos o revestimento pode ser aplicado *in loco* não sendo necessário interromper a produção. No entanto, estes revestimentos são sujeitos a apresentar defeitos, e em caso de falhas podem causar prejuízos financeiros, danos imensuráveis ao meio ambiente e à vida humana. Desta forma, é desejável que estes materiais sejam inspecionados periodicamente durante sua vida útil, surgindo assim uma demanda para inspeções de grandes áreas revestidas por materiais compósitos. Dentre as técnicas mais utilizadas, a shearografia tem apresentado resultados promissores para detecção de defeitos como falhas de adesão, delaminações, porosidades, bolhas entre outros.

Esta técnica interferométrica utiliza um espelho inclinável em sua configuração óptica, cuja inclinação pode ser ajustada pelo operador no decorrer da inspeção. Na inspeção de grandes áreas, em que o dispositivo de medição está em operação fora do alcance do operador, é necessário que a inclinação do espelho do interferômetro seja realizada de forma remota. Este trabalho apresenta a automatização de um cabeçote de medição por shearografia modelo “N4F” desenvolvido pelo Labmetro/UFSC, possibilitando a inclinação do referido espelho remotamente via software.

Palavras-chave: Petróleo e gás, materiais compósitos, shearografia, automatização

ABSTRACT

In last years, the use of composite materials in oil and gas industry has increased. These material have being used as coating for tanks and vessels sidewalls for corrosion protection and structural reinforcement. However, it is necessary to assure integrity of the material along its life cycle and avoid accidents that are very dangerous and costly in oil and gas industry.

The inspection by shearografia is a non-destructive technique that uses laser interferometry to identify defects in composite materials, such as bounding failures, and delamination. As the classic shearografia optic configuration, a tiltable mirror is used, and its inclination may be adjusted by the operator during the inspection process. Through large inspection areas, that the access to the equipment is difficult, the inclination must be done remotely. This project aims to automate a shearografia equipment model "N4F" developed by Labmetro/UFSC, in order to apply a mirror inclination remotely.

Keywords: Oil and gas, shearografia, composite materials, automation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicação de materiais compósitos na indústria de P&G	21
Figura 2 – Delaminação em material compósito	23
Figura 3 – Configuração óptica shearografia	25
Figura 4 – Efeito <i>speckle</i> em folha de papel.....	26
Figura 5 – Princípio de Huygens	27
Figura 6 – Método dos 5 passos para shearografia.....	28
Figura 7 – Módulos de equipamento clássico de shearografia.....	28
Figura 8 – Carregamento mecânico.....	29
Figura 9 – Carregamento por vácuo	29
Figura 10 – Carregamento vibracional	29
Figura 11 – Carregamento térmico.....	30
Figura 12 – Aplicação de carregamento térmico em laboratório	31
Figura 13 – Sistema de shearografia para inspeção de grandes áreas	32
Figura 14 – Corpo de prova para inspeção de grandes áreas verticais.....	32
Figura 15 – Cabeçote de medição por shearografia modelo N4F	35
Figura 16 – Interior cabeçote N4F.....	35
Figura 17 – Servomotor utilizado.....	38
Figura 18 – Esquemático comando servomotores.....	39
Figura 19 – Painel de comando dos servomotores	40
Figura 20 – Programação em LabVIEW	40
Figura 21 – Flange projetada para impressão 3D.....	41
Figura 22 – Encaixe dos servomotores na flange e cabeçote	41
Figura 23 – Painel de comando para aplicação de deslocamento lateral.....	42
Figura 24 – Software utilizado para medições nas imagem da câmera.....	43
Figura 25 – Experimento com incrementos de 15 em 15 graus (deslocamento vertical).....	44
Figura 26 – Experimento com incrementos de 15 em 15 graus (deslocamento horizontal) ...	45
Figura 27 – Sequência para determinação de histerese	46
Figura 28 – Gráficos de histerese	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais compósitos	20
Tabela 2 – Experimento comando servomotor.....	39
Tabela 3 – Experimento histerese deslocamento lateral vertical.....	47
Tabela 4 – Experimento histerese deslocamento lateral horizontal	47
Tabela 5 – Teste de Repetibilidade 115°	50
Tabela 6 – Teste de Repetibilidade 92°	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Justificativa da automatização	17
1.2	Objetivos	18
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos específicos.....	18
1.3	Estrutura do Trabalho.....	18
2	MATERIAIS COMPÓSITOS	19
2.1	Tipos de materiais compósitos	19
2.2	Revestimentos com materiais compósitos.....	20
2.3	Defeitos em materiais compósitos.....	21
2.4	Técnicas de inspeção de materiais compósitos.....	23
3	SHEAROGRAFIA	25
3.1.1	Equipamento clássico de shearografia	28
3.1.2	Carregamentos.....	29
3.2	Inspeção de grandes áreas verticais revestidas por materiais compósitos	31
4	DESENVOLVIMENTO	35
4.1	Detalhamento do equipamento escolhido para automatização	35
4.2	Levantamento de requisitos.....	36
4.3	Propostas de tecnologias para automatização	37
4.4	Detalhamento da concepção escolhida	38
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
	REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente utilização de materiais compósitos para revestimento de tubulações e áreas verticais na indústria de petróleo e gás a fim de reparar e aumentar a vida útil destes materiais (LEVY NETO e PARDINI, 2006), se faz necessário inspecionar estes revestimentos para verificar a existência de falhas de adesão do revestimento aplicado. Os equipamentos disponíveis para inspecionar em campo os revestimentos aplicados necessitam que o operador fique próximo dos dispositivos, sendo eles sujeitos a insalubridades e riscos de morte.

Assim, o foco deste trabalho está na automatização de um modelo de equipamento de medição por shearografia desenvolvido pela UFSC em parceria com a Petrobrás, objetivando o comando remoto da inclinação de um dos espelhos presentes neste dispositivo, além de realizar e validar um protótipo para utilização em campo e laboratório. Desta forma, com a automatização do dispositivo, o operador não mais necessita estar próximo ao equipamento de medição durante todo o processo de medição que se estende por várias horas.

1.1 Justificativa da automatização

Atualmente, no escopo do projeto SHIC - Shearografia para inspeção de compósitos, está sendo testado um sistema de inspeção interferométrico para grandes áreas verticais. Um aparato mecânico dotado de cabeçote de medição por interferometria e demais dispositivos necessários para medição com esta técnica, é acoplado a um sistema robótico movimentado por cabos, que se posiciona em diversos pontos de uma parede revestida por material compósito, simulando um costado de navio, para medição de possíveis defeitos presentes neste tipo de revestimento (SOUZA, 2015)

O sistema interferométrico em questão utiliza um parafuso de precisão para ajuste de inclinação de um dos espelhos do interferômetro. Por se tratar de medições em superfícies/locais de difícil acesso para o operador do sistema, os acionamentos para o interferômetro devem ser feitos remotamente. Desta forma, o objetivo é a automatização do sistema de deslocamento lateral do interferômetro, realização de testes, realização de inspeção, comparações entre sistemas e documentação do sistema desenvolvido.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Aprimoramento e automatização da aplicação de deslocamento lateral de um Interferômetro de shearografia desenvolvido pelo Labmetro – UFSC.

1.2.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral deste trabalho seja alcançado, os objetivos específicos listados a seguir devem ser atingidos:

- Estudar e analisar a tecnologia empregada no interferômetro
- Analisar tecnologias possíveis para automatização do interferômetro
- Adquirir equipamentos necessários para automatização
- Testar e validar sistemas adquiridos (em individual)
- Integrar a mecânica dos sistemas adquiridos
- Testar e validar os sistemas integrados
- Desenvolver *software* de comando
- Documentar testes

1.3 Estrutura do Trabalho

O segundo capítulo aborda os materiais compósitos, seus principais tipos, alguns defeitos mais comuns e técnicas para inspeção destes defeitos.

No terceiro capítulo é apresentada a shearografia, os componentes de seu equipamento clássico, além do uso desta técnica para a medição de grandes áreas revestidas

No quarto capítulo, é realizado o detalhamento do equipamento cuja automatização é o objetivo deste trabalho. São apresentados os requisitos de automatização, soluções para automatização, detalhamento da proposta escolhida, assim como resultados dos experimentos realizados em cada etapa.

O quinto capítulo apresenta as conclusões e considerações finais deste trabalho, seguido pelas referências bibliográficas utilizadas.

2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Pode-se definir material compósito como a combinação de dois ou mais materiais com propriedades diferentes. A combinação destes materiais resulta em um material com propriedades distintas de cada um de seus componentes em individual. (MALLICK, 1997; GAY, HOA e TSAI, 2003)

A utilização de materiais compósitos esteve presente em toda a evolução da humanidade. Muitas vezes se faz necessário combinar propriedades entre materiais utilizados para se conseguir propriedades específicas. Nos tempos atuais, o uso destes materiais é impulsionado principalmente pela indústria automobilística, aeronáutica e de petróleo e gás, em que há uma busca por materiais com propriedades incomuns não alcançada pela simples utilização convencional de ligas metálicas, cerâmicas ou poliméricas. (PANTOJA, 2011)

Os materiais compósitos são formados por duas fases, sendo uma fase contínua denominada de matriz e uma fase dispersa composta pelo restante dos constituintes. A matriz pode ser polimérica, metálica ou cerâmica, sendo mais comum a utilização de matrizes de polímeros. Para compor a fase dispersa, são utilizados materiais em forma de fibras ou partículas, sendo esta a fase responsável pelo reforço do compósito. (MALLICK, 1997; GAY, HOA e TSAI, 2003)

Ao desenvolver um material compósito, as principais características a serem aprimoradas são: resistência mecânica, resistência à corrosão, resistência ao desgaste, resistência à fadiga, resistência à altas temperaturas, redução de massa, isolamento térmico, condutividade térmica e isolamento acústico. Entretanto, algumas características estão em conflito com outras, não sendo possível aprimorar todas as características ao mesmo tempo.

2.1 Tipos de materiais compósitos

Os materiais compósitos podem ser classificados entre fibrosos, laminados e particulados.

A denominação dos materiais fibrosos e particulados está relacionada ao tipo de material utilizado na fase dispersa do compósito. A tabela 1 mostra os materiais comumente utilizados para formar compósitos, classificados por fase e características.

