

Estiven Sánchez Barrera

**CONCEPÇÃO DE UM INTERFERÔMETRO ROBUSTO
USANDO POLARIZAÇÃO PARA INSPEÇÃO COM
SHEAROGRAFIA EM AMBIENTES COM VIBRAÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na Área de Concentração Metrologia e Instrumentação da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.Eng.
Coorientador: Mauro Eduardo Benedet Dr.Eng.

Florianópolis
2016

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

Barrera, Estiven Sánchez

Concepção de um interferômetro robusto usando polarização para inspeção com shearografia em ambientes com vibração / Estiven Sánchez Barrera ; orientador, Armando Albertazzi Gonçalves Júnior ; coorientador, Mauro Eduardo Benedet. - Florianópolis, SC, 2016.

125 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Shearografia. 3. Deslocamento de fase por polarização. 4. Interferômetros robustos. 5. Medição em ambientes hostis. I. Albertazzi Gonçalves Júnior, Armando. II. Benedet, Mauro Eduardo. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

ESTIVEN SÁNCHEZ BARRERA

**CONCEPÇÃO DE UM INTERFERÔMETRO ROBUSTO
USANDO POLARIZAÇÃO PARA INSPEÇÃO COM
SHEAROGRAFIA EM AMBIENTES COM VIBRAÇÃO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica, área de concentração Metrologia e Instrumentação” e aprovada em sua forma final.

Florianópolis, 03 de Março de 2016.

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

Banca Examinadora:

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

Mauro Eduardo Benedet, Dr. Eng.
Coorientador

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

Daniel Pedro Willemann, Dott. Ing.
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Sergio Damasceno Soares, Dr.Eng.
PETROBRAS- CENPES

Este trabalho é dedicado a minha
esposa e filha “as minhas Victorias”:
Angela Victoria e Victoria.
Aos membros da minha família:
Meus pais, Mirian e Pablo
e meus irmãos:
Sebastián e Claudia

AGRADECIMENTOS

À UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina e ao governo do Brasil, que com seus programas de educação, bolsas e fomento na educação superior estão fortalecendo, o Brasil e a América do sul.

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica POSMEC da Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade e por fornecer os recursos que culminaram nesta importante etapa.

Ao meu orientador Professor Armando Albertazzi Gonçalves Jr Dr.Eng, por me orientar com muita sabedoria, paciência e profissionalismo em todo meu trabalho.

Ao meu coorientador Mauro Eduardo Benedet Dr.Eng, pelo grande apoio, orientação em todas as etapas do projeto, pela tolerância e paciência nas dificuldades.

A toda a equipe do projeto SHIC, Analucia Fantin pela confiança e apoio, Daniel Pedro Willemann, pela disponibilidade, orientação e apoio no desenvolvimento do projeto. Fabio e Claudio pela ajuda no desenvolvimento do projeto mecânico.

A meus caros colegas e amigos Thiago Destri Cabral, Marco José Ferreira e Mariana Tiemi Tamura.

Ao Técnico Elsio que sempre esteve disposto a dar o maior apoio nos ensaios, montagens e requerimentos de equipamento.

Aos estagiários Leandro Neves e Jonathan Oliveira.

A toda equipe de colaboradores e colegas de LABMETRO e da fundação CERTI.

A minha Esposa Ángela Victoria Escobar Betancourt e minha filha Victoria Sánchez Escobar, que com seu amor fizeram desta etapa uma das melhores na minha vida.

A minha família que sempre fez o possível para eu conseguir o que agora consigo ter.

“Ciência da cor deve ser considerada, em
essência, como uma ciência da mente”
—James Clerk Maxwell —

“As nações marcham para sua grandeza ao mesmo
passo que avança sua educação.”
—Simon Bolivar —

“Diante da vastidão do tempo e da imensidão do
espaço é uma alegria para mim, compartilhar uma
época e um planeta com você.”
—Carl Sagan —

RESUMO

Inspeções realizadas com técnicas interferométricas, como a shearografia, vêm se tornando cada vez mais difundidas na indústria, principalmente na indústria aeroespacial e de petróleo e gás. Essas técnicas vêm sendo cada vez mais aplicadas em campo, porém ainda com alguma limitação, visto que ao levar o sistema de medição para fora do laboratório, o mesmo ficará exposto a fatores hostis sobre os quais não se tem controle. O desenvolvimento ou melhoramento das técnicas interferométricas, com o objetivo de torná-las robustas e capazes de operar sobre condições de trabalho mais agressivas, como em chão de fábrica ou ambientes hostis, tem-se tornado cada vez mais importante. A shearografia é uma técnica que apresenta bons resultados em campo, mas a configuração interferométrica atual continua sendo sensível a alguns fatores como a vibração.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de três configurações de interferômetros para aplicação em shearografia. As três configurações utilizam polarização como meio para o deslocamento de fase. Este trabalho descreve e discute cada uma das configurações e seus princípios. Além dos testes em bancada, testes em ambiente com vibração foram também realizados. Obtiveram-se duas configurações robustas e flexíveis para ambientes hostis, principalmente frente aos efeitos das vibrações.

Palavras-chave: Shearografia. Deslocamento de fase por polarização. Interferômetros robustos. Medição em ambientes hostis.

ABSTRACT

Inspections with interferometric techniques, such as shearography, are becoming increasingly widespread in the industry, especially for inspections in the aerospace and oil and gas industry. These techniques are being increasingly applied in the field. However still with some limitations, because bringing interferometric systems out of the lab, it will be exposed to many environmental factors that are normally not controlled. The development or improvement of interferometry techniques, in order to make them robust and capable of operating on more aggressive working conditions, such as in floor manufacture or harsh environments, has become increasingly important. Shearography is an intrinsically robust interferometric technique that is able to work in the field, but there are limits. The current interferometry configuration remains sensitive to factors such as vibration.

The current work presents three interferometers configurations for use in shearography systems. The three configurations employ polarization for phase shifting. This work describes their principles and discusses each one of the three settings. In addition, their evaluations using a vibration induced test bench were also conducted. The results pointed out two robust and flexible configurations convenient for harsh environments, especially when considering the effects of vibrations.

Keywords: Shearography. Phase shifting by polarization. Robust interferometers. Measurement in harsh environment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Interferência ou superposição de duas ondas: (a) Construtiva, (b) Intermediária, (c) Destrutiva.....	3
Figura 2.2 Padrão de <i>speckle</i>	5
Figura 2.3 Formação do <i>speckle</i> objetivo.....	5
Figura 2.4 Formação do <i>speckle</i> subjetivo.	6
Figura 2.5 Variação do tamanho do <i>speckle</i> com uma abertura crescente (esquerda para direita e de cima para baixo).	7
Figura 2.6 Configuração do interferômetro em shearografia.	8
Figura 2.7 Configuração da montagem com sensibilidade fora do plano.	9
Figura 2.8 Superposição dos pontos depois de uma deformação na superfície.	10
Figura 2.9 Configuração da montagem com iluminação e interferômetro de shearografia.	12
Figura 2.10 Exemplo de resultado com ESPI e Shearografia.....	13
Figura 2.11 Mapa da Diferença de Fases obtida com shearografia.....	15
Figura 2.12 Relação do deslocamento de fase e seu correspondente deslocamento no PZT.....	16
Figura 2.13 Esquema da deformação em um material compósito com defeito ao sofrer uma deformação por carregamento mecânico.....	17
Figura 2.14 Esquema da deformação em um material compósito com defeito ao sofrer uma deformação por aquecimento.	18
Figura 2.15 Esquema da deformação em um material compósito com defeito ao sofrer uma deformação por redução da pressão “vácuo”.	19
Figura 2.16 Esquema da deformação em um material compósito com defeito ao sofrer um carregamento vibracional.	19
Figura 3.1 Exemplo de um ambiente hostil.....	24
Figura 3.2 Principais fontes externas que atuam sobre o interferômetro.	24
Figura 3.3 Efeitos da temperatura nas medições com interferometria. .	25
Figura 3.4 Efeitos da umidade nas medições com interferometria.....	26
Figura 3.5 Efeitos da vibração nas medições com interferometria.....	27
Figura 3.6 Efeitos da radiação nas medições com interferometria.....	28
Figura 3.7 Princípio de estabilização ativa.....	30
Figura 3.8 Cabeçote N4f de medição por shearografia desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina.....	34
Figura 3.9 Esquema de fixação do cabeçote em um tubo para inspeção.	35

Figura 4.1. Composição da luz, por ondas elétrica e magnética ortogonais.....	39
Figura 4.2 Esquema de uma onda eletromagnética passando por um polarizador.	41
Figura 4.3 Efeito de uma onda ao passar por uma placa de atraso de $\lambda/4$ (90°).	42
Figura 4.4 <i>Beam Splitter</i> : à esquerda regular, à direita polarizado.	43
Figura 4.5 Configuração de um prisma de Wollaston.....	44
Figura 4.6 Configuração do sistema óptico para deslocamento de fase por polarização.....	45
Figura 4.7. Diagrama do sistema óptico e do comportamento dos feixes passando pelo sistema.	46
Figura 4.8. Ligação esquemática das partes do dispositivo de shearografia por polarização.	47
Figura 4.9. Esquema da configuração de elementos na configuração Multiplacas.....	48
Figura 4.10 Esquema da configuração de elementos na configuração DP4f.....	49
Figura 4.11 Esquema da configuração de elementos na configuração W4f.	50
Figura 5.1 Diagrama da configuração de interferômetro para validação do princípio de deslocamento por polarização.....	51
Figura 5.2 Montagem feita para a avaliação de acordo com o diagrama da Figura 5.1.	52
Figura 5.3 Conjunto de imagens do padrão de interferência, obtido girando o polarizador a cada 20°	53
Figura 5.4 Perfil de linha para as imagens do padrão de interferência em P(0), P(60) e P(120).	53
Figura 5.5 Montagem física da Configuração Multiplacas.	54
Figura 5.6 Imagens resultantes do primeiro teste da configuração I, tomadas girando o polarizador a cada 45°	55
Figura 5.7 Efeito da placa de retardo na polarização ao ficar desalinhada ou ter um retardo diferente a $\lambda/4$	56
Figura 5.8 Resultado na polarização ao adicionar a placa de $\lambda/2$ depois da placa de $\lambda/4$	56
Figura 5.9 Imagens resultantes ao adicionar a placa de $\lambda/2$. Tomadas girando o polarizador cada 45°	57
Figura 5.10 Diagrama do corpo de prova.....	57
Figura 5.11 Mapa de fase resultantes da configuração I.	58
Figura 5.12 Montagem da Configuração DP4f.	58
Figura 5.13 Imagem com deslocamento lateral na configuração DP4f.	59

Figura 5.14 Imagens de interferência obtidas girando o polarizador a cada 45°.....	60
Figura 5.15 Mapa de fase resultante usando a cabeçote DP4f.	60
Figura 5.16 Desenho do protótipo do cabeçote DP4f.....	61
Figura 5.17 Protótipo de cabeçote WP4f e cabeçote 4f.....	62
Figura 5.18 Imagem tomada com o cabeçote W4f.....	62
Figura 5.19 Diagrama de percurso dos raios pelo sistema ótico usando o prisma de Wollaston.....	63
Figura 5.20 Detalhamento da formação das imagens e do percurso dos raios pelo prisma de Wollaston.	64
Figura 5.21 Testes de shearografia com o cabeçote W4f.....	64
Figura 5.22 Desenho do protótipo do cabeçote W4f.....	65
Figura 5.23 Captura da aplicação desenvolvida em LabVIEW® para a análise dos pixels.....	66
Figura 5.24 Variação da intensidade dos pixels ao girar o polarizador.	66
Figura 5.25 Variação da intensidade dos pixels ao girar o polarizador depois do alinhamento minucioso.	67
Figura 5.26 Análise de Fourier dos dados obtidos nos quatro pixels girando o polarizador.	68
Figura 5.27 Análise de fase com software Lissajous.	69
Figura 5.28 Variação da intensidade ao pular a faixa de 180° a 360° no giro do polarizador.	69
Figura 5.29 Análise de fase com software Lissajous depois da correção.	70
Figura 5.30 À esquerda, mapa de fase resultante utilizando o método de meio giro do polarizador. À direita, mapa de fase resultante do método tradicional.....	70
Figura 5.31 Resultado dos testes feitos com o algoritmo de oito e quatro passos para duas deformações.	72
Figura 5.32 Corpo de prova para os ensaios com carregamento térmico. À esquerda, vista frontal. À direita, vista posterior.	73
Figura 5.33 Resultado dos testes feitos com carregamento térmico utilizando os algoritmos de 4 e 8 passos.	74
Figura 5.34 Representação dos graus de liberdade do polarizador.	75
Figura 5.35 Montagem para a movimentação do polarizador em seus diferentes graus de liberdade.....	76
Figura 5.36 Mapas de fase resultantes ao movimentar o polarizador ao logo de x	77
Figura 5.37 Mapas de fase resultantes ao movimentar o polarizador ao logo de y	78

Figura 5.38 Mapas de fase resultantes ao movimentar o polarizador ao longo de z	78
Figura 5.39 Mapas de fase resultantes ao girar o polarizador entorno a y	79
Figura 5.40 Mapas de fase resultantes ao deslocar o polarizador em posições aleatórias para cada imagem.....	79
Figura 5.41 Esquema da configuração para avaliação dos componentes externos ao interferômetro.	80
Figura 5.42 Mapas de fase resultantes ao deslocar o corpo ao longo de x	81
Figura 5.43 Mapas de fase resultantes ao deslocar o corpo ao longo de z	81
Figura 5.44 Mapas de fase resultantes ao deslocar o laser ao longo de l	82
Figura 5.45 Resultado do deslocamento do corpo ao longo de z sem deformação.....	83
Figura 5.46 Resultado do deslocamento do corpo ao longo de x sem deformação.....	83
Figura 5.47 Resultado do deslocamento do corpo ao longo de z sem deformação e deslocamento vertical.	84
Figura 5.48 Resultado do deslocamento do corpo ao longo de z sem deformação e deslocamento horizontal girado 180°	84
Figura 5.49 Mapa de fase resultante depois da deformação. À esquerda: resultado da deformação sem vibração. À direita: simulando uma vibração em z	85
Figura 5.50 Mapa de fase resultante do primeiro teste com vibração...	86
Figura 5.51 Montagem feito no segundo teste com vibração.....	86
Figura 5.52 Resultado do segundo teste com vibração.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Relação entre características robustas e agentes agressivos.	33
Tabela 4.1 Exemplos de diferentes tipos de polarização e seu correspondente vetor de Jones J.	40
Tabela 5.1 Tolerância aos deslocamentos do polarizador no deslocamento de fase por polarização.	88
Tabela 5.2 Tolerância aos deslocamentos do corpo de prova nos ensaios com shearografia.	89
Tabela 0.1 Principais elementos ópticos utilizados	99
Tabela 0.2 Parâmetros de configuração.	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

END – Ensaio Não Destrutivo
ESPI – *Electronic Speckle Pattern Interferometry*
PZT – Atuador piezoelétrico – Piezocerâmico, Ziconato de Titanato
CMOS – *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
FPS – *Frames Per Second*
WP – *Wave Plate*
QWP – *Quarter Wave Plate*
HWP – *Half Wave Plate*
HP – *Horizontal Polarization*
VP – *Vertical Polarization*
CDF – Configuração de Deslocamento de Fase
DDL P – Dispositivo de Deslocamento Lateral Polarizado
BS – *Beam-Splitter*
PBS – *Polarizing Beam-Splitter*
CCD – *Charge-Coupled Device*

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	1
1.3. ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	2
CAPÍTULO II	3
2. SHEAROGRAFIA	3
2.1. INTERFERÊNCIA.....	3
2.2. <i>SPECKLE</i>	4
2.3. PRINCÍPIOS DA SHEAROGRAFIA.....	7
2.3.1. Determinação do vetor sensibilidade.....	9
2.3.2. Determinação do valor de fase.....	13
2.3.3. Deslocamento de fase.....	15
2.4. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS COM SHEAROGRAFIA..	16
2.4.1. Carregamento mecânico.....	16
2.4.2. Carregamento térmico.....	17
2.4.3. Vácuo.....	18
2.4.4. Vibração.....	18
2.5. PRINCIPAIS FONTES DE ERRO.....	20
2.5.1. Variação da velocidade de propagação.....	21
2.5.2. Variação do percurso óptico.....	21
2.5.3. Variação da frequência do laser.....	22
2.5.4. Análise do capítulo.....	22
CAPÍTULO III	23
3. INTERFEROMETRIA EM AMBIENTES HOSTIS	23
3.1. INTRODUÇÃO.....	23
3.2. AMBIENTES HOSTIS.....	23
3.2.1. Temperatura.....	25
3.2.2. Umidade.....	25
3.2.3. Vibração.....	26
3.2.4. Radiação e iluminação de fundo.....	27
3.3. SOLUÇÕES CLÁSSICAS.....	27
3.3.1. Isolamento / Compensação.....	28
3.3.1.1. Encapsulamento.....	28
3.3.1.2. Isoladores de vibrações.....	29
3.3.1.3. Estabilização ativa.....	29
3.3.2. Robustez.....	30
3.3.2.1. <i>Quasi-equal-path</i>	31
3.3.2.2. <i>Fast/One-shot</i>	31

3.3.2.3.	Autocompensação	32
3.3.2.4.	Algoritmos Robustos.....	32
3.3.2.5.	Princípio robusto	32
3.3.2.6.	Comparação dos métodos.....	33
3.4.	SHEAROGRAFIA EM AMBIENTES HOSTIS.....	34
3.4.1.	Aspectos positivos.....	34
3.4.2.	Aspectos negativos.....	36
3.5.	ALTERNATIVAS PARA A REDUÇÃO DOS EFEITOS PROVOCADOS PELA VIBRAÇÃO.....	36
3.5.1.	Concepção rígida.....	36
3.5.2.	Redução do tempo de aquisição	37
3.5.3.	Algoritmo robusto	37
3.5.4.	Estabilização ativa de fase	37
3.5.5.	Deslocamento de fase por polarização.....	37
	CAPÍTULO IV	39
4.	DESENVOLVIMENTO DO INTERFERÔMETRO ROBUSTO.....	39
4.1.	POLARIZAÇÃO.....	39
4.1.1.	Filtro polarizador	41
4.1.2.	Placas de atraso (<i>Wave plate</i> WP)	41
4.1.3.	<i>Beam Splitter</i>	43
4.1.4.	Prisma de Wollaston	44
4.1.5.	Deslocamento de fase por polarização.....	44
4.2.	CONFIGURAÇÃO MULTIPLACAS	47
4.2.1.	Princípio de funcionamento.....	48
4.3.	CONFIGURAÇÃO DP4F	49
4.3.1.	Princípio de funcionamento.....	49
4.4.	CONFIGURAÇÃO W4F	50
4.4.1.	Princípio de funcionamento.....	50
	CAPÍTULO V.....	51
5.	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL.....	51
5.1.	VALIDAÇÃO DO DESLOCAMENTO DE FASE POR POLARIZAÇÃO	51
5.2.	CONFIGURAÇÃO MULTIPLACAS	54
5.2.1.	Resultados	54
5.3.	CONFIGURAÇÃO DP4F	58
5.3.1.	Resultados	58
5.4.	CONFIGURAÇÃO W4F	61
5.4.1.	Resultados	61
5.5.	DIFICULDADES	64

5.6.	AVALIAÇÃO DA ROBUSTEZ NO DESLOCAMENTO DE FASE POR POLARIZAÇÃO	75
5.7.	VALIDAÇÃO DOS COMPONENTES EXTERNOS AO INTERFERÔMETRO.....	80
5.8.	TESTES COM VIBRAÇÃO	85
5.9.	SÍNTESE E ANÁLISE DOS RESULTADOS	87
	CAPÍTULO VI	91
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
6.1.	CONCLUSÕES	91
6.1.1.	CONFIGURAÇÃO MULTIPLACAS.....	92
6.1.2.	CONFIGURAÇÃO DP4F	92
6.1.3.	CONFIGURAÇÃO W4F	92
6.1.4.	CONCLUSÃO GERAL	93
6.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
	REFERÊNCIAS	95
	APÊNDICE A	99

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

A shearografia é uma técnica óptica interferométrica capaz de medir campos de pequenas deformações ocorridas nas superfícies dos materiais (Jones & Wykes, 1983,1989). Apresenta aspectos positivos, como grande sensibilidade às deformações, baixa sensibilidade a deslocamentos de corpo rígido; possibilitando a inspeção não destrutiva, sem contato e propiciando considerável aumento na velocidade de inspeção. (Viotti & Albertazzi, 2014)

No Laboratório de Metrologia e Automatização (LABMETRO) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), têm sido desenvolvidos diferentes projetos de pesquisa envolvendo a aplicação da técnica de shearografia e contribuindo para a ampliação da sua robustez, principalmente na inspeção de reparos com compósitos na indústria de petróleo e gás. (Paes, 2013) (Pereira, 2012) (Souza, 2012) (Sesselmann, 2000) (Schöntag, 2009)

Tais projetos resultaram em dispositivos de shearografia compactos e flexíveis. Esses dispositivos apresentam bons resultados em ambiente laboratorial, porém ainda apresentam dificuldades na medição em ambientes com muita vibração, como por exemplo, em uma plataforma petrolífera ou no interior de um navio, onde existem equipamentos tais como bombas, motores etc, operando no mesmo ambiente de inspeção.

Essas dificuldades são a principal motivação no desenvolvimento de uma nova configuração que resulte em um interferômetro robusto que é o principal componente de um sistema de shearografia. Este trabalho propõe algumas configurações ópticas utilizando polarizadores, as quais foram idealizadas com o intuito de apresentar maior imunidade à vibração.

1.2. OBJETIVOS

Tem-se como objetivo geral deste trabalho:

- Conceber, construir e validar um interferômetro com deslocamento lateral para medições com shearografia que seja capaz de operar em ambientes hostis.

Objetivos específicos:

- Mapear e classificar as principais fontes de perturbações nas medições em campo realizadas na indústria do petróleo e gás.
- Testar novas alternativas construtivas de interferômetros potencialmente mais robustas.
- Avaliar o sistema construído em laboratório e em ambientes agressivos.
- Gerar patente e artigos em congressos ou periódicos.

1.3. ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este trabalho está distribuído em seis partes. Depois da presente introdução, segue a revisão bibliográfica sobre shearografia, seus princípios, aplicações e principais fontes de erros.

Posteriormente, no terceiro capítulo, é abordado o conceito de interferômetro robusto, tipos de ambiente de trabalho, as soluções clássicas aos fatores de perturbação, tipos de isolamento e robustez, a aplicação da shearografia em ambientes hostis e as alternativas propostas para redução dos efeitos provocados pela vibração.