Tabela 1 – Materiais compósitos

Matriz (fase contínua)				Fase dispersa	
Cerâmicas	Metálicas	Poliméricas		Fibras	Particulados
		Termofixas	Termoplásticas		
Cerâmicas vítreas, carbono e carbetos de silício	Alumínio, cobre, magnésio e titânio	Resina epóxi, fenólica e poliuretano	Polipropileno, polietileno e poliamida	Fibras de carbono, aramida e vidro	Carbeto de silício, alumina e negro de fumo

Fonte:(SOUZA, 2015)

Os materiais compósitos laminados são formados a partir da união de dois ou mais materiais compósitos em camadas, assim, de acordo com a aplicação desejada, pode-se combinar e aprimorar as melhores características de cada material em diversas camadas.

2.2 Revestimentos com materiais compósitos

Revestimentos com compósitos são empregados na indústria de petróleo e gás (P&G) principalmente como reforço mecânico e proteção à corrosão. Em geral se utiliza plástico reforçado com fibra de vidro ou carbono, e são aplicados nas mais diferentes estruturas, como: costados de navios, tanques e tubulações.

Além de reduzir os tempos das paradas de manutenção, há uma redução significativa dos custos diretos de troca de estruturas e tubulações, sendo que com aplicação dos revestimentos compósitos, a estrutura degradada recebe um reparo que aumenta sua vida útil por mais alguns anos, sem necessidade de substituir a estrutura. Na figura 1, pode ser visto um revestimento compósito aplicado na indústria de P&G.

Figura 1 – Aplicação de materiais compósitos na indústria de P&G



Fonte: (Rust Engenharia, 2014; SOUZA, 2015)

Como pode ser visto na figura 1, os revestimentos podem ser aplicados no próprio local, o que possibilita não interromper a produção. Embora estes materiais tenham vida útil relativamente extensa; chegando em alguns casos a até vinte anos de durabilidade segundo (Grupo Rust Resinar, 2014); é necessário que a qualidade da adesão destes revestimentos seja acompanhada. Podem surgir defeitos ao longo da operação ou até mesmo um defeito resultante de má aplicação. Assim, foram identificados os principais defeitos que afetam os revestimentos de materiais compósitos, detalhados no item 2.3.

2.3 Defeitos em materiais compósitos

Os compósitos podem apresentar uma grande variedade de defeitos, entre os mais comuns segundo (REZENDE, COSTA e BOTELHO, 2011) são delaminações, porosidade, descontinuidade das fibras, áreas ricas ou pobres em resina e podem ocorrer durante processamento de matéria prima, fabricação, transporte, armazenamento, aplicação e operação. Além disso, os compósitos expostos à temperatura, umidade e radiação podem apresentar degradação.

Os principais defeitos de revestimentos compósitos e suas prováveis causas são apresentados no quadro 1.

Quadro 1 – Tipos de defeitos em compósitos

Tipos	Especificação	Causa Provável
Bolha de ar	Retenção de ar dentro e entre as camadas de reforço.	Processo de fabricação inapropriado.
Delaminações	Falta de aderência entre camadas de compósitos laminados.	Preparação imprópria da superfície, excesso de catalisador, contaminação por materiais externos.
Descolamento	Separação da interface fibra-matriz	Falta de compatibilidade entre materiais ou pressão excessiva.
Fibras desalinhadas, rugosas e onduladas	Desvio da orientação do laminado em relação ao desejado.	Pressão não uniforme na cura, armazenamento inadequado, falta de compatibilidade entre materiais.
Fibras quebradas	Ocorrência de fratura da fibra que constitui o laminado.	Manuseio inapropriado, armazenamento indevido, sobrecarga/impacto.
Fratura	Ruptura da superfície do laminado sem penetração total.	Sobrecarga.
Inchaço	Alteração dimensional.	Absorção de umidade.
Inclusões	Introdução de partículas estranhas entre os laminados.	Limpeza inadequada das interfaces, contaminação da resina ou tecidos.
Lasca	Pequenos pedaços quebrados na superfície ou nas bordas do material.	Manuseio incorreto, impacto.
Porosidade	Bolsões de ar no interior do material.	Distribuição inadequada de pressão, pobre processo de controle.

Fonte:(SOUZA, 2015)

Na figura 2 pode ser visto um defeito de delaminação em material compósito.

Figura 2 – Delaminação em material compósito



Fonte: SOUZA, 2012

Nem todos os defeitos nos compósitos são visíveis à inspeção visual, como o defeito apresentado na figura 2. Devido à relevância e amplitude dos possíveis acidentes na indústria de petróleo e gás, prejuízos no âmbito financeiro, ambiental e à vida humana, é indispensável dispor de métodos capazes de identificar esses defeitos, reduzindo os riscos de ocorrência de acidentes.

2.4 Técnicas de inspeção de materiais compósitos

Entre as diversas técnicas para inspeção de defeitos em materiais compósitos na indústria do petróleo e gás, tem-se preferência por ensaios não destrutivos (END) pois estas técnicas não causam danos ao material que está sendo inspecionado. (VIOTTI e ALBERTAZZI JR., 2014)

Algumas técnicas de END disponíveis para inspecionar defeitos em materiais compósitos são apresentadas e descritas no quadro 2 .

Quadro 2 – Técnicas de inspeção em materiais compósitos

Técnica de inspeção	Descrição
Emissão acústica	Detecção de descontinuidades através de ondas sonoras emitidas por um material em resposta a uma atuação térmica ou mecânica.
Ensaio visual	Ensaio a olho nu ou com auxílio de lupas e câmeras.
<i>Holiday detector</i>	Detecção de porosidades em revestimentos através da geração de faísca de alta tensão.
Holografia Eletrônica	Medição de deslocamento e identificação de anomalias no campo de deslocamentos sobre a área analisada.
Ultrassom	Detecção de descontinuidades internas através da aplicação e reflexão de ondas acústicas no material.
Tomografia computadorizada	Avaliação de diferentes tipos de defeitos em diversos materiais através de radiação.
Shearografia	Detecção de diferentes tipos de defeitos em materiais compósitos através de interferometria.

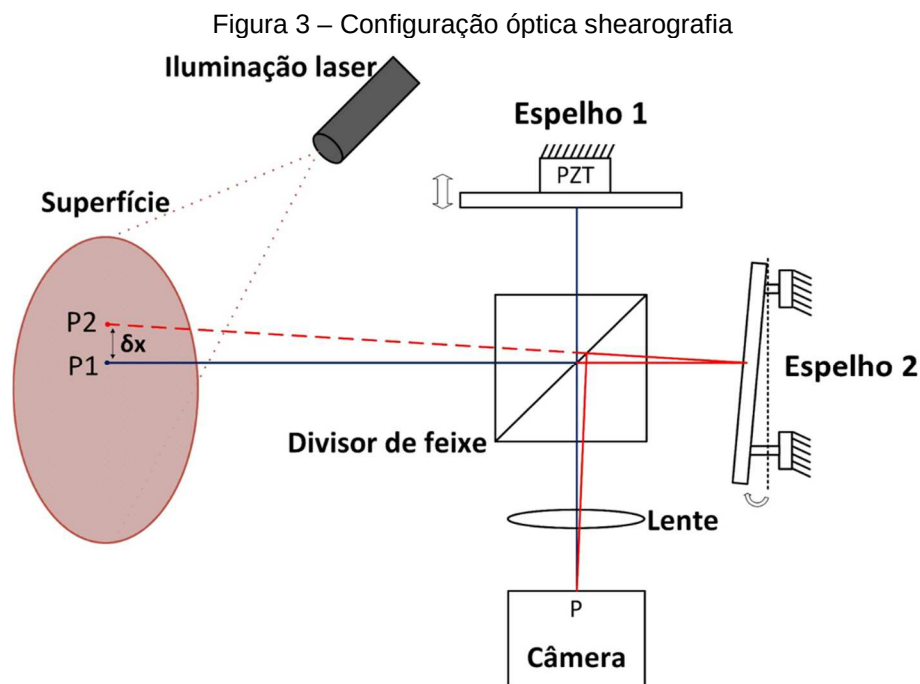
Fonte: Adaptado de (SOUZA,15)

Dentre as técnicas descritas no quadro 2, a shearografia têm sido considerada uma das mais promissoras. Esta técnica que será abordada com maior detalhamento no item 3, é capaz de detectar defeitos em materiais compósitos como falhas de adesão, delaminações, porosidades, bolhas entre outros.

3 SHEAROGRAFIA

Do inglês, *shearography*; em que *shear* significa “cisalhamento” ou “deslocamento lateral” e *graphy* se refere à “registro de”; é uma técnica capaz de medir pequenas deformações na superfície, e em comparação com outras técnicas de medição óptica, apresenta configuração óptica simplificada, menor sensibilidade a vibrações e deslocamentos de corpo rígido, tornando viável sua utilização em campo. (HUNG e HO, 2005; ALBERTAZZI, WILLEMANN e MENICONI, 2007))

Uma de suas configurações ópticas pode ser baseada no interferômetro de “Michelson”, apresentada na figura 3 e composta por um divisor de feixe, espelho móvel, espelho inclinável, iluminação laser e uma câmera. Nesta técnica, a interferência ocorre entre uma imagem original da superfície e outra imagem da mesma superfície lateralmente deslocada.



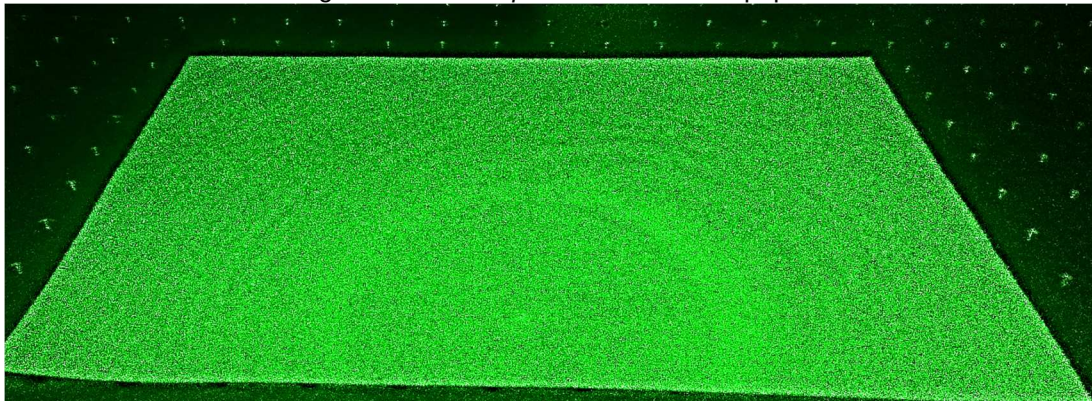
Fonte: Adaptado de SOUZA, 2015

A aplicação do deslocamento lateral é realizada através de uma mesa óptica, que pode inclinar o espelho 2 horizontalmente ou verticalmente. A interferência ocorre no sensor da câmera quando os feixes P1 e P2 provenientes da superfície do objeto passam pelo divisor de feixe e espelhos, se combinam e interferem em apenas um ponto P do sensor da câmera. O deslocamento lateral é fundamental para o

funcionamento da técnica e através dele a sensibilidade do sistema pode ser alterada, quanto maior o deslocamento lateral, maior a sensibilidade.