No quarto capítulo é apresentado o desenvolvimento do interferômetro robusto, iniciando com a fundamentação física e descrição dos componentes necessários para a execução do trabalho. Em seguida, são apresentadas três diferentes configurações na construção do interferômetro robusto.

Na avaliação experimental apresentada no quinto capítulo serão descritos os ensaios e resultados das três diferentes configurações.

No sexto e último capítulo serão apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos sobre o sistema projetado e formas de melhorar seus resultados.

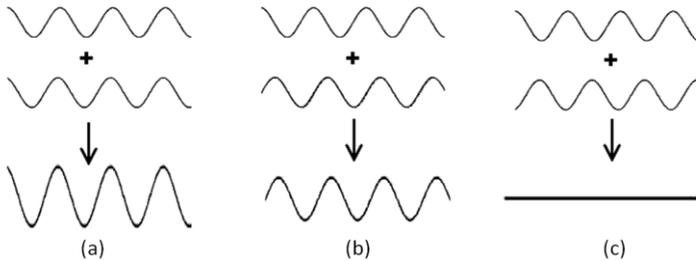
CAPÍTULO II

2. SHEAROGRAFIA

2.1. INTERFERÊNCIA

A interferência é o fenômeno no qual duas ou mais ondas superpõem-se para formar uma nova onda resultante (Hecht & Zajac, 1974). Esta onda resultante pode ter um caráter destrutivo, quando as fases das ondas incidentes são contrárias, ou podem ter um caráter construtivo, se as ondas incidentes estiverem em fase. Na Figura 2.1 tem-se um exemplo dos tipos de interferência para ondas com mesmas frequências e amplitudes.

Figura 2.1 Interferência ou superposição de duas ondas: (a) Construtiva, (b) Intermediária, (c) Destrutiva.



Fonte: Autor.

Na análise matemática assume-se então que duas ondas podem ser matematicamente descritas na notação complexa por (Kjell, 2002):

$$u_1 = U_1 e^{i\phi_1} \quad (2.1)$$

e

$$u_2 = U_2 e^{i\phi_2} \quad (2.2)$$

Onde:

U_1 e U_2 são as componentes da amplitude das ondas.

ϕ_1 e ϕ_2 são os valores de fase de cada onda.

Em um meio linear, a soma dessas ondas resulta em: $u = u_1 + u_2$

No caso de ondas luminosas, a quantidade observável é a intensidade I que matematicamente é dada por:

$$I = |u|^2 = |u_1 + u_2|^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2\cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (2.3)$$

ou

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos\Delta\phi \quad (2.4)$$

Onde:

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (2.5)$$

O termo $2\sqrt{I_1I_2}\cos\Delta\phi$ é denominado termo de interferência.

Analisando o termo de interferência, pode-se perceber que o maior valor da intensidade I ocorre quando $\cos\Delta\phi = 1$, então:

$$\begin{aligned} \cos\Delta\phi = 1, \quad \text{com } \Delta\phi = 2n\pi \\ n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{aligned} \quad (2.6)$$

Neste caso, as ondas estarão em fase e a interferência é denominada construtiva (Figura 2.1a).

Da mesma forma, tem-se o menor valor da intensidade I quando $\cos\Delta\phi = -1$:

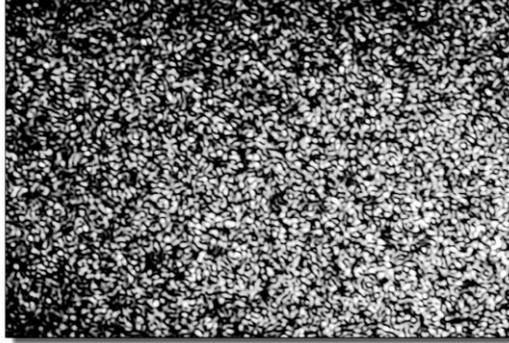
$$\begin{aligned} \cos\Delta\phi = -1, \quad \text{com } \Delta\phi = (2n + 1)\pi \\ n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{aligned} \quad (2.7)$$

Para este caso, as ondas estarão com fases opostas e a interferência é destrutiva (Figura 2.1.c). Em outros casos a interferência não será completamente construtiva ou destrutiva, resultando uma combinação intermediária (Figura 2.1.b).

2.2. SPECKLE

“*Speckle*” é a denominação atribuída ao padrão aleatório de pontos claros e escuros de aspecto granular formado pela incidência da luz coerente de um laser sobre uma superfície rugosa, conforme mostrado na Figura 2.2 (Goodman, 1976).

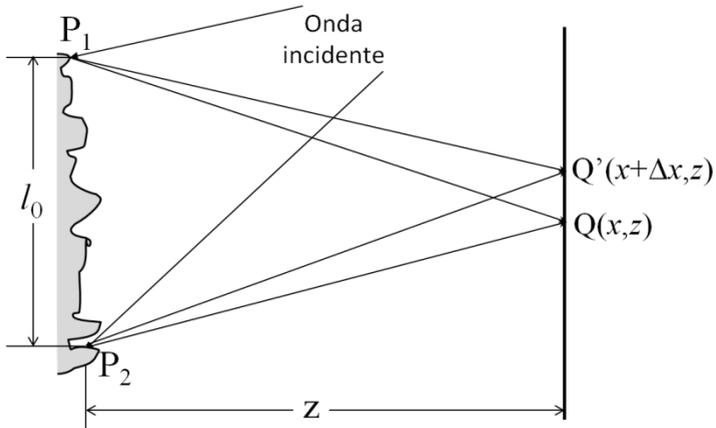
Figura 2.2 Padrão de *speckle*.



Fonte: (Cooper, 2010).

Ao incidir uma luz coerente, de comprimento de onda λ , numa superfície de rugosidade ξ e tendo que $\xi > \lambda$, tem-se como resultado uma reflexão difusa e aleatória dos raios incidentes na superfície (Goodman, 1975) (Dainty, 1976). O padrão de *speckles* formado livremente no espaço é denominado “*speckle objetivo*” (Figura 2.3). Se a reflexão dos raios atravessa um sistema óptico, como um conjunto de lentes, formando uma imagem num anteparo ou sensor de imagens, esse padrão é denominado de “*speckle subjetivo*” (Figura 2.4).

Figura 2.3 Formação do *speckle* objetivo.



Fonte: Autor.

O tamanho médio do granulado formado pelo *speckle* objetivo (d_{sp}) pode ser determinado de acordo com a seguinte equação (Dainty, 1976):

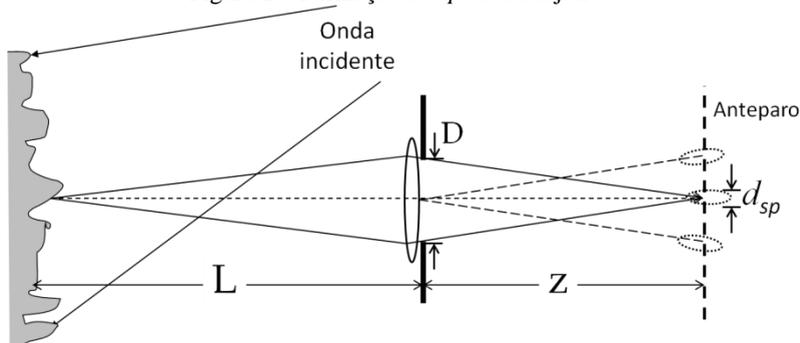
$$d_{sp} = \frac{\lambda z}{l_0} \quad (2.8)$$

Onde λ é o comprimento de onda da fonte de iluminação, z é a distância entre a superfície e o anteparo e l_0 é a distância entre os pontos P1 e P2.

De acordo com a Equação (2.8), pode ser visto que o tamanho do *speckle* depende do tamanho da área iluminada, bem como da distância entre a tela e o objeto. Portanto, o tamanho do *speckle* objetivo não depende do sistema óptico utilizado para observá-lo.

A Figura 2.4 mostra o caso do *speckle* subjetivo, o qual é formado por um sistema óptico.

Figura 2.4 Formação do *speckle* subjetivo.



Fonte: Autor.

Neste caso, é possível observar que múltiplos feixes que passam pelo sistema óptico contribuem para a formação de um ponto luminoso. A figura formada por cada ponto, de acordo com o princípio da difração, dará origem à formação de um disco de Airy (Airy, 1835). O tamanho médio do *speckle* corresponderá ao raio do disco de Airy, da forma:

$$d_{sp} = 1,22 \frac{\lambda z}{D} \quad (2.9)$$

Onde z é a distância do diafragma até o plano de formação da imagem, ou anteparo, e D é o diâmetro de abertura do diafragma.

Tendo em conta que M_g é o fator de ampliação do sistema óptico e f é o comprimento focal, tem-se que:

$$z = (1 + M_g)f \quad (2.10)$$

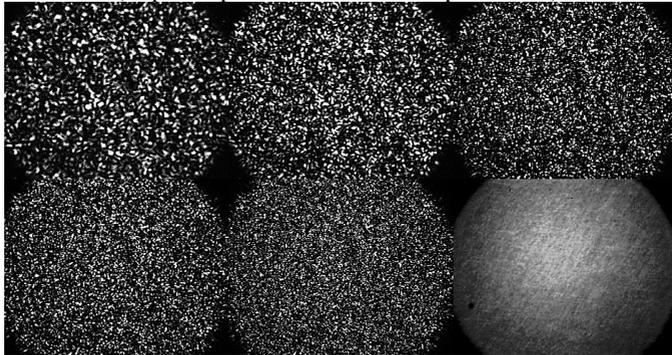
Assim, tem-se que:

$$d_{sp} = 1,22 \frac{\lambda(1 + M_g)f}{D} = 1,22\lambda F_{\#}(1 + M_g) \quad (2.11)$$

Onde $F_{\#} = f/D$, denominado de número de abertura ou número F.

Sabendo que o valor $F_{\#}$ é inversamente proporcional ao diâmetro da abertura, quanto menor a abertura maior será o tamanho dos grãos do *speckle*. Na Figura 2.5 é possível observar a variação do tamanho do granulado do *speckle* em função da abertura.

Figura 2.5 Variação do tamanho do *speckle* com uma abertura crescente (esquerda para direita e de cima para baixo).

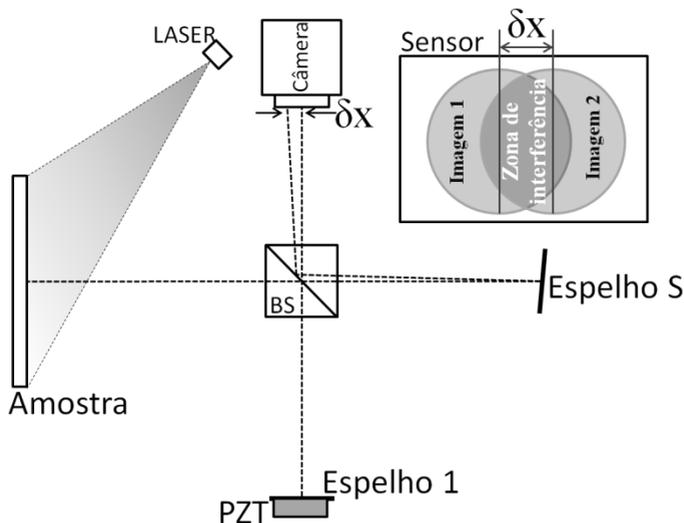


Fonte: (Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, 2008).

2.3. PRINCÍPIOS DA SHEAROGRAFIA

A configuração comumente utilizada para testes com shearografia é mostrada na Figura 2.6. Nesta figura, é possível ver que a configuração é similar ao interferômetro de Michelson. O interferômetro de Michelson é composto basicamente por um divisor de feixes e dois espelhos dispostos perpendicularmente.

Figura 2.6 Configuração do interferômetro em shearografia.



Fonte: Autor.

Na shearografia, a interferência é formada pelo deslocamento lateral da imagem formada pela superposição de pontos vizinhos da superfície. Essa interferência ocorre devido à inclinação de um dos espelhos que compõem o interferômetro. Este deslocamento é denominado na literatura técnica como “*Shearing*” referido neste trabalho como “deslocamento lateral” (Marques, 2009).

Ao fazer o deslocamento lateral, no interferômetro, forma-se uma zona de interferência (Figura 2.6) na qual a intensidade resultante de cada ponto se deve à interferência de dois feixes deslocados em “ δx ”. Então a fase da onda resultante depende da diferença de fase entre os pontos que interferem. Considerando P_1 e P'_2 como os pontos que interferem no sensor da câmera, tem-se então que a diferença de fase entre eles é dada por:

$$\Delta\phi_{P_1P'_2} = \phi(x + \delta x, y) - \phi(x, y) \quad (2.12)$$

A intensidade resultante é determinada pela diferença de fase de acordo com a equação (2.4), onde, a intensidade do ponto é então dependente da variação de fase entre pontos vizinhos $\Delta\phi_{P_1P'_2}$. A equação reescrita fica da forma:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi_{P_1 P'_2} \quad (2.13)$$

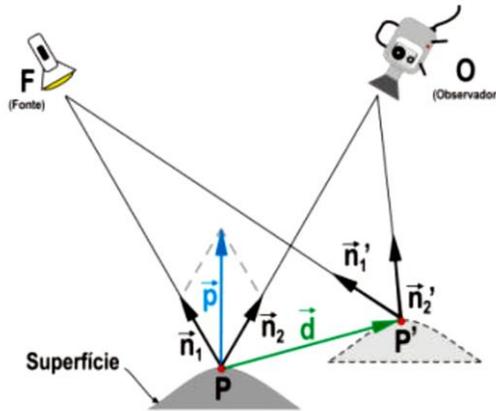
Essa equação mostra que, em shearografia, a intensidade em um ponto é insensível a deslocamentos de corpo rígido, visto que deslocamentos de corpo rígido provocam variações de fase uniformes nos pontos da superfície.

O modelo matemático apresentado no próximo item ajuda a interpretar o resultado de medições feitas com shearografia.

2.3.1. Determinação do vetor sensibilidade

Na determinação do vetor sensibilidade será considerada a montagem da Figura 2.7.

Figura 2.7 Configuração da montagem com sensibilidade fora do plano.



Fonte: (Willemann D. P., 2002).

Nesta configuração, é possível observar que, depois de uma deformação na superfície, o ponto P sofre um deslocamento \vec{d} , atingindo uma nova posição P' , representada de forma exagerada na figura. Quando as duas ondas luminosas, correspondentes ao estado inicial e final, são reconstruídas simultaneamente, a intensidade luminosa do ponto P é função da diferença de fase causada pela diferença entre os caminhos ópticos FPO e $FP'O$. A intensidade luminosa observada será mais intensa se as ondas estiverem em fase e pode-se anular se estiverem completamente fora de fase (Cloud, 1998).

Pode-se observar que a diferença do caminho óptico é determinada pelo equacionamento:

$$\Delta = \overline{FP} + \overline{OP} - (\overline{FP'} + \overline{OP'}) \quad (2.14)$$

$$\Delta = -(\overline{FP'} - \overline{FP}) + (\overline{OP} - \overline{OP'}) \quad (2.15)$$

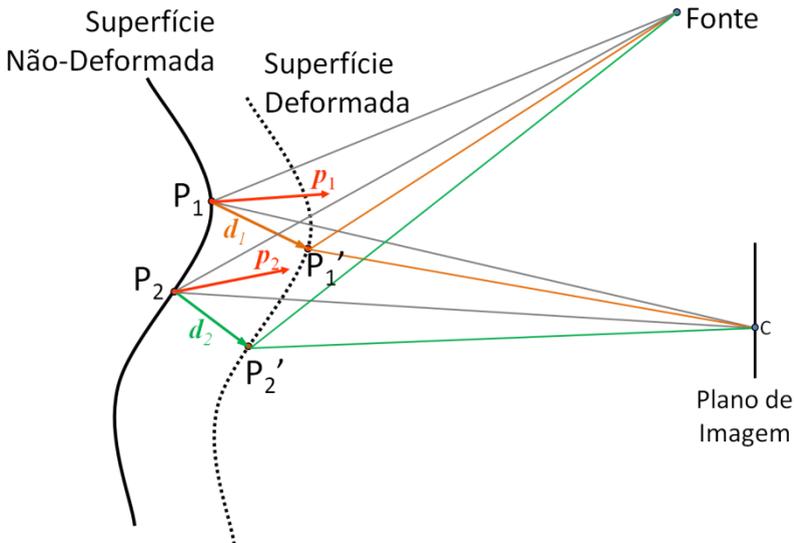
$$\Delta = \vec{d} \cdot \vec{n}_1 + \vec{d} \cdot \vec{n}_2 = \vec{d} \cdot (\vec{n}_1 + \vec{n}_2) = \vec{d} \cdot \vec{p} \quad (2.16)$$

O vetor \vec{p} resulta da soma dos vetores unitários \vec{n}_1 e \vec{n}_2 . Este vetor é denominado *vetor sensibilidade* (Jones & Wykes, 1983,1989).

Esta configuração é também referenciada como sensibilidade “fora do plano”, pois o vetor \vec{p} fica orientado principalmente nessa direção.

A Figura 2.8 apresenta os traçados dos raios de dois pontos vizinhos que serão superpostos no mesmo ponto da imagem pelo deslocamento lateral. Eles são representados antes e após a deformação da superfície.

Figura 2.8 Superposição dos pontos depois de uma deformação na superfície.



Fonte: (Albertazzi, 2014).

Pode-se observar que a diferença de caminho para os dois raios que deixam a fonte de luz, incidem nos pontos P_1 e P_2 e são reunidos no mesmo ponto do plano da imagem é calculada por:

$$\Delta_1 = \vec{d}_1 \cdot \vec{p}_1 \quad (2.17)$$

$$\Delta_2 = \vec{d}_2 \cdot \vec{p}_2 \quad (2.18)$$

Supondo agora que os vetores \vec{d}_1 e \vec{d}_2 têm componentes tridimensionais, então \vec{d}_1 e \vec{d}_2 ficarão da forma:

$$\vec{d}_1 = u\vec{e}_x + v\vec{e}_y + w\vec{e}_z \quad (2.19)$$

$$\vec{d}_2 = (u + \delta u)\vec{e}_x + (v + \delta v)\vec{e}_y + (w + \delta w)\vec{e}_z \quad (2.20)$$

A intensidade resultante da interferência, entre os pontos que estarão sendo superpostos pelo deslocamento lateral, depende da diferença de fase entre eles, que é consequência da diferença entre os caminhos percorridos. Para calcular a diferença de caminhos ópticos percorridos tem-se que:

$$\Delta = \Delta_2 - \Delta_1 = \vec{p} \cdot (\vec{d}_2 - \vec{d}_1) \quad (2.21)$$

$$\Delta = \vec{p} \cdot (\delta u\vec{e}_x + \delta v\vec{e}_y + \delta w\vec{e}_z) \quad (2.22)$$

Visto que a ordem de grandeza da distância entre o observador e a peça é muito maior que a dos deslocamentos observados na peça, é possível considerar que: $\vec{p} = \vec{p}_1 \approx \vec{p}_2$.

Sendo assim, tem-se então que para deslocamentos laterais nas direções x e y as respectivas variações de caminho são:

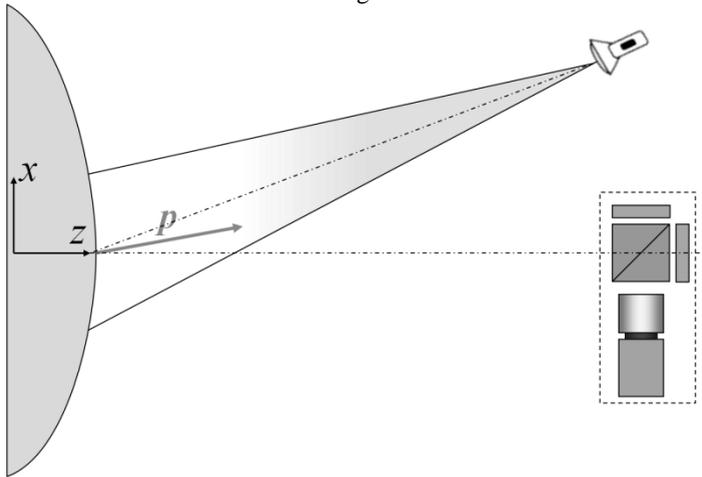
$$\Delta_x = \left(\frac{\delta u}{\delta x} \vec{p} \cdot \vec{e}_x + \frac{\delta v}{\delta x} \vec{p} \cdot \vec{e}_y + \frac{\delta w}{\delta x} \vec{p} \cdot \vec{e}_z \right) \delta x \quad (2.23)$$

$$\Delta_y = \left(\frac{\delta u}{\delta y} \vec{p} \cdot \vec{e}_x + \frac{\delta v}{\delta y} \vec{p} \cdot \vec{e}_y + \frac{\delta w}{\delta y} \vec{p} \cdot \vec{e}_z \right) \delta y \quad (2.24)$$

No caso apresentado na Figura 2.9 tem-se que o vetor \vec{p} terá apenas componentes na direção x e z . A variação do caminho para o deslocamento lateral em x fica então:

$$\Delta_x = \left(\frac{\delta u}{\delta x} \vec{p}_x + \frac{\delta w}{\delta x} \vec{p}_z \right) \delta x \quad (2.25)$$

Figura 2.9 Configuração da montagem com iluminação e interferômetro de shearografia.



Fonte: (Albertazzi, 2014).

Considerando que o deslocamento de fase $\Delta\phi$ é calculado a partir da diferença de caminho Δ e do comprimento de onda λ por:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta \quad (2.26)$$

Que neste caso torna-se:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta_x = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \vec{p}_x + \frac{\partial w}{\partial x} \vec{p}_z \right) \delta x \quad (2.27)$$

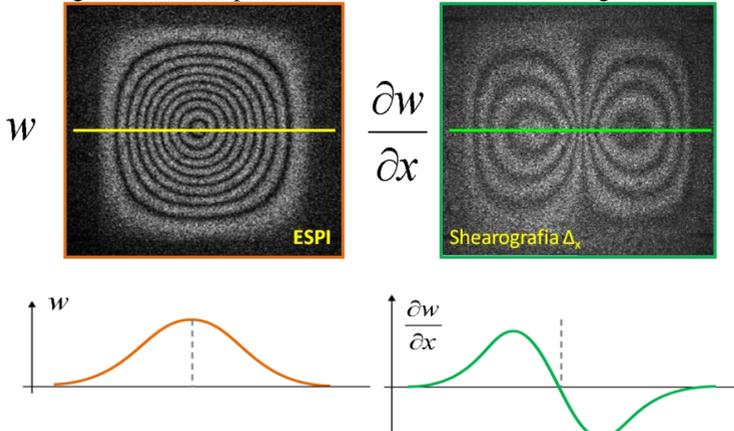
Pode-se observar que a defasagem é definida pela variação do deslocamento em relação à direção do deslocamento lateral δx , que resulta na forma característica do resultado das medições feitas com shearografia, onde a grandeza medida é a derivada do deslocamento.