Nesse contexto, ao iluminar uma superfície por uma luz coerente de um laser, cada ponto da superfície pode ser considerado uma fonte de ondas. Assim, quando o comprimento de onda do laser for menor que a rugosidade da superfície, é percebido o efeito *speckle* (figura 4). A luz refletida pela superfície rugosa é espalhada aleatoriamente devido ao princípio de Huygens, sendo visível um granulado óptico com pontos claros e escuros resultantes da interferência construtivas ou destrutivas da luz (MOHAN, 2008).

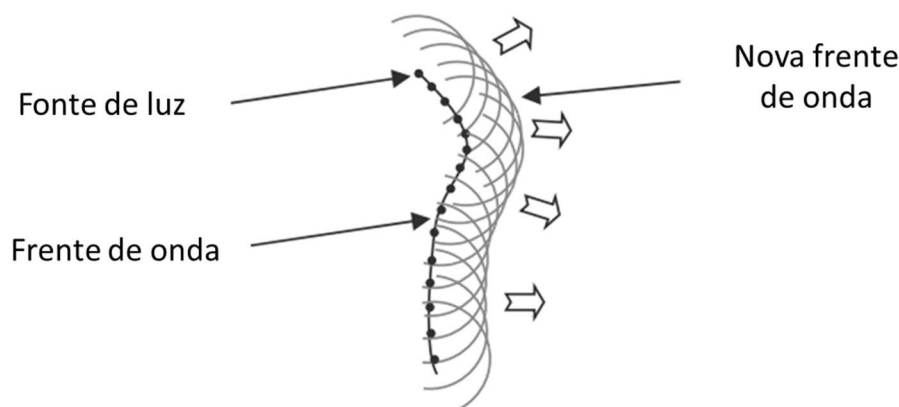
Figura 4 – Efeito *speckle* em folha de papel



Fonte: Próprio Autor

O princípio de Huygens aponta que cada ponto de uma frente de onda em propagação se comporta como uma nova fonte de ondas, sendo que, o conjunto dessas fontes de onda formam uma nova frente de onda, ilustrado na figura 5. (VIOTTI e ALBERTAZZI JR., 2014)

Figura 5 – Princípio de Huygens



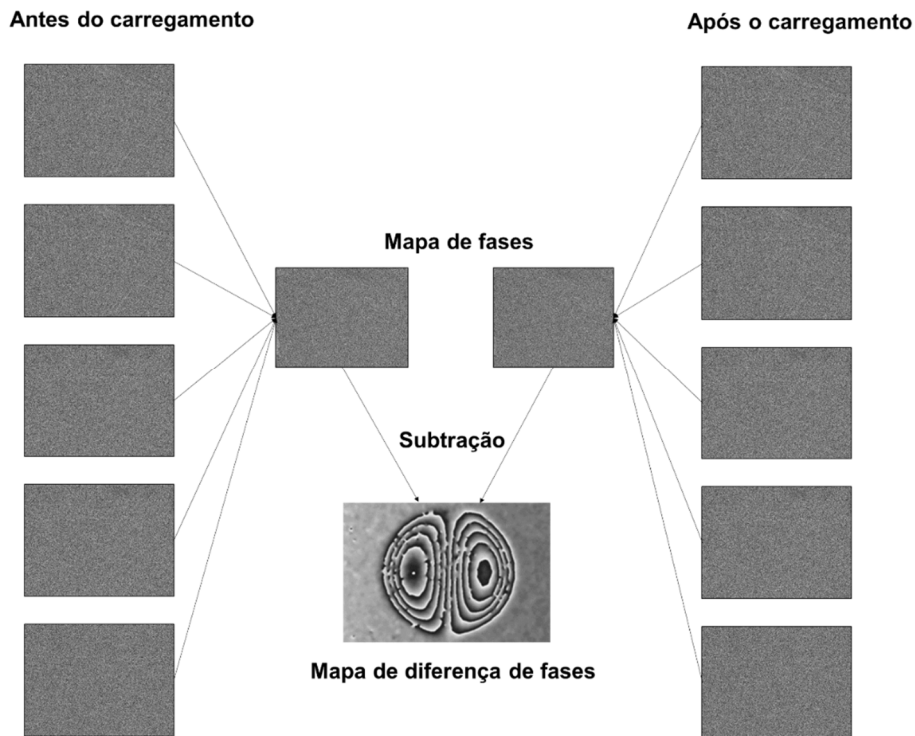
Fonte: Adaptado de (VIOTTI e ALBERTAZZI JR., 2014)

Esta técnica utiliza deslocamento lateral, com isso ocorre a sobreposição de regiões diferentes do padrão de *speckle*, que interferem entre si, dando origem a um novo padrão de *speckle* resultante da interferência, denominado specklegrama. (STEINCHEN e YANG, 2003).

Na shearografia, a detecção dos defeitos é relacionada às diferenças de fase em cada ponto do specklegrama, que não podem ser medidas de forma direta pela câmera, sendo realizadas de forma indireta através do cálculo da variação da intensidade luminosa captada por cada pixel no sensor da câmera. Estes cálculos são realizados através de um *software* especializado desenvolvido pelo Labmetro.

Este *software* especializado para utilização da técnica de shearografia, utiliza um algoritmo de cinco passos com diferença de fase conhecida, para determinar o valor de fase em cada pixel da imagem de uma superfície em análise. Para possibilitar a detecção de defeitos, é necessária a aplicação de um tipo de carregamento (abordado no item 3.1.2) provocando uma pequena deformação no material revestido (não visível à inspeção visual), e então aplicar novamente o algoritmo de cinco passos, determinando novos valores de fase para cada pixel da superfície. Ao subtrair os valores individuais de fase de cada pixel, após carregamento e anterior ao carregamento, obtém-se um mapa de diferença de fases que evidencia a presença de defeitos na superfície em questão. A figura 6 ilustra de forma simplificada a aplicação deste método.

Figura 6 – Método dos 5 passos para shearografia

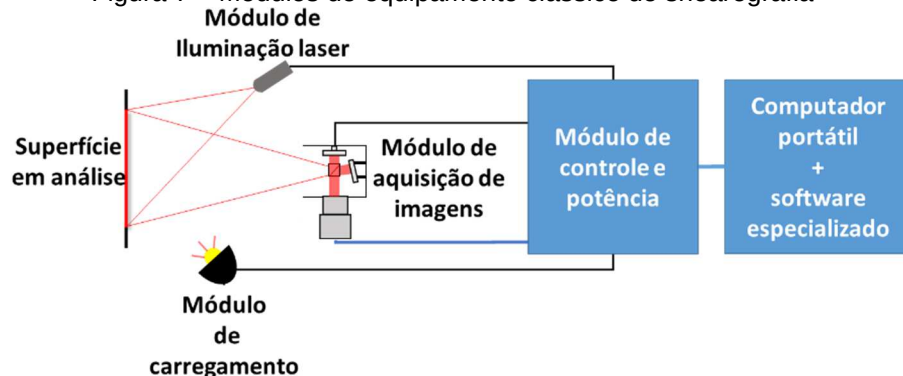


Fonte: próprio autor

3.1.1 Equipamento clássico de shearografia

Para realizar inspeções com shearografia, é necessário um módulo de iluminação laser, módulo de aquisição de imagens, módulo de carregamento e um *software* específico executado em computador. (WILLEMANN, MARINHO, *et al.*, 2008). Na figura 7 pode ser visto um esquemático dos componentes de um equipamento clássico de shearografia.

Figura 7 – Módulos de equipamento clássico de shearografia



Fonte: (SOUZA, 2015)

O módulo de iluminação, possui uma fonte de iluminação laser e um conjunto de lentes responsáveis pela expansão da luz à superfície. O módulo de aquisição de imagens, possui um interferômetro similar ao exemplificado na figura 3 além de um conjunto de lentes e uma câmera para captar as imagens da superfície

sob análise. O módulo de carregamento, abordado no 3.1.2, é responsável por deformar suavemente a superfície, possibilitando assim a detecção de defeitos.

3.1.2 Carregamentos

É necessário a aplicação de um ou mais carregamentos para que o defeitos sejam evidenciado pela técnica de medição. Os carregamentos podem ser mecânicos, a vácuo, vibracional ou térmico conforme ilustrados nas figuras 8 a 11 (ALBERTAZZI, MENICONI, *et al.*, 2006)