Na Figura 2.10 é possível observar um exemplo de padrão de franja característico da medição do campo de deslocamentos (w), obtido com a técnica ESPI (Viotti & Albertazzi, 2014). A segunda imagem da Figura 2.10 mostra um padrão de franjas característico de shearografia, onde a grandeza medida é derivada do deslocamento ($\partial w/\partial x$).

Na Figura 2.10, tem-se o resultado da diferença das imagens em diferentes estados de deformação, mas o valor realmente importante e significativo na determinação da deformação é o valor de fase.

A seguir será descrito um método para a determinação do valor de fase.

Figura 2.10 Exemplo de resultado com ESPI e Shearografia.



Fonte: (Albertazzi, 2014).

2.3.2. Determinação do valor de fase

O método de “*Phase Shifting*” (Kjell, 2002) consiste em fazer deslocamentos de fase conhecidos em um dos braços do interferômetro com o intuito de se obter diferentes resultados de interferência, e assim ter informações suficientes para determinar a fase. De acordo com a equação (2.13), considerando quatro defasamentos de $\pi/2$, em um dos braços do interferômetro, tem-se então que:

$$\begin{aligned}
 I_0 &= I_f + I_M \cos(\phi + 0) \\
 I_{90} &= I_f + I_M \cos\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right)
 \end{aligned}
 \tag{2.28}$$

$$I_{180} = I_f + I_M \cos(\phi + \pi)$$

$$I_{270} = I_f + I_M \cos\left(\phi + \frac{3\pi}{2}\right)$$

Onde:

$I_f = I_1 + I_2$: Soma das amplitudes das intensidades

$I_M = 2\sqrt{I_1 I_2}$: Intensidade de modulação.

Combinando as equações (2.28) é possível obter explicitamente o valor de fase:

$$\phi = \arctan \left[\frac{I_{270} - I_{90}}{I_0 - I_{180}} \right]; \quad -\pi \leq \phi \leq \pi \quad (2.29)$$

De acordo com os sinais do numerador e denominador da equação (2.29) consegue-se determinar os valores de fase apenas no intervalo de $-\pi$ até π , isto é, o ângulo cômputo correspondente à primeira volta. A determinação do valor completo da fase é feita através de um algoritmo de remoção de salto de fase (C. Ghiglia & D. Pritt, 1998).

Quando o conjunto de valores de fase é calculado e representado para todos os pixels de uma imagem, forma-se o denominado mapa de fases. Ao ser representado em imagens monocromáticas com 8 bits de resolução, que apresentam 256 níveis de cinza, adota-se uma escala linear em que 256 níveis de cinza correspondem a um valor de fase de 2π . Assim, se o valor da fase for *zero*, o pixel será visualizado na cor preta, se o valor de fase for 255, o pixel será visualizado na cor branca. Valores intermediários de fase serão representados nos vários tons de cinza restantes.

O mapa de fases de uma superfície com *speckle* apresenta composição tipicamente aleatória, sem um padrão visual que o identifique. A imagem resultante da diferença dos mapas de fases do estado normal ϕ e do estado carregado ϕ' é denominada de “Mapa de Diferença de Fases” ($\Delta\phi$). Este apresenta um padrão visual semelhante ao das franjas de interferência, (Figura 2.11).

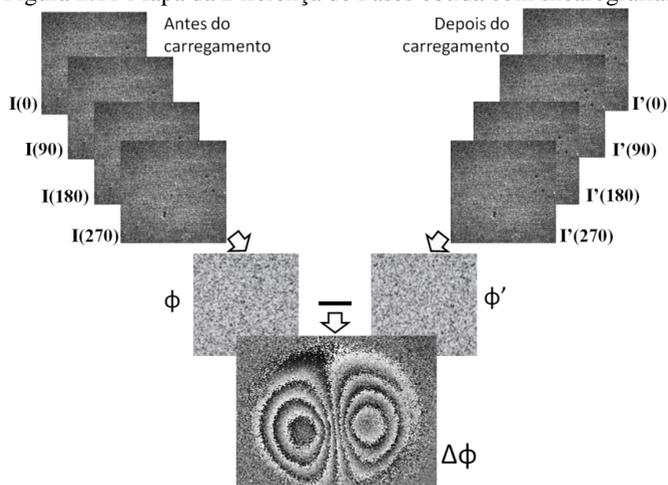
2.3.3. Deslocamento de fase

O deslocamento de fase, necessário para o cálculo da fase, se faz através de um pequeno deslocamento de um dos espelhos que compõem o interferômetro (Figura 2.6). Este deslocamento é feito por meio de um atuador piezoelétrico (PZT). Introduce-se, de maneira controlada, uma variação do caminho óptico que corresponde à variação de fase na imagem (Cheng & Wyant, 1985).

Quando o espelho é deslocado em uma quantidade δl , o comprimento do caminho é alterado em $2\delta l$. O deslocamento de fase será então:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2\delta l \quad (2.30)$$

Figura 2.11 Mapa da Diferença de Fases obtida com shearografia.

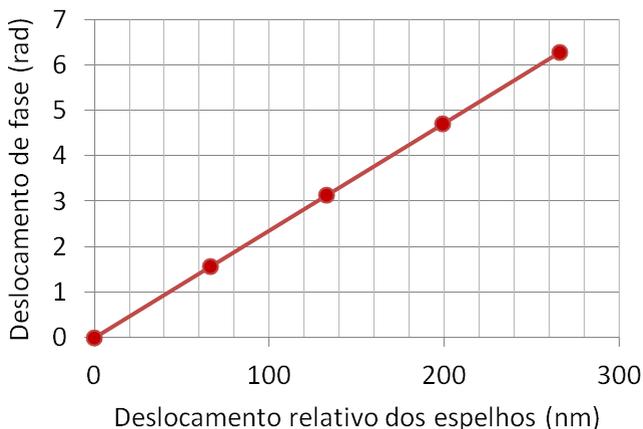


Fonte: Autor.

Nos ensaios realizados com shearografia neste trabalho, o comprimento de onda utilizado foi de $\lambda = 532\text{nm}$. Assim, os valores correspondentes ao passo de $\pi/2$ são os apresentados na Figura 2.12.

É possível observar que para um deslocamento de fase de uma onda ($\varphi = 2\pi$) é necessário um deslocamento do PZT de 266nm.

Figura 2.12 Relação do deslocamento de fase e seu correspondente deslocamento no PZT.



Fonte: Autor.

2.4. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS COM SHEAROGRAFIA

Com a técnica de shearografia, é possível determinar deformações no material. Para caracterizar o defeito é necessário aplicar um carregamento no material de maneira que a presença de defeitos aflore na superfície com uma alteração localizada no campo de deformações. Em resposta ao carregamento aplicado é possível inferir através das franjas de interferência a presença de falhas internas em estruturas de materiais compósitos (Van Hemelrijck, Anastasopoulos, & E. Melanitis, 2004).

O tipo de material, a estrutura interna do material e o tipo de defeito a ser inspecionado devem ser considerados para a escolha do melhor tipo de carregamento e da intensidade do carregamento a ser aplicado.

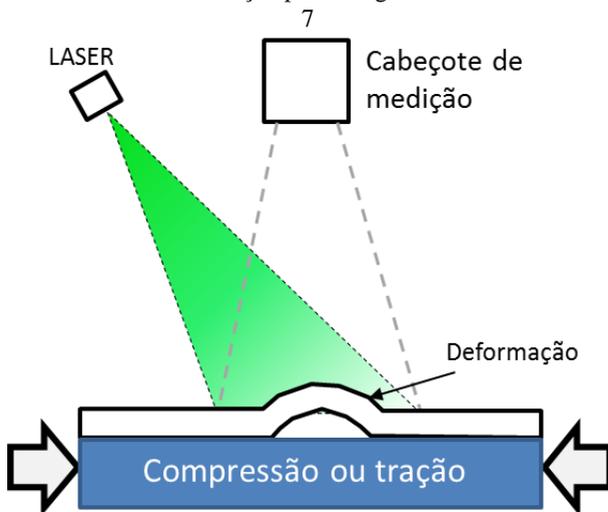
A seguir, é apresentada uma breve descrição dos principais carregamentos utilizados e sua aplicabilidade.

2.4.1. Carregamento mecânico

Os carregamentos mecânicos podem ser aplicados de diversas formas: tração, compressão, flexão, torção e pressão interna são as

principais. Em superfícies sem defeitos, os campos de deformação são relativamente suaves, produzindo franjas de shearografia uniformemente distribuídas, ou seja, as deformações não variam significativamente ao longo da superfície do material. Quando há um defeito de delaminação, por exemplo, essas deformações sofrem descontinuidades localizadas, não sendo mais uniformes (Figura 2.13). Na medição com shearografia, na região do defeito, surgirão anomalias no mapa de franjas, que revelarão a presença de falhas (Willemann, Fantin, & Albertazzi, 2010).

Figura 2.13 Esquema da deformação em um material compósito com defeito ao sofrer uma deformação por carregamento mecânico.

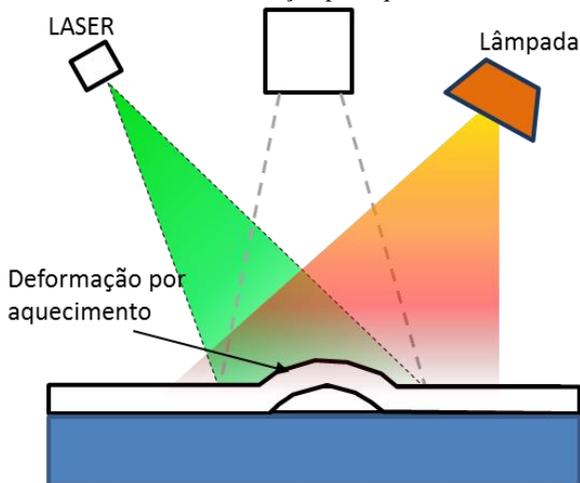


Fonte: Adaptado de (Albertazzi, 2014).

2.4.2. Carregamento térmico

O carregamento térmico é baseado no princípio da dilatação térmica, onde os materiais quando aquecidos tendem a expandir. Quando não há defeito no material compósito essa deformação do material tende a ser mais uniforme, porém, quando há presença de bolhas de ar, corpos estranhos ou descolamentos entre as camadas do material, os campos de deformação apresentam descontinuidades ou anomalias (Figura 2.14). (Ferreira, Lopez, Nicolau, Albertazzi, & Willemann, 2011).

Figura 2.14 Esquema da deformação em um material compósito com defeito ao sofrer uma deformação por aquecimento.



Fonte: Adaptado de (Albertazzi, 2014).