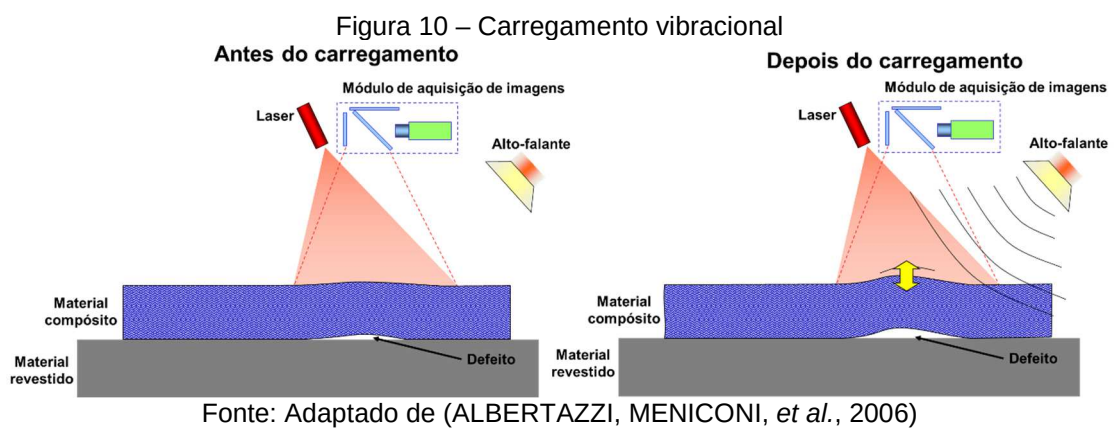
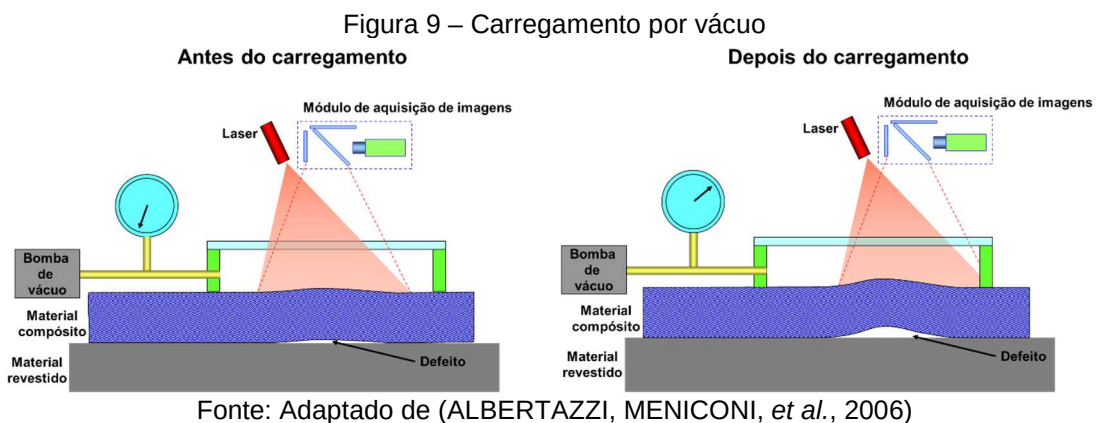
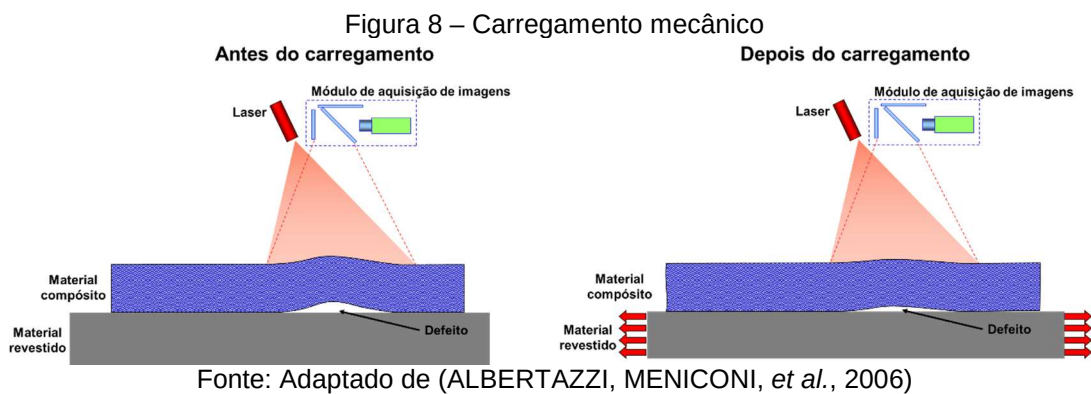
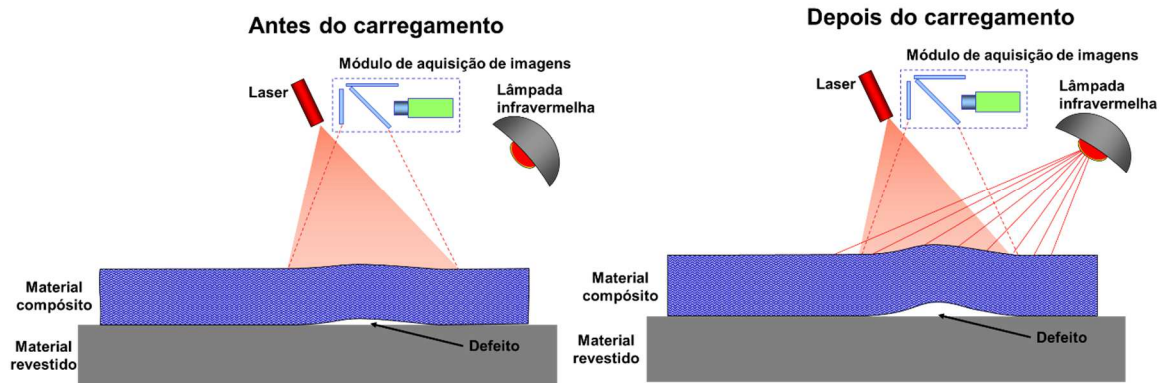


Figura 11 – Carregamento térmico



Fonte: Adaptado de (ALBERTAZZI, MENICONI, *et al.*, 2006)

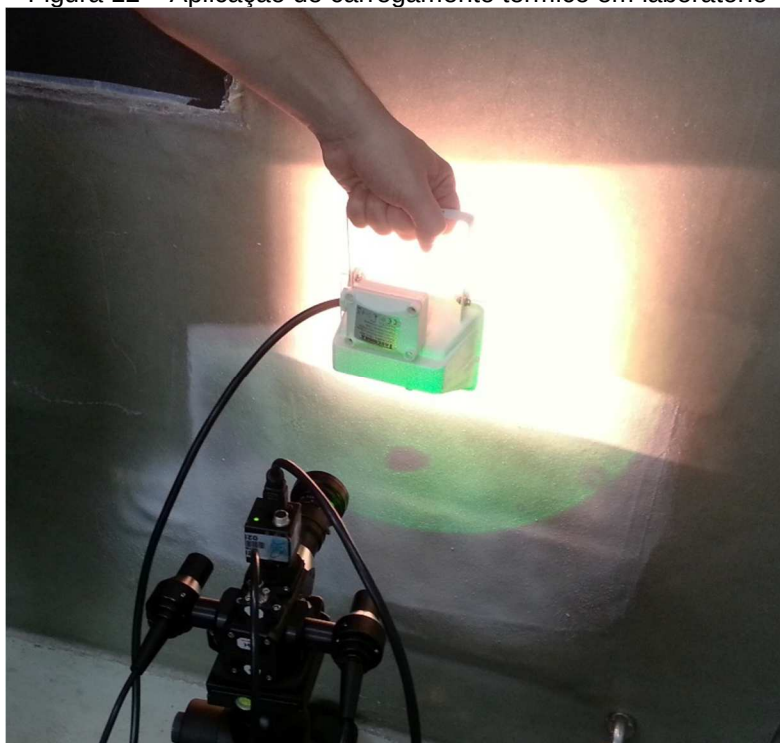
Os carregamentos mecânicos consistem na aplicação de tração, flexão, torção ou variação da pressão interna e são utilizados com frequência em dutos e tubulações. Os carregamentos por vácuo evidenciam os defeitos através da sucção da superfície revestida, para isso, se faz necessário o uso câmaras estanques e bombas de vácuo, que dificultam o uso da técnica em campo. Os carregamentos vibracionais são aplicados através de atuadores piezoelétricos ou alto falantes, que posicionados sobre uma superfície revestida, vibram em diversas frequências possibilitando a detecção de defeitos.

O carregamento térmico, utilizado pelo equipamento de shearografia selecionado para automatização, é bastante empregado em campo devido à facilidade de aplicação, posicionamento, intensidade, tempo de exposição e alcance do carregamento. Para realizar o aquecimento, podem ser utilizadas lâmpadas emissoras de radiação infravermelha, sopradores térmicos e aquecedores elétricos. Geralmente o tempo de aquecimento varia de poucos segundos a um minuto, e depende diretamente da potência empregada, espessura do defeito, tipo de material composto e profundidade do defeito.

Quando é aplicado calor ao revestimento, o material composto sofre dilatação térmica. Se a superfície não apresentar defeitos, as deformações na superfície ocorrem de maneira uniforme. Em caso da presença de defeitos, os efeitos da dilatação são mais expressivos na área defeituosa, pois nestas áreas, o composto tem liberdade para expandir, diferentemente da região sem defeito (ALBERTAZZI, MENICONI, *et al.*, 2006).

. Na figura 12, pode ser visualizada a aplicação deste tipo de carregamento em um corpo de prova através de um refletor com lâmpada de radiação infravermelha.

Figura 12 – Aplicação de carregamento térmico em laboratório



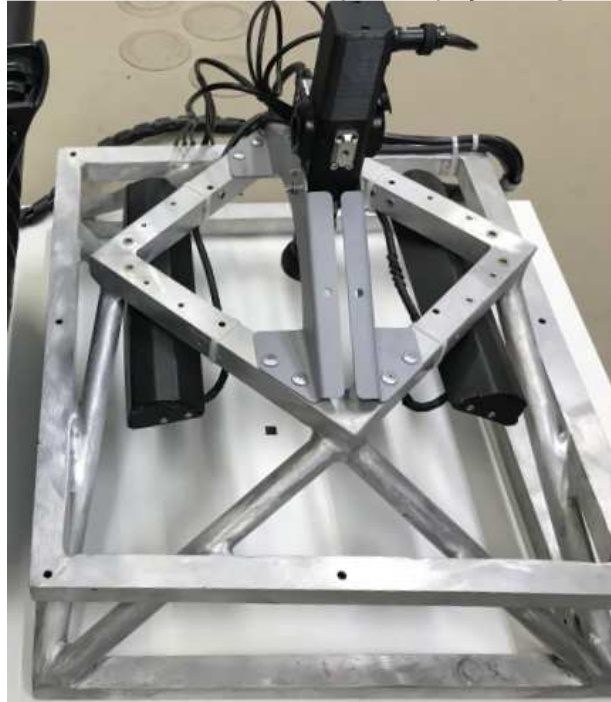
Fonte: Próprio autor

3.2 Inspeção de grandes áreas verticais revestidas por materiais compósitos

Para inspecionar grandes áreas verticais de forma manual, é necessário dispor de andaimes ou elevadores para possibilitar o acesso à superfície, envolvendo altos custos financeiros e diversas horas de trabalho.

Sendo assim, vem sendo desenvolvido nos últimos anos pelo Labmetro um sistema de inspeção para grandes áreas verticais revestidas por materiais compósitos, como costados de navios e tanques. Um sistema robotizado atuado por cabos posiciona, em diversas áreas da superfície em questão, uma estrutura robusta e compacta que dispõe de um módulo de aquisição de imagens modelo N4F (cabeçote de medição), módulo de iluminação laser, e módulo de carregamento térmico. Esta estrutura pode ser vista na figura 13.

Figura 13 – Sistema de shearografia para inspeção de grandes áreas



Fonte: Próprio autor

A estrutura possui dimensões aproximadas de 550mm x 450mm com altura de 225mm e está sendo testada em conjunto com um robô atuado por cabos em um corpo de provas para medições de grandes áreas verticais, instalado no INPETRO (Instituto de Petróleo, Gás e Energia). O equipamento em teste no corpo de provas pode ser visualizado na figura 14.