2.4.3. Vácuo

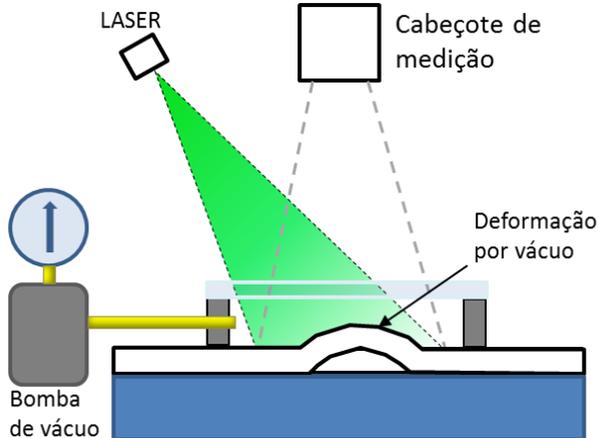
Quando o material é sujeito a uma condição de pressão negativa (vácuo) e esse possui alguma falha de adesão, observa-se uma tendência do compósito a expandir na região dessa falha, pois a bolsa de ar formada entre as camadas aumenta de tamanho. Esse comportamento da bolsa de ar desloca as camadas, alterando, localmente, o campo de deformações na superfície do material (Figura 2.15) (Schöntag, 2009).

2.4.4. Vibração

O carregamento vibracional é realizado através de excitação controlada que pode ser feita por contato, através de atuadores piezoelétricos, ou sem contato, usando alto falantes (Figura 2.16) (Pereira, 2012).

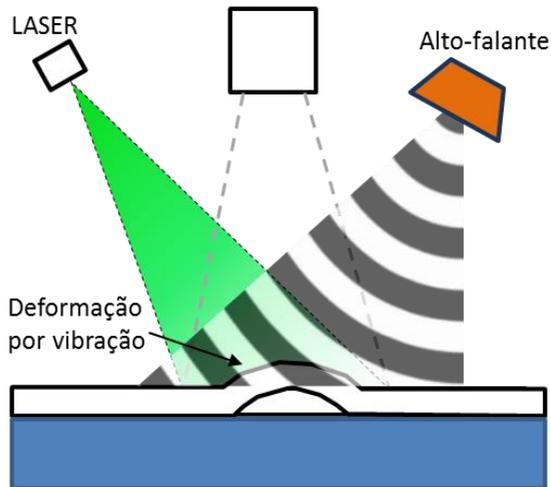
O comportamento da região do defeito é parecido com o de uma membrana, que, quando excitada na sua frequência de ressonância, vibra de forma mais intensa. Para encontrar a frequência de ressonância, é necessário fazer uma varredura entre as diferentes frequências, observando assim, em tempo real, o eventual aparecimento de não homogeneidades no campo de deformações medido pela shearografia.

Figura 2.15 Esquema da deformação em um material compósito com defeito ao sofrer uma deformação por redução da pressão “vácuo”.



Fonte: Adaptado de (Albertazzi, 2014).

Figura 2.16 Esquema da deformação em um material compósito com defeito ao sofrer um carregamento vibracional.



Fonte: Adaptado de (Albertazzi, 2014).

É possível obter franjas associadas à amplitude de vibração através de um adequado processamento de imagens, que revela visualmente a existência de defeitos (Schöntag, 2009).

No caso em que a vibração é produzida por fatores externos ou não é controlada, a qualidade da medição pode ser comprometida. Neste caso a vibração é considerada como uma fonte hostil e seus efeitos serão detalhados e discutidos no Capítulo III.

2.5. PRINCIPAIS FONTES DE ERRO

Até o presente momento, as fontes de erro e condições de operação do sistema de shearografia têm sido estudadas para condições ambientais relativamente estáveis, como aquelas tipicamente encontradas no laboratório.

A inspeção com shearografia de uma região de interesse pode durar alguns minutos. Na prática, boa parte desse tempo é consumido pelo processo de aplicação do carregamento. Por isso, outros fenômenos dependentes do tempo tendem a interferir no resultado de medição (Viotti & Albertazzi, 2014). Assim, fora do laboratório, as perturbações dinâmicas irão introduzir erros adicionais para a medição de fase. Por conseguinte, é necessário conhecer essas quantidades que podem afetar a medição de fase num ambiente instável (Sesselmann, 2000).

Lembrando que o fator $2\delta l$ da equação (2.30) é devido à diferença do caminho dos feixes no interferômetro, tem-se que:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2\delta l = 2\pi \left(\frac{GP_0}{\lambda_0} - \frac{GP_R}{\lambda_R} \right) \quad (2.31)$$

Onde GP_0 e GP_R são o percurso óptico dos feixes móveis e de referência, respectivamente. λ_0 e λ_R são os comprimentos de onda nestes percursos.

O comprimento de onda é definido como:

$$\lambda = \lambda(v, f) = \frac{v}{f} \quad (2.32)$$

Onde v é a velocidade de propagação da luz e f sua frequência.

Tem-se então três variáveis importantes que podem ser afetadas na formação da interferência para uma imagem: variação da velocidade de propagação da luz v , variação do percurso óptico GP , e variação da frequência do laser f (Hecht & Zajac, 1974).

2.5.1. Variação da velocidade de propagação

A fase da figura de interferência pode mudar se as velocidades de propagação do meio e o feixe de referência forem alteradas de forma desigual. Para descrever estas alterações utiliza-se o índice de refração n , sendo a relação da velocidade (Hecht & Zajac, 1974):

$$n = \frac{v_{\text{vácuo}}}{v_{\text{meio}}} = \frac{c}{v_{\text{meio}}} \quad (2.33)$$

As equações (2.32) e (2.33) permitem:

$$\lambda_{\text{meio}} = \frac{\lambda_{\text{vácuo}}}{n_{\text{meio}}} \quad (2.34)$$

A luz laser propaga-se através do ar. O índice de refração do ar muda de forma linear com a densidade ρ e é dependente da temperatura T , da umidade e da pressão do ar, para citar as variáveis mais influentes. Além disso, se descreve a mudança de densidade do ar apenas por desvio de temperatura ΔT .

Por conseguinte, a mudança do índice de refração do ar pode ser aproximada pela relação de (Gladstone & Dale, 1863):

$$\Delta n = \frac{(n_{\text{ar}} - 1)}{n_{\text{meio}}} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T} \Delta T \quad (2.35)$$

2.5.2. Variação do percurso óptico

O comprimento do percurso óptico pode variar com vibrações, especialmente dos espelhos que compõem o interferômetro, como pode ser apreciado na Figura 2.6.

De acordo com a equação (2.30) tem-se que:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2(7,4nm) \approx \frac{\pi}{18} \approx 10^\circ \quad (2.36)$$

Pode-se observar então, por exemplo, que $7,4 \text{ nm}$ são suficientes para provocar um defasamento de 10° ou $\pi/18$ radianos.

A variação de temperatura também pode afetar o comprimento do percurso óptico, já que as partes ou toda a estrutura do interferômetro

dilatam. Porém, na configuração do interferômetro em shearografia, essa variação pode ser desprezada, visto que os espelhos estão suficientemente próximos e os materiais que compõem o percurso óptico são iguais. Sendo assim, é necessária uma temperatura maior que os limites de trabalho em campo para se atingir um erro significativo. A dilatação do caminho óptico pode ser expressa como (Tipler & Mosca, 2008):

$$\delta l_T = \delta l \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2.37)$$

Onde δl_T é a variação do percurso óptico devido à temperatura, α é o coeficiente de dilatação térmica do material e ΔT é a diferença de temperatura.

2.5.3. Variação da frequência do laser

Sempre que ocorrerem movimentos relativos entre a fonte de laser e o detector, ocorre uma variação da frequência do laser devido ao efeito Doppler. Tais movimentos podem ser introduzidos por vibrações das partes reflexivas do interferômetro, incluindo a superfície da amostra.

De acordo com (Noll, 2006) e (Troncoso, 1998), para que a variação na frequência seja significativa, a velocidade de vibração deveria alcançar 7200 m/s para alterar o comprimento de onda em 3%, o que está muito além das condições típicas encontradas em campo. Dessa forma, esta variação não será considerada neste trabalho.

2.5.4. Análise do capítulo

Com a discussão realizada neste capítulo, ficam evidentes os fatores mais importantes que devem ser considerados no projeto de um interferômetro robusto, com o intuito de melhorar a qualidade das inspeções com shearografia em campo. O primeiro é o efeito da vibração, que hoje está presente em grande parte dos ambientes industriais. A vibração gera mudanças na posição relativa entre o equipamento de shearografia e o corpo de prova que podem inviabilizar a medição em campo. Além da vibração, as correntes de ar também merecem atenção, pois podem provocar variações no índice de refração ou variações na velocidade de propagação da luz e, conseqüentemente, provocar desvios no caminho óptico da luz e efeitos indesejáveis no resultado da medição.

CAPÍTULO III

3. INTERFEROMETRIA EM AMBIENTES HOSTIS

3.1. INTRODUÇÃO

As medições com técnicas interferométricas como holografia ou shearografia são comumente necessárias para aplicações em campo. Ao utilizar o sistema de medição fora do laboratório, este fica exposto a muitos fatores sobre os quais não há nenhum controle. Dessa forma, é muito importante um sistema robusto que seja capaz de operar adequadamente em campo.

3.2. AMBIENTES HOSTIS

A definição básica de um ambiente hostil é um lugar onde exista qualquer condição operacional extrema em relação às limitações do equipamento convencional (Dataplex, 2007). Alguns exemplos de fatores que podem apresentar essa condição extrema são: temperatura, umidade, pressão, salinidade, radiações, os choques e vibrações, os fluxos erosivos e meios corrosivos.

Um exemplo de um ambiente hostil pode ser visualizado na Figura 3.1. Vemos que os usuários e o equipamento ficam expostos a temperaturas relativamente altas, variações atmosféricas, umidade, radiação solar, vento, poeira, salinidade e vibrações. É claro que o dispositivo, neste caso o interferômetro, deve resistir ao ambiente e também deve ser capaz de fazer medições confiáveis. (Viotti & Albertazzi, 2014)

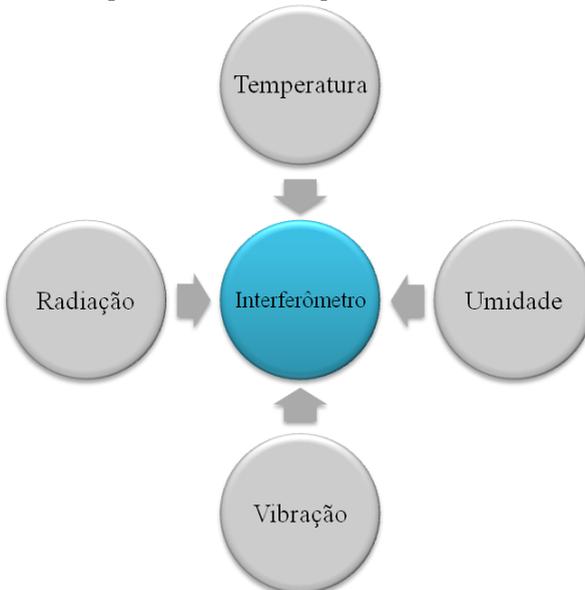
É mostrado, na Figura 3.2, que as variáveis temperatura, umidade, vibração e radiação são as principais fontes externas que afetam o desempenho do interferômetro. É importante esclarecer que existem ainda outros fatores que podem interferir no processo da medição, mas não serão discutidos neste trabalho.

Figura 3.1 Exemplo de um ambiente hostil.



Fonte: (Albertazzi, 2014).

Figura 3.2 Principais fontes externas que atuam sobre o interferômetro.

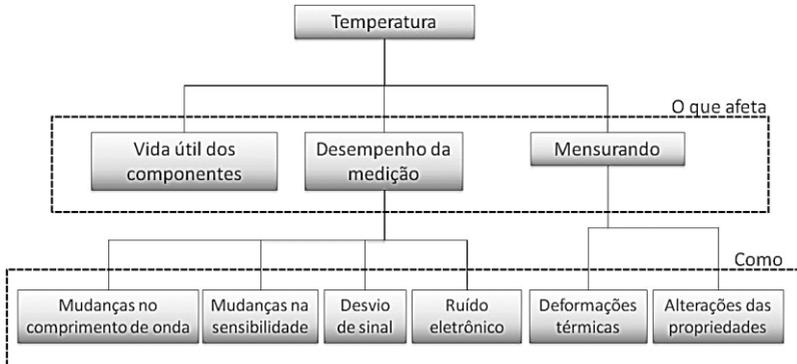


Fonte: (Viotti & Albertazzi, 2014).

3.2.1. Temperatura

A influência da temperatura, frente aos diferentes componentes associados na medição, é mostrado na Figura 3.3. O desempenho da medição de um interferômetro pode ser afetado por, pelo menos, quatro efeitos provenientes da variação de temperatura: mudanças no comprimento de onda do laser, alterações de sensibilidade, desvio de sinal e ruído eletrônico. O comprimento de onda de algumas fontes de luz pode ser diretamente afetado pela temperatura, como por exemplo, lasers de diodo não estabilizados. Mudanças no comprimento de onda de sistemas interferométricos podem resultar em alterações na sensibilidade do sistema, ou seja, mudanças na razão ordem de franja e variação da quantidade física. Um deslocamento de fase no sinal também pode ser associado com uma mudança de comprimento de onda, bem como com a expansão térmica das peças analisadas por interferometria. Alta temperatura pode afetar a quantidade de ruído eletrônico dos sensores da câmera, bem como ter forte influência sobre a vida útil dos componentes eletrônicos. (Viotti & Albertazzi, 2014)

Figura 3.3 Efeitos da temperatura nas medições com interferometria.



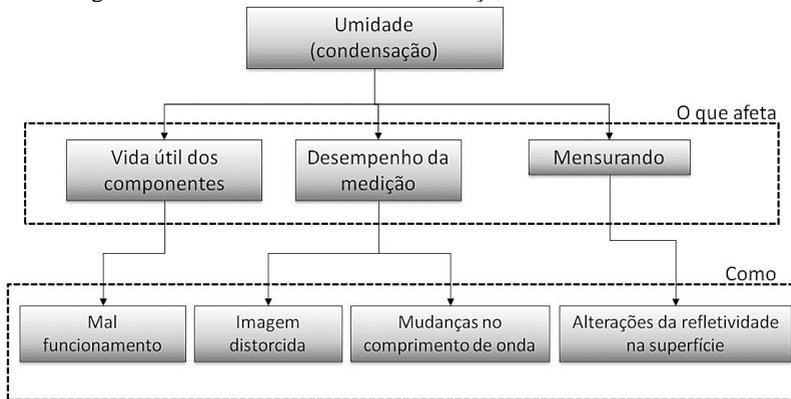
Fonte: (Viotti & Albertazzi, 2014).

3.2.2. Umidade

A umidade pode ser uma fonte de erro importante quando são utilizadas técnicas ópticas para medição (Figura 3.4), especialmente quando há condensação de umidade. Altos níveis de umidade podem causar o mau funcionamento de um componente e podem também alterar o comprimento de onda efetivo da fonte de luz, o que geraria

erros de medição. Além disso, a condensação da umidade nos componentes ópticos pode alterar a refletividade da superfície da amostra e dificultar a visualização da imagem, fazendo com que a mesma pareça “borrada” (Viotti & Albertazzi, 2014).

Figura 3.4 Efeitos da umidade nas medições com interferometria.



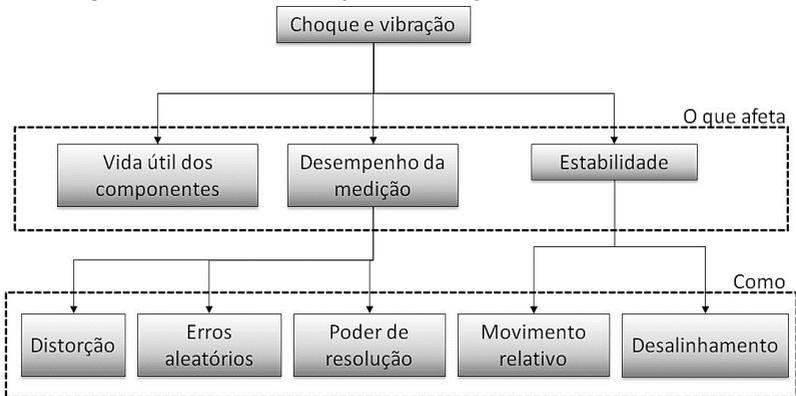
Fonte: (Viotti & Albertazzi, 2014).

3.2.3. Vibração

Os efeitos das vibrações ou choques do sistema são esquematizados na Figura 3.5.

As vibrações mecânicas e choques são normalmente associados com o movimento relativo entre as partes de um interferômetro ou entre o interferômetro e o mensurando. Níveis de choque graves podem comprometer a integridade mecânica dos componentes e, é claro, o próprio interferômetro. Os movimentos relativos produzidos por choques moderados ou vibrações mecânicas podem influenciar o desempenho de medição, desfocando o interferograma, aumentando o nível de erros aleatórios e reduzindo a resolução do sistema de medição. As vibrações também podem afetar o alinhamento relativo dos componentes do interferômetro e o alinhamento entre o interferômetro e a superfície de inspeção. (Viotti & Albertazzi, 2014)

Figura 3.5 Efeitos da vibração nas medições com interferometria.



Fonte: (Viotti & Albertazzi, 2014).

3.2.4. Radiação e iluminação de fundo

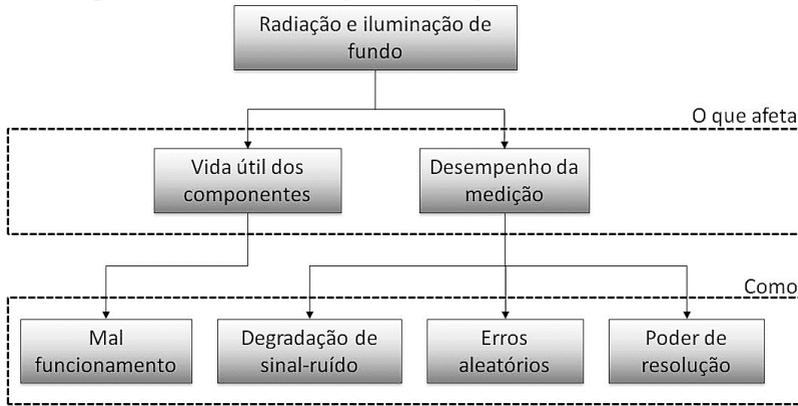
Os Interferômetros são geralmente afetados por dois tipos de radiação: campos eletromagnéticos e iluminação de fundo. Os campos eletromagnéticos fortes podem comprometer a vida útil dos componentes eletrônicos, por exemplo, sensores de câmera. Campos eletromagnéticos moderados podem degradar a relação sinal-ruído de alguns componentes eletrônicos. Por outro lado, a iluminação de fundo pode afetar o desempenho do interferômetro através da redução da qualidade do sinal de medição (isto é, contraste entre franjas), diminuindo a relação sinal-ruído, gerando um nível mais elevado de erros aleatórios e a consequente piora da medição da fase (Viotti & Albertazzi, 2014).

Os efeitos deste tipo de perturbação são visíveis na Figura 3.6.

3.3. SOLUÇÕES CLÁSSICAS

Existem diferentes soluções possíveis para possibilitar a utilização de um interferômetro em ambientes hostis. Estas soluções podem ser divididas em três grupos principais: isolamento, robustez, ou uma combinação das duas. O isolamento do interferômetro é uma solução que pareceria ser natural, mas que pode não ser sempre viável dependendo do ambiente de operação. Da mesma forma, a robustez está limitada aos processos de construção ou dos princípios aplicados. A combinação das duas soluções anteriores pode, portanto, trazer os melhores resultados (Viotti & Albertazzi, 2014).

Figura 3.6 Efeitos da radiação nas medições com interferometria.



Fonte: (Viotti & Albertazzi, 2014).

3.3.1. Isolamento / Compensação

Atualmente, encontram-se diferentes opções ou soluções para o isolamento de dispositivos aplicáveis na interferometria. A seguir serão descritos diferentes métodos de isolamento.

3.3.1.1. Encapsulamento

O encapsulamento é, talvez, a solução mais simples e comum de isolamento de um instrumento. É aplicável aos fatores de contaminação atmosféricos tais como partículas no ar, chuva, gotas de água, até, no caso extremo, imersão na água.

Nesse método de isolamento, os componentes do interferômetro são mantidos no interior de um recipiente hermético com uma janela óptica de fácil limpeza.

Se, por exemplo, o encapsulamento é feito com materiais especiais de baixa condutividade térmica, é possível isolar os efeitos da temperatura. Outra forma de obter o isolamento da temperatura é com sistema de controle de temperatura, normalmente feito com um sistema de ar condicionado ou circulação de água com regulagem. No caso de a temperatura influenciar no funcionamento do dispositivo, é possível ter um controle de temperatura a partir de um circuito fechado, o qual mantenha a temperatura estável dentro do recipiente hermético.

Outro aspecto positivo do encapsulamento é a possibilidade de isolar os componentes ópticos da radiação externa. Por exemplo, com uma gaiola de Faraday pode-se ter um isolamento de radiações eletromagnéticas fortes.

No presente trabalho, os componentes a serem isolados correspondem aos elementos que compõem o interferômetro. O interferômetro pode, por exemplo, ser encapsulado para evitar a entrada da luz ambiente. O interferômetro deve ser suficientemente compacto para ser embalado em um recipiente pequeno e fechado.

Outra forma de obter isolamento da luz ambiente, e, que poderia ser considerada como encapsulamento, é a utilização de filtros especiais de interferência. No caso do sistema de shearografia, apenas o comprimento de onda do laser seria visualizado pelo sistema óptico e a luz ambiente seria bloqueada pelo filtro.

3.3.1.2. Isoladores de vibrações

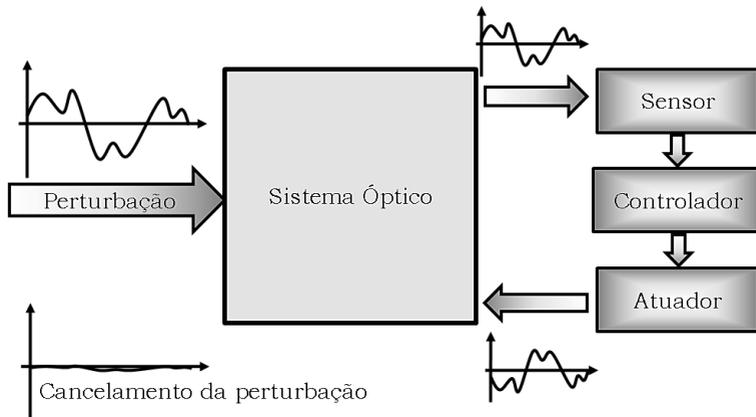
A vibração é um dos fatores mais prejudiciais e de maior efeito negativo ao desempenho dos dispositivos ópticos (seção 3.2.3 e Figura 3.5), já que os componentes precisam de um alinhamento minucioso e a tolerância das distâncias entre os elementos que compõem o instrumento é muito estreita. Uma solução para eliminar tais vibrações mecânicas é o isolamento adequado do sistema de medição.