Figura 14 – Corpo de prova para inspeção de grandes áreas verticais



Fonte: Disponibilizado pelo Labmetro

Nesse tipo de aplicação, se faz necessário alterar o deslocamento lateral do módulo de aquisição de imagens, podendo ser necessário aumentar ou diminuir o deslocamento lateral horizontal e/ou vertical. Como o operador se encontra afastado do dispositivo de medição e não tem acesso ao parafuso responsável pela inclinação da mesa óptica, é preciso dispor de um cabeçote de medição em que o deslocamento lateral possa ser realizado remotamente.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Detalhamento do equipamento escolhido para automatização

O equipamento escolhido para realizar a automatização foi um cabeçote de medição por shearografia modelo N4F desenvolvido pelo Labmetro - UFSC em parceria com a PETROBRAS, apresentado na figura 15, possui dimensões aproximadas de 160 mm de comprimento, 40 mm de largura e 90 mm de altura com massa total de 500 g.

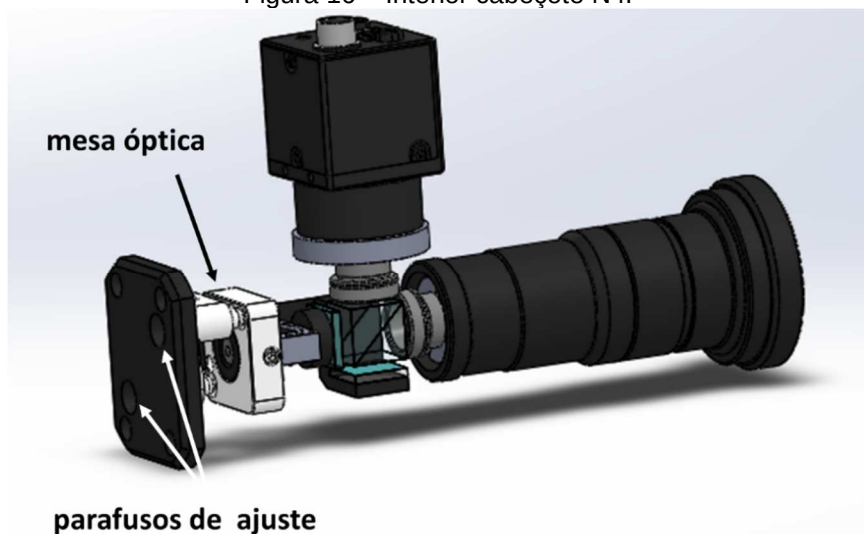
Figura 15 – Cabeçote de medição por shearografia modelo N4F



Fonte: Próprio autor

Conforme equipamento clássico de shearografia, ele possui um espelho móvel cuja inclinação pode ser alterada tanto verticalmente como horizontalmente. Para que a inclinação seja realizada, é necessário apertar ou soltar um parafuso micrométrico para inclinar o espelho na horizontal e outro parafuso para inclinar verticalmente, conforme pode ser visto na figura 16.

Figura 16 – Interior cabeçote N4F



Fonte: Próprio autor

4.2 Levantamento de requisitos

Em conjunto com pesquisadores do Labmetro, que utilizam o equipamento em campo e em laboratório, foram elencados alguns requisitos para automatização do equipamento em questão. Estes requisitos são apresentados no quadro 3.

Quadro 3 – Levantamento de requisitos para automatização

Requisito	Justificativa
Fácil implementação	Visando rapidez na implementação e levantamento de dados experimentais para validação do protótipo
Incremento de giro ≤ 30 graus	Para que em 180 graus de giro do parafuso, obtenha-se pelo menos 6 incrementos
Massa < 30g (cada)	Devido à massa reduzida do cabeçote de medição, e limitação do sistema robotizado em que o sistema de medição é acoplado
Comando à distância	Uma das justificativas do trabalho. Operar o deslocamento lateral sem necessidade de estar próximo do dispositivo
Programável	Possível integração com sistema pré existente
Dimensionamento para encaixe $\leq 50\text{mm} \times 50\text{mm}$	Área aproximada da parte traseira do cabeçote, que dá acesso aos parafusos de ajuste/inclinação dos espelhos.
Repetibilidade	É desejável que se tenha erro aleatório baixo
Robusto	Para suportar pequenos impactos causados em transporte e durante operação
Baixa Manutenção	Desejável baixo custo de manutenção e baixa periodicidade
Baixa potência elétrica	Devido a interferências com o sistema de medição. Caixa de comando e potência do cabeçote possui limitações
Elementos externos	Desejável que o sistema não necessite de drivers, fontes ou outros dispositivos. Caixa de comando e potência do cabeçote possui limitações

Fonte: Próprio autor

4.3 Propostas de tecnologias para automatização

As possíveis alternativas para automatização foram organizadas no quadro 4. Foi atribuída uma classificação em escala de 0 a 5 (sendo 5 nota máxima) de acordo com o cumprimento de cada um dos requisitos de projeto levantados no item 4.2.

Quadro 4 – Classificação de requisitos x soluções encontradas

Soluções Requisitos	Motor de passo Nema 17	Servomotor 9g – 30g	Motor pneumático	Motor de Indução	Motor CC
Fácil implementação	5	5	4	4	4
Incremento de giro ≤ 30 graus (0 -180)	5	5	0	0	4
Massa < 30g (cada)	0	5	0	0	2
Comando à distância	5	5	5	5	5
Programável	5	5	5	5	5
Dimensionamento para encaixe $\leq 50\text{mm} \times 50\text{ mm}$	4	5	3	0	3
Robusto	5	5	5	5	5
Baixa Manutenção	5	5	5	5	5
Baixa potência elétrica	4	5	5	3	5
Elementos externos	3	5	1	2	3
Soma	41	50	33	29	41

Fonte: Próprio autor

Levando em consideração o atingimento dos requisitos estipulados, foi decidido junto à equipe do Labmetro, desenvolver um protótipo para realizar a automatização do cabeçote de medição utilizando um servomotor de baixo custo, cujo detalhamento será realizado no item seguinte.

4.4 Detalhamento da concepção escolhida

O servomotor escolhido, abrange todos os requisitos estipulados no quadro 4. É de fácil implementação e possibilita realizar incrementos e decrementos de ângulos menores que trinta graus, pode ser utilizado em conjunto com placas como Arduino, Raspberry e National Instruments, e implementado seu comando à distância, possui massa aproximada de 9 gramas, baixa manutenção e potência elétrica reduzida.

Como pode ser visto na figura 17 as dimensões aproximadas do servomotor são 21 mm x 12mm e altura de 22 mm, torque especificado pelo fabricante de 0,16Nm e engrenagens construídas em nylon. No centro de seu eixo motor foi acoplado um eixo sextavado de 5mm, equivalente à cavidade allen do parafuso responsável pela inclinação do espelho.

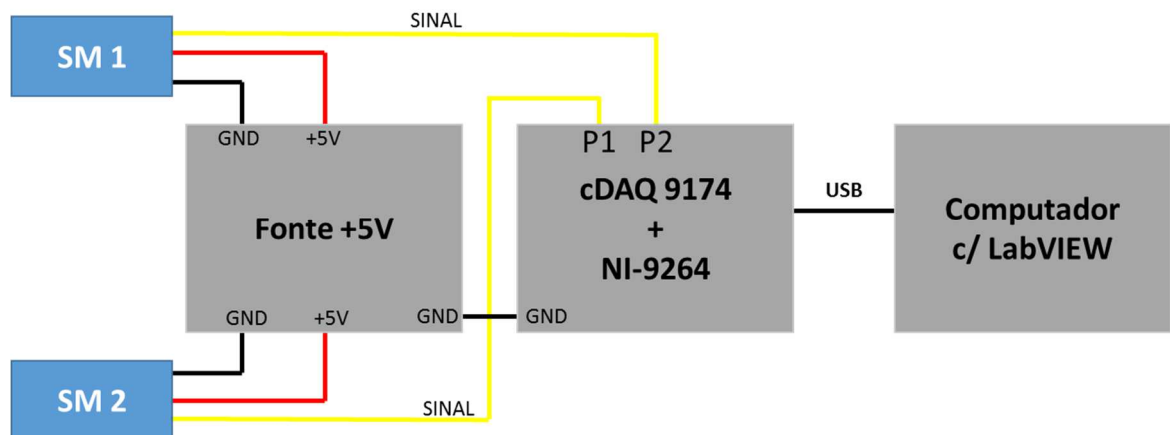
Figura 17 – Servomotor utilizado



Fonte: Próprio autor

Foram utilizadas duas unidades deste servomotor, uma para deslocamento lateral vertical e outra para o horizontal. Eles possuem três fios, sendo dois deles para alimentação e um para sinal. Foi utilizada uma fonte externa 5V para alimentação dos servomotores, e um chassis da National Instruments cDAQ 9174 com uma unidade NI 9264 de saída analógica para os sinais, conectados ao servo através das portas P1 e P2. Um computador executando o *software* LabVIEW e conectado às placas de aquisição e controle, serve de interface para o comando dos servomotores. Um esquemático pode ser visualizado na figura 18.

Figura 18 – Esquemático comando servomotores



Fonte: Próprio autor

O servomotor possui internamente um sistema microcontrolado em que existe uma relação fixa entre a angulação de seu eixo com a razão cíclica de um pulso enviado ao seu controlador interno.

Foi realizado um experimento para determinar a razão cíclica do servomotor correspondente à cada incremento em graus do motor. Manualmente via LabVIEW, foi determinado o valor de razão cíclica para o ângulo de 0 e 180 graus, e a partir destes foi programada uma escala com incrementos de 15 graus.

Tabela 2 – Experimento comando servomotor

Ângulo [graus]	% Razão Cíclica
0	3,90
15	4,63
30	5,37
45	6,10
60	6,83
75	7,57
90	8,30
105	9,03
120	9,77
135	10,50
150	11,24
165	11,97
180	12,70

Fonte: Próprio autor

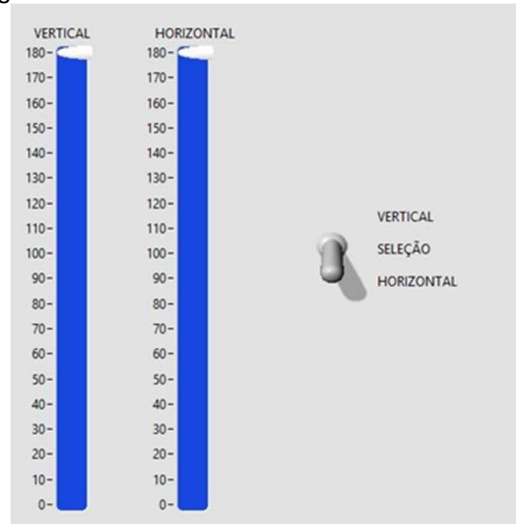
Baseando-se nesta tabela, foi programado em LabVIEW um *software* de comando que recebe os valores de uma escala de 0 a 180 graus e converte na razão

cíclica correspondente para comandar o servomotor à posição desejada. Foi determinada a equação 1, em que “A” é o ângulo em graus e “R” é a razão cíclica correspondente ao comando desta angulação.

$$R = A \cdot 0,0489 + 3,9 \quad (1)$$

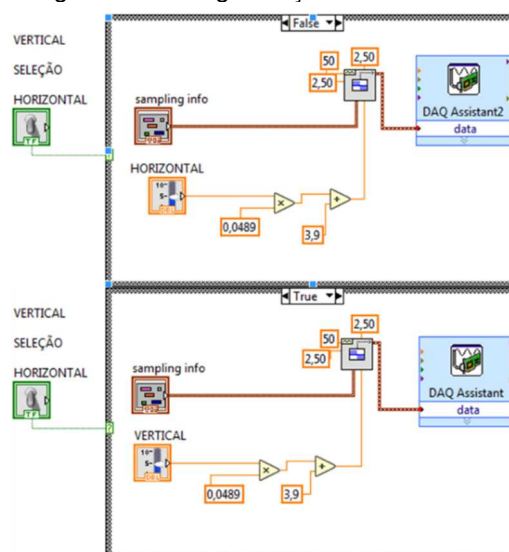
Na figura 19 pode ser vista a interface do software para comando dos servomotores, em que o operador seleciona qual o ângulo desejado além da direção do deslocamento lateral a ser aplicado, vertical ou horizontal. A figura 20 apresenta o ambiente de programação de blocos em LabVIEW, com implementação da equação 1 e envio da razão cíclica à placa de aquisição e controle cujos servomotores estão conectados.

Figura 19 – Painel de comando dos servomotores



Fonte: Próprio autor

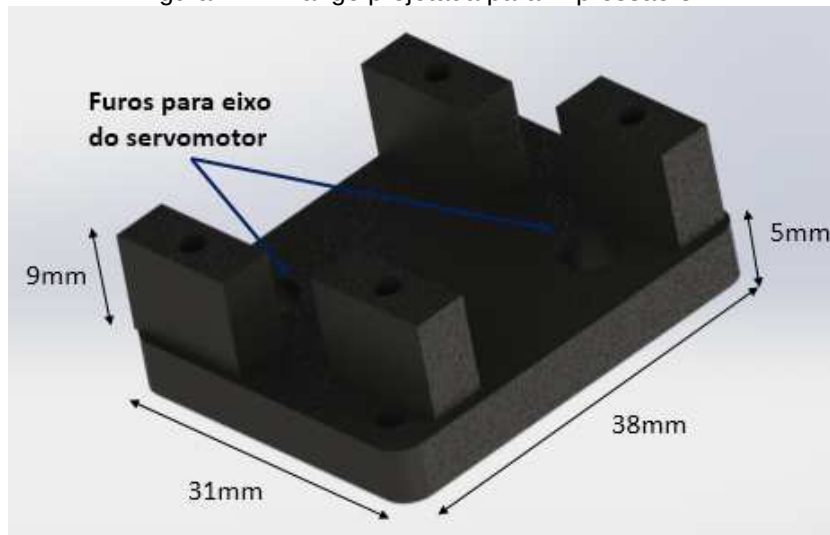
Figura 20 – Programação em LabVIEW



Fonte: Próprio autor

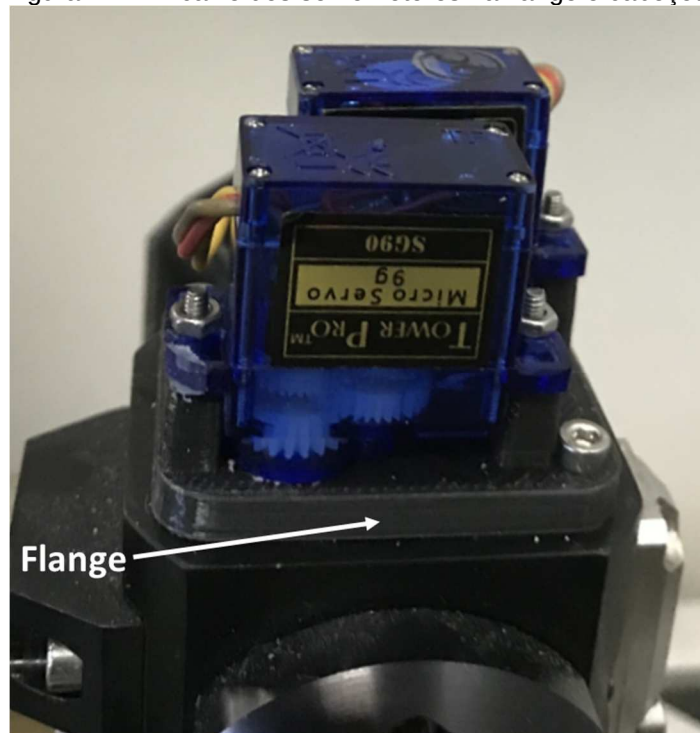
A fixação dos servomotores e encaixe do eixo no parafuso de deslocamento lateral do cabeçote, foi realizada através de uma flange confeccionada em impressora 3D conforme figura 21 e 22

Figura 21 – Flange projetada para impressão 3D



Fonte: Próprio autor

Figura 22 – Encaixe dos servomotores na flange e cabeçote



Fonte: Próprio autor

Com os servomotores devidamente acoplados à flange como pode ser visto na figura 22, e respectivos eixos encaixados ao parafuso responsável pela inclinação dos motores, foram realizados diversos testes incrementando e decrementando as

angulações via software e observando o comportamento do deslocamento lateral com a câmera conectada ao computador

A figura 23 mostra o painel de comando desenvolvido, além da imagem visualizada pela câmera do cabeçote. Utilizando-se de um adesivo quadrado de dimensões conhecidas de 10mm x 10mm, colado na superfície visualizada pela câmera, é possível visualizar o comportamento do deslocamento lateral do cabeçote, tanto vertical quanto horizontal.

Figura 23 – Painel de comando para aplicação de deslocamento lateral



Fonte: Próprio autor

Com a simples visualização na tela do computador, foi evidenciado que o conjunto apresenta histerese significativa, e sendo assim, foram realizados testes para medi-la. Para levantar experimentalmente a curva de histerese, o sistema foi calibrado utilizando software próprio do Labmetro, e seguindo a mesma metodologia aplicada em campo. Conhecendo as dimensões do adesivo aplicado sobre a superfície visualizada pela câmera, seleciona-se as bordas do adesivo na imagem, informando ao software que a dimensão selecionada em tela corresponde à dimensão do adesivo, em nosso experimento foi utilizado adesivo de 10mm x 10mm. A figura 24 mostra este processo de calibração descrito.

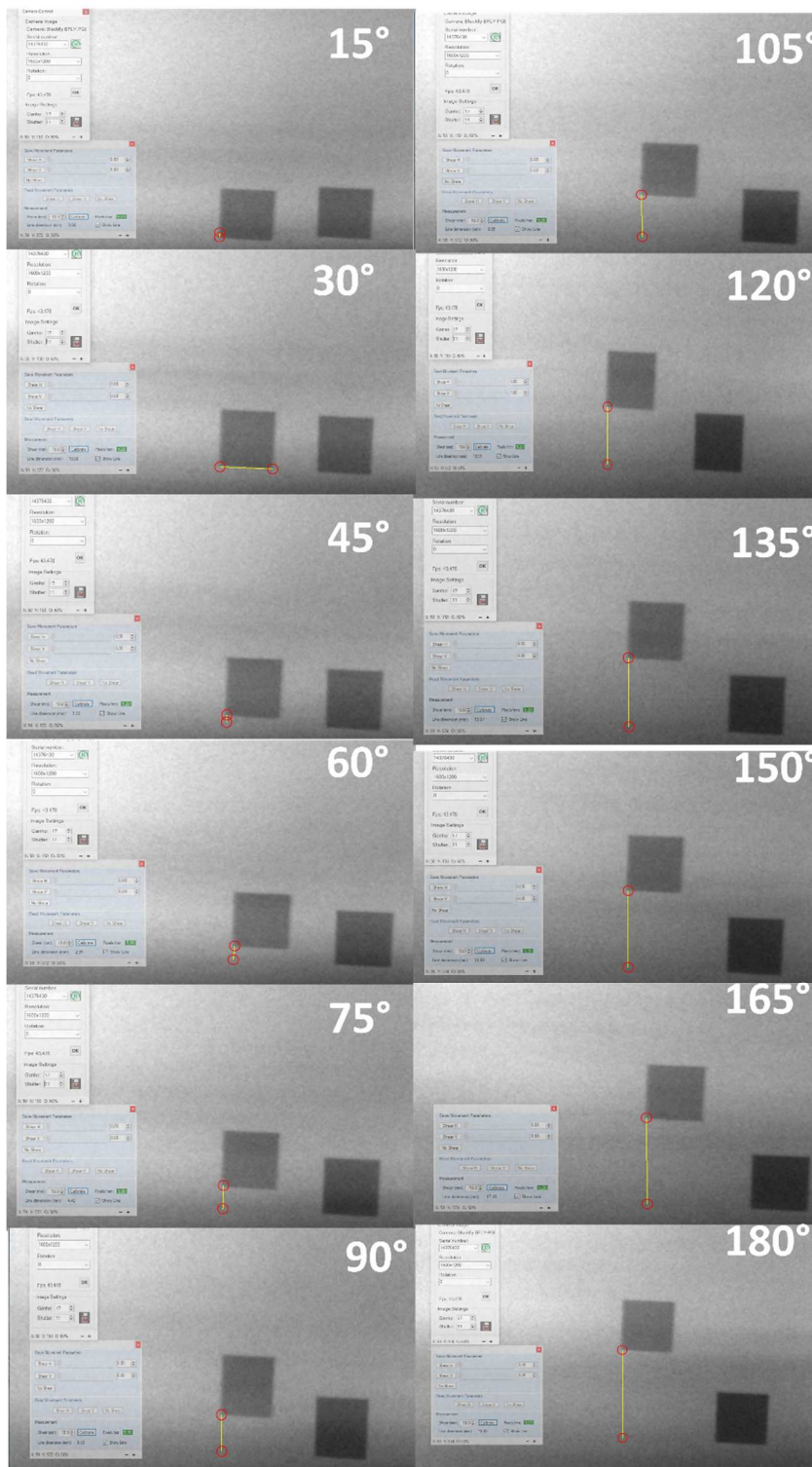
Figura 24 – Software utilizado para medições nas imagem da câmera