Os elementos de amortecimento passivos e ativos são amplamente utilizados para isolamento de vibrações nos ambientes de laboratório (Viotti & Albertazzi, 2014). No mercado, encontra-se uma grande variedade de mesas ópticas, equipadas com isoladores pneumáticos ou elásticos, porém o grande inconveniente desses sistemas isoladores de vibração é que normalmente não são portáteis.

3.3.1.3. Estabilização ativa

Estabilização ativa é outra abordagem que pode ser usada para reduzir efeitos de vibração em sistemas ópticos. Estabilização ativa é obtida por um sistema de circuito fechado, incluindo um sensor de fase, um controlador e um atuador. A ideia geral, visível na Figura 3.7, é dotar o sistema óptico com um sensor capaz de detectar a presença de uma perturbação que produz vibrações mecânicas (Hrebabetzky, 1996). Este sinal é enviado para um atuador e aplicado ao sistema óptico. O efeito de cancelamento da perturbação no sistema óptico é obtido pela superposição de ambos os sinais

Figura 3.7 Princípio de estabilização ativa.



Fonte: (Viotti & Albertazzi, 2014).

Existem diversas formas de adquirir o sinal de perturbação. Interferômetros adicionais, fotodiodos, ou câmeras CMOS com leitura rápida em pequenas áreas são alguns exemplos. O atuador de fase é geralmente um espelho leve montado num atuador piezoelétrico ou uma fibra óptica envolvida em torno de um atuador piezoelétrico. Em ambas as soluções, o percurso óptico de luz laser é alterado pela variação do comprimento do percurso geométrico (Sesselmann, 2000).

3.3.2. Robustez

A robustez pode ser definida como a tolerância ou insensibilidade do instrumento frente às mudanças ou perturbações presentes nas condições de trabalho (Creus, 2011). Então, um instrumento é considerado robusto quando é capaz de funcionar com confiabilidade em condições adversas.

Há dois fatores principais que definem o interferômetro como robusto: o princípio ou técnica de medição e as propriedades físicas, conhecidas como “princípio robusto”.

Como princípios ou técnicas de medição para obter um interferômetro robusto têm-se: *Quasi-equal-path*, *Fast/One-shot*, autocompensação e algoritmos robustos. Evidentemente existem muitas outras técnicas, mas neste trabalho serão descritas apenas as mencionadas anteriormente.

Quanto às propriedades físicas, consideram-se as mais importantes como: construção e fixação rígida, compactação e interferômetros monolíticos.

3.3.2.1. *Quasi-equal-path*

Nos interferômetros, como o Twyman-Green ou Mach-Zehnder, os feixes de referência e de teste seguem caminhos separados, portanto, são afetados diferentemente por choques mecânicos e flutuações de temperatura. Se as precauções adequadas não forem tomadas, o padrão de franjas no plano de observação se torna instável, inviabilizando as medições. A maior parte das dificuldades pode ser evitada usando os chamados interferômetros de *Equal-path* ou *Quasi-equal-path* (Malacara, 2007).

Nos interferômetros de *Equal-path* ou *Quasi-equal-path* os braços do interferômetro são quase iguais. As perturbações atmosféricas ou vibração produzem quase os mesmos indesejáveis desvios de fase em ambos os braços do interferômetro. Assim, a diferença de fase entre os braços do interferômetro não é afetada pelos distúrbios. Os interferômetros de shearografia são um exemplo de interferômetros de *Quasi-equal-path* (Viotti & Albertazzi, 2014).

3.3.2.2. *Fast/One-shot*

Uma abordagem para evitar que as vibrações corrompam os dados de fase em cada estado de deformação é a redução do tempo de aquisição. Essa aquisição deve ser mais rápida do que o período de vibração (Sesselmann, 2000). A ideia principal é a utilização de um tempo de exposição curto o suficiente para deter os efeitos de vibrações e perturbações atmosféricas. Neste caso, diz-se que o instrumento possui *Fast-shot* ou “disparo rápido”. Existem alguns trabalhos nesta área que usam, por exemplo, adição de franjas portadoras no processamento (Sykora & de Groot, 2010).

A abordagem mais promissora para interferometria em ambientes agressivos baseia-se numa medição de um único disparo ou *One-shot* (Sykora & de Groot, 2010). Têm sido relatadas abordagens deste tipo fazendo aquisição simultânea com matrizes pixeladas (Millerd, 2005), ou dois comprimentos de onda (Kühn, 2007).

3.3.2.3. Autocompensação

É desejável que o princípio de medição, ou o algoritmo de trabalho, seja autocompensado (Viotti & Albertazzi, 2014). Algumas possibilidades usam princípios físicos ópticos com os quais é possível tornar o interferômetro insensível às variações do comprimento de onda. Na técnica de ESPI, isto é possível a partir do uso de elementos ópticos difrativos, como no trabalho de (Viotti, Kapp, & Albertazzi Jr, 2009).

3.3.2.4. Algoritmos Robustos

Até agora, discutiu-se sobre a robustez na construção, ou possíveis modificações no princípio físico, mas também é possível chegar a uma robustez no processamento dos dados, que são os algoritmos robustos.

Há algoritmos capazes de tolerar as vibrações, que foram desenvolvidos para o cálculo da mudança de fase. Eles usam mudança de fase senoidal e análise harmônica (Groot, 2009), ou uma combinação de hardware de aquisição de imagem lenta e rápida (Deck, 1996), compensação matemática (Deck, 2009), ou por meio dos princípios das figuras de Lissajous (Albertazzi, Vieira Fantin, Willemann, & Benedet, 2014).

3.3.2.5. Princípio robusto

O princípio físico robusto envolve os seguintes aspectos:

- Construção rígida: Refere-se à construção de elementos internos do interferômetro. Um planejamento e construção mecânica robusta tornam-se muito importantes para reduzir movimentos relativos entre as peças internas do interferômetro, aumentando assim a capacidade de trabalhar sobre níveis de vibração moderados (Viotti & Albertazzi, 2014).

- Fixação rígida: Um sistema de fixação rígida e eficaz é também muito importante para minimizar os movimentos relativos, desta vez, entre o interferômetro e a superfície da amostra durante a medição (Viotti & Albertazzi, 2014).

- Compacto: Unidades compactas são geralmente rígidas e fáceis de unir firmemente à superfície da amostra (Viotti & Albertazzi, 2014).

- Monolítico: Outra abordagem muito atraente é obtida através de construções num único sólido (Bleier, Brouillete, & Carangelo, 1999) (Ledger, 1975). Neste caso, todos os componentes ópticos ativos são incorporados e integrados nos mesmos sólidos (normalmente de sílica fundida).

3.3.2.6. Comparação dos métodos

Na Tabela 3.1 são apresentadas as relações entre as características robustas, e sua eficácia contra os agentes agressivos primários. Um símbolo de sorriso (☺) significa um efeito forte, e um símbolo indiferente (☹) significa um efeito de média intensidade. Áreas em branco correspondem aos efeitos fracos ou inexistentes.

Estratégias com autocompensadores são as mais eficazes ao abordar as variações de temperatura em longo prazo. Medição *Fast/One-shot* é excelente para deter as vibrações e efeitos atmosféricos. Quando possível, configurações de *Quasi-equal-path* são adequadas como soluções simples para reduzir automaticamente os distúrbios de vibração e atmosfera. Do ponto de vista do princípio físico, construções monolíticas são muito atraentes na tentativa de reduzir as vibrações e variações atmosféricas. As probabilidades de um interferômetro operar com êxito sob o efeito de vibração são mais elevadas se ele for rígido, compacto e se puder ser firmemente fixado na superfície do espécime.

Tabela 3.1 Relação entre características robustas e agentes agressivos.

Característica	Temperatura	Vibração	Umidade	Radiação
Propriedades físicas				
Construção Rígida		☺		
Fixação Rígida		☺		
Compacto	☹	☺	☹	
Monolítico	☹	☺	☹	
Estratégias de medição				
<i>Quasi-equal-path</i>	☹	☺	☹	
<i>Fast/One-shot</i>	☹	☺		☹
Autocompensação	☺	☹		☹
Algoritmos robustos	☹	☺		

Fonte: (Viotti & Albertazzi, 2014).

3.4. SHEAROGRAFIA EM AMBIENTES HOSTIS

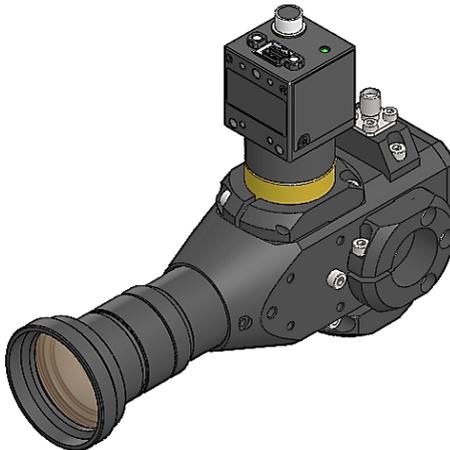
A shearografia, que é o tema central do trabalho, tem algumas vantagens e limitações ao ser implementada em um ambiente hostil. Tem-se como vantagem, por exemplo, que o interferômetro de deslocamento lateral característico da shearografia é do tipo *Quasi-equal-path* (Malacara, 2007). Por outro lado, há algumas limitações, principalmente no que diz respeito à habilidade em conviver com vibrações.

A seguir serão discutidos os aspectos positivos e as limitações que a técnica de shearografia apresenta em um ambiente hostil.

3.4.1. Aspectos positivos

O sistema atual de shearografia, usado e desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), visível na Figura 3.8, tem tido uma evolução muito significativa no que diz respeito aos aspectos necessários para obtenção de um instrumento robusto. Esta evolução resulta em características focadas na robustez do interferômetro e do sistema em geral. As principais características e aspectos positivos são os seguintes:

Figura 3.8 Cabeçote N4f de medição por shearografia desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina.



Fonte: (Albertazzi, 2014).

Resistência às variações de temperatura: ao ter um interferômetro tipo *Quasi-equal-path* (Figura 2.6), o percurso dos feixes é quase igual, portanto uma dilatação nos braços afeta de forma semelhante o deslocamento de fase dos feixes. Assim, a diferença de fase permanece praticamente igual ante uma variação de temperatura.

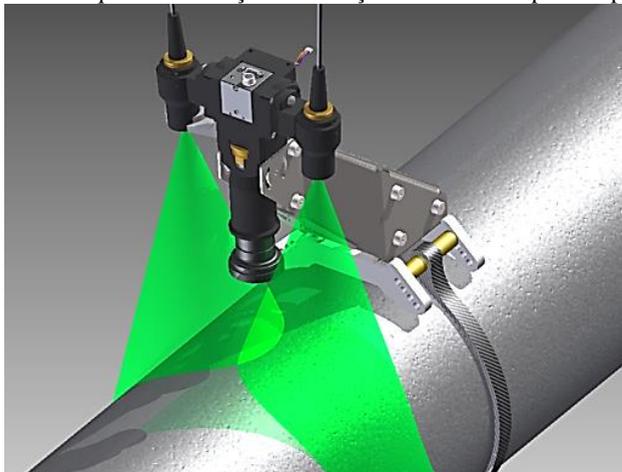
Proteção a fatores ambientais: os elementos no cabeçote ficam enclausurados em uma carcaça metálica, obtendo um isolamento