Fonte: Próprio autor

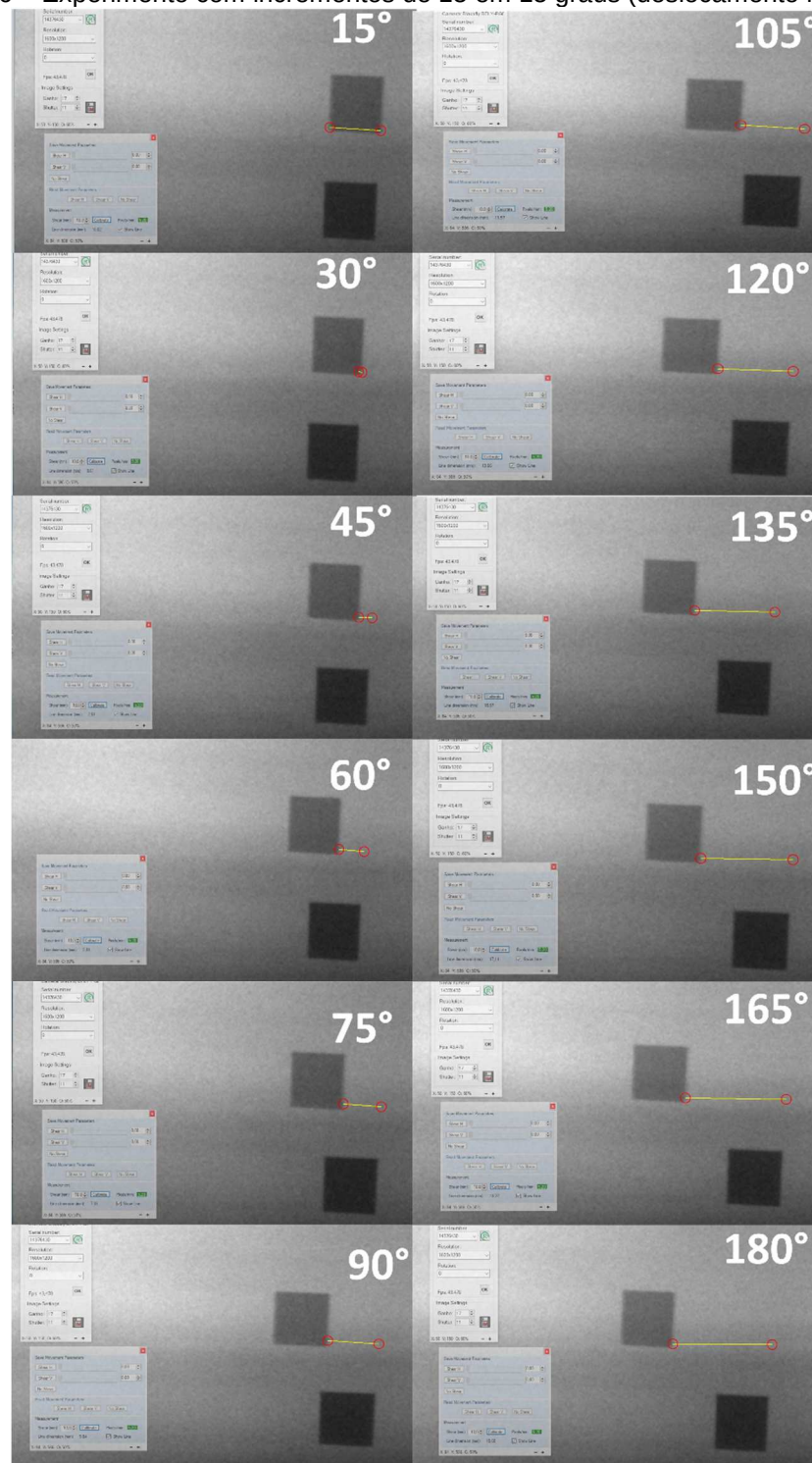
Após realizada a calibração, o software conhece as dimensões da área visualizada pela câmera, e assim ao selecionar pontos na imagem o software indica qual é a distância entre os pontos. Desta forma, foram realizados incrementos de angulação no motor via LABVIEW e medidos os deslocamentos selecionando-se as localizações das bordas do adesivo a cada incremento. A figura 25 e 26 mostram a sequência de medições realizadas em um dos experimentos com o deslocamento lateral vertical e horizontal respectivamente.

Figura 25 – Experimento com incrementos de 15 em 15 graus (deslocamento vertical)



Fonte: Próprio autor

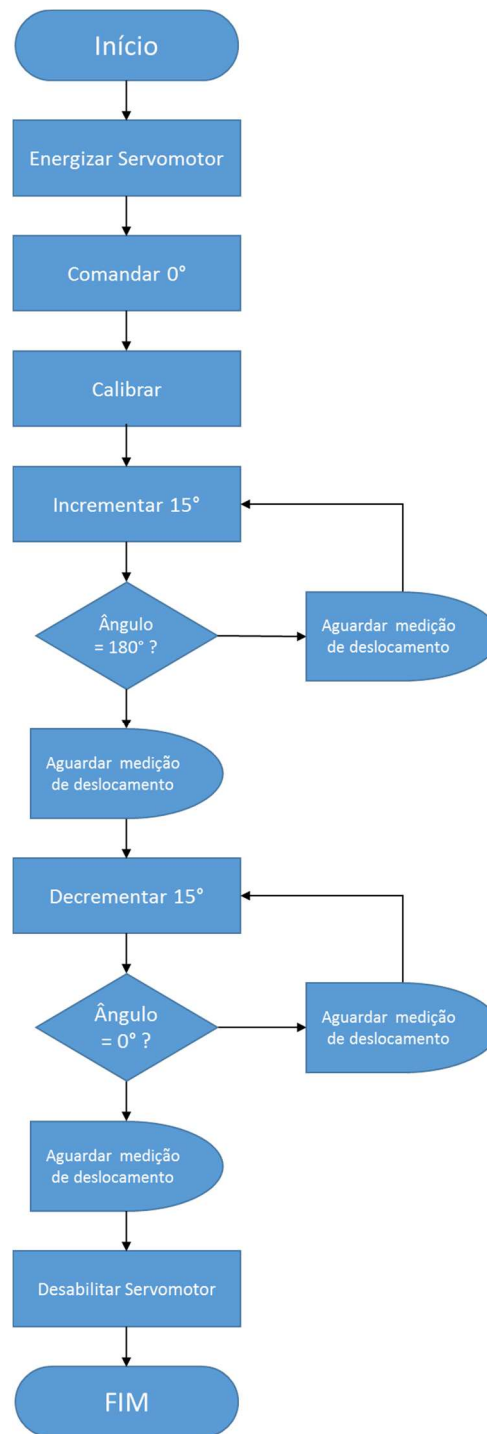
Figura 26 – Experimento com incrementos de 15 em 15 graus (deslocamento horizontal)



Fonte: Próprio autor

Para determinar a histerese, o procedimento foi realizado de acordo com o fluxograma apresentado na figura 27.

Figura 27 – Sequência para determinação de histerese



Fonte: Próprio autor

Os testes foram realizados duas vezes para cada um dos servomotores. Os valores obtidos são apresentados na tabela 3 e 4.

Tabela 3 – Experimento histerese deslocamento lateral vertical

VERTICAL				
Incremento	Subida 1 [mm]	Descida 1 [mm]	Subida 2 [mm]	Descida 2 [mm]
0	0	0	0	0
15	-0,96	2,31	-1,35	1,93
30	0	4,04	0	3,84
45	1,36	6,15	1,17	6,15
60	2,91	8,46	2,51	8,27
75	4,42	9,99	4,04	9,62
90	6,53	12,68	6,54	12,49
105	8,65	14,99	8,46	14,8
120	10,95	17,68	10,76	17,3
135	13,07	19,22	12,68	19,02
150	14,99	19,6	14,8	19,22
165	17,1	19,8	16,72	19,22
180	18,83	18,83	18,45	18,45

Fonte: Próprio autor

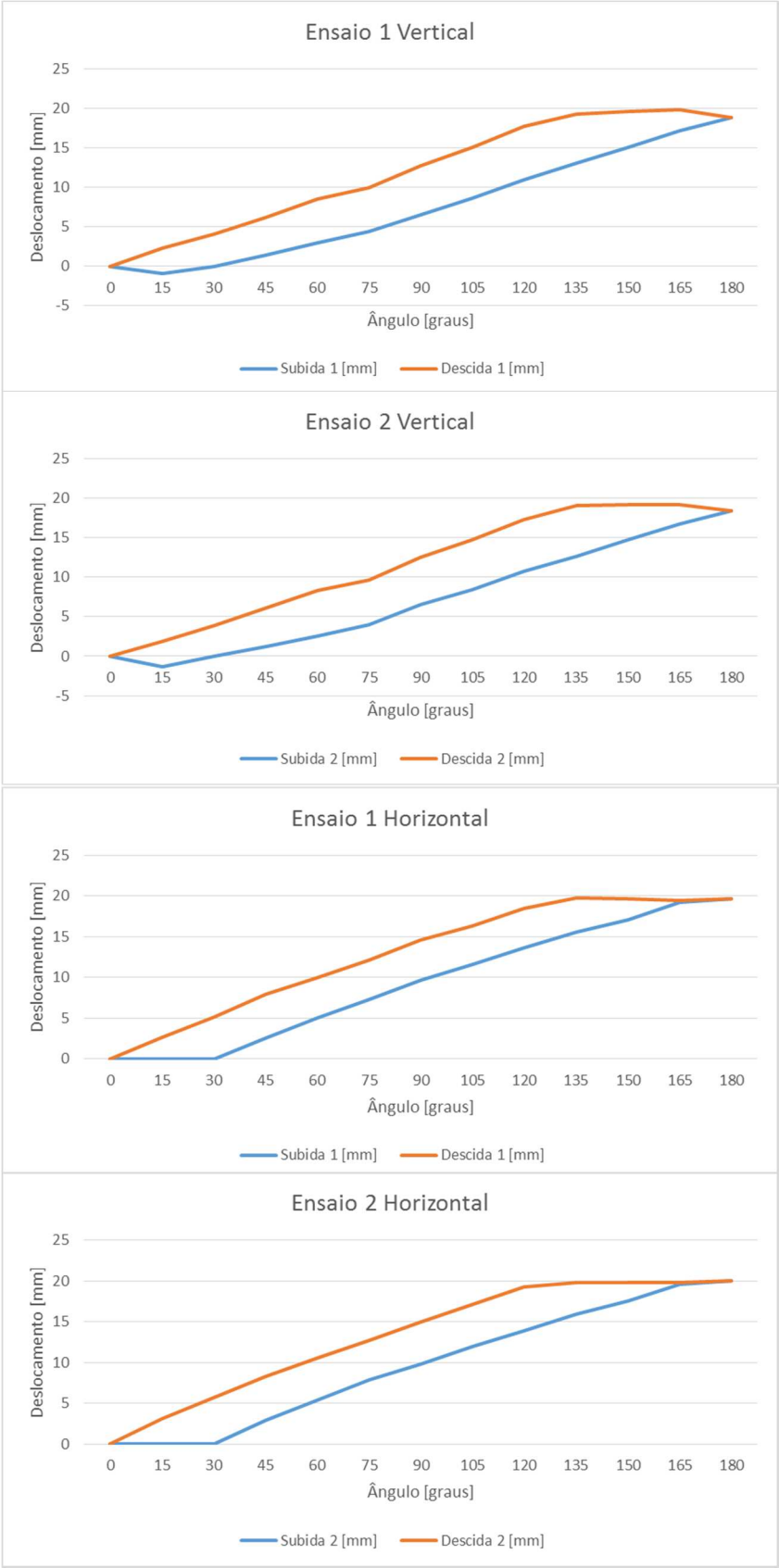
Tabela 4 – Experimento histerese deslocamento lateral horizontal

HORIZONTAL				
Incremento	Subida 1 [mm]	Descida 1 [mm]	Subida 2 [mm]	Descida 2 [mm]
0	0	0	0	0
15	0	2,7	0	3,1
30	0	5,19	0	5,66
45	2,51	7,88	2,89	8,27
60	5,01	9,99	5,39	10,57
75	7,33	12,11	7,89	12,68
90	9,64	14,6	9,81	14,99
105	11,57	16,34	11,93	17,1
120	13,66	18,45	13,84	19,3
135	15,57	19,79	15,96	19,8
150	17,11	19,6	17,5	19,8
165	19,22	19,41	19,62	19,8
180	19,6	19,6	20	20

Fonte: Próprio autor

Com base nas tabelas, foram plotados gráficos da histerese apresentada pelos sistemas, e podem ser vistos na figura 28, sendo o eixo vertical o deslocamento em milímetros, e o eixo horizontal os incrementos em graus.

Figura 28 – Gráficos de histerese



Fonte: Próprio autor

Conforme testes realizados, a histerese apresentada pelo sistema pode estar relacionada com o aperto do parafuso e limitação de torque do servomotor. Inicialmente de 0 a 30 graus, o conjunto mecânico da mesa aparenta estar totalmente sem aperto resultando assim em um comando de giro do servomotor sem efetiva inclinação da mesa. Já no final de curso dos parafusos, devido às forças envolvidas, ao comandar o decremento de posição no servomotor, o eixo permanece preso devido à força de atrito entre parafuso e cavidade da rosca. Possivelmente um servomotor com um torque maior tenha mais efetividade.

De acordo com a equipe do Labmetro, um deslocamento lateral comumente utilizado é de cerca de 10mm. Como pode ser visto nos gráficos e tabelas de dados, próximo à faixa central o equipamento se comporta de forma mais linear. Sendo assim, com base nos dados obtidos nos experimentos, apresentados nas tabelas 3 e 4, e com ajustes de programação, foram determinados os valores de angulações que devem ser aplicadas a partir das posições 0 graus de ambos os servomotores, para que seja atingido um deslocamento lateral aproximado de 10mm. Os valores foram testados experimentalmente, comandando os servomotores diretamente de 0 graus até valores entre 90 e 120 graus conforme os resultados encontrados nas tabelas 3 e 4. Os resultados de ângulos resultantes em deslocamento lateral próximo de 10mm foram 92 graus para o deslocamento horizontal e 115 graus para o deslocamento lateral vertical.

É importante que se possa acompanhar a evolução dos defeitos durante os anos, para isso, é preciso que o deslocamento lateral aplicado em determinada inspeção seja de valores conhecidos. Assim, para avaliar a repetibilidade do conjunto, foram realizados cinco testes em sequência com cada um dos servomotores. Partindo da posição 0 grau, até a posição determinada e medindo em tela o deslocamento resultante do adesivo na imagem da câmera. Os resultados dos testes podem ser vistos nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Teste de Repetibilidade 115°

Vertical 115° ~ 10mm	
Teste	Resultado [mm]
1	10
2	10
3	9,8
4	9,99
5	9,99
Média	9,96
Desvio Padrão	0,09
Incerteza (95,45%)	0,25

Fonte: Próprio autor

Tabela 6 – Teste de Repetibilidade 92°

Horizontal 92° ~ 10mm	
Teste	Resultado [mm]
1	10,38
2	10,19
3	10,19
4	10,21
5	10,39
Média	10,27
Desvio Padrão	0,10
Incerteza (95,45%)	0,30

Fonte: Próprio autor

No teste de repetibilidade do deslocamento lateral vertical, ao comandar o servomotor para a posição de 115 graus, a média dos valores foi de 9,96mm com desvio padrão de 0,09mm e incerteza com nível de confiabilidade de 95,45% de 0,25mm. No teste realizado para o deslocamento horizontal, ao comandar o servomotor para a posição de 92 graus, a média dos valores obtidos foi de 10,27mm, desvio padrão de 0,10mm e incerteza de 0,30mm.

Não foram considerados os níveis de incerteza agregada ao sistema de calibração, tratando-se de um *software* e de procedimento de calibração amplamente utilizado em laboratório e em campo, foram evidenciadas somente as incertezas de deslocamento lateral vertical e horizontal.

Considerando que deseja-se apenas aproximar-se dos valores de deslocamento lateral de 10mm, com as incertezas envolvidas, os resultados foram considerados satisfatórios.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O trabalho desenvolvido teve como resultado a automatização da aplicação de deslocamento lateral vertical e horizontal em um cabeçote de medição por shearografia. O protótipo construído ficou funcional e atendeu à todos os requisitos de projeto levantados em conjunto com a equipe de pesquisadores do Labmetro -UFSC, sendo eles os principais usuários do protótipo.

Através da interface programada em LabVIEW e comandada via computador, foram realizados testes e experimentos com o protótipo, que validaram a utilização do mesmo para aplicação do deslocamento lateral estabelecido de 10mm assim como dos incrementos e decrementos de 15 graus conforme necessidade do operador durante o uso da técnica de medição.

A histerese evidenciada durante os experimentos pode estar relacionada a aspectos construtivos do cabeçote, forças envolvidas no aperto do parafuso e limitação de torque do servomotor utilizado.

Baseando-se na documentação apresentada, o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho foram atingidos.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Devido ao escopo do projeto e às limitações de tempo e disponibilidade, a principal recomendação para trabalhos futuros é a utilização do cabeçote de medição automatizado em conjunto com o sistema robotizado para inspeção de grandes áreas verticais instalado no INPETRO para a validação final. Além disso, poderá ser realizada integração do comando do servomotor ao software desenvolvido pelo Labmetro e utilizá-lo nos experimentos, facilitando a aplicação do deslocamento lateral em campo ou em laboratório.

Pode também ser realizado um estudo de repetibilidade da aplicação de deslocamento lateral para outras faixas de valores como 5mm, 8mm, 12mm e 15mm possibilitando que estes deslocamentos sejam realizados com mais eficácia e precisão.

O desenvolvimento deste trabalho, e os resultados satisfatórios obtidos, serviram de impulso para o desenvolvimento de uma nova versão do cabeçote de

medição automatizado, realizado em paralelo à fase final de testes deste trabalho. Esta nova versão conta com dois servomotores; mais precisos, confiáveis e com engrenagens metálicas; embutidos na estrutura interna do cabeçote para realizar os deslocamentos laterais.

REFERÊNCIAS

- ALBERTAZZI, A. et al. Detecção de Falhas de Adesão entre Mantas Poliméricas e Dutos usando Interferometria de Deslocamento Lateral. **CONAEND 036**, São Paulo, 2006.
- ALBERTAZZI, A.; WILLEMANN, D. P.; MENICONI, L. C. D. M. Um sistema prático para identificação e localização de defeitos em revestimentos de materiais compósitos utilizando shearografia. **COTEQ -186**, Salvador, 2007.
- CABRAL, T. D. Caracterização experimental de um sistema de shearografia para inspeção não destrutiva de tubulações compósitas. 2014. 108 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- GAY, D.; HOA, S. V.; TSAI, S. W. **Composite Materials: design and applications**. New York: CRC Press, 2003.
- GRUPO Rust Resinar. **Revestimentos Reforçados com Fibras de Vidro**, 2014. Disponível em: <<http://www.gruporustresinar.com.br/servicos/revestimentos-reforçados-com-fibras-de-vidro/sistema-fiberglass>>. Acesso em: 10 maio 2018.
- HUNG, Y. Y.; HO, H. P. Shearography: An optical measurement technique and applications. **Materials Science and Engineering**, April 2005. p. 61-87.
- LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgar Blücher, 2006.
- LINS, K. P. Procedimento para avaliação da profundidade de defeitos em placas de materiais compósitos usando shearografia com excitação térmica. 2012. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, , Florianópolis, 2012.
- MALLICK, P. K. Introduction: Definitions, Classifications and Applications. In: MALLICK, P. K. **Composites Engineering Handbook**. Michigan: CRC Press, 1997.
- MOHAN, N. K. Speckle Methods and Applications. In: YOSHIZAWA, T. **Handbook of OPTICAL METROLOGY: Principles and Applications**. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- PANTOJA, F. C. M. Prefácio II. In: REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. **Compósitos Estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber, 2011.
- REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. **Compósitos Estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber, 2011.

RUST Engenharia. **Galeria- Petróleo & gas**, 2014. Disponível em: <<http://www.rust.com.br/galeria/petroleo--gas>>. Acesso em: 10 maio 2018.

SCHÖNTAG, J. M. Caracterização da profundidade de defeitos em materiais compósitos utilizando shearografia com carregamento vibracional. 2009. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso Pós Graduação em Metrologia Científica e Industrial. **Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, 2009.

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

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

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

VIOTTI, M. R.; ALBERTAZZI JR., A. **Robust Speckle Metrology**: Techniques for Stress Analysis and NDT. Bellingham: SPIE PRESS, 2014.

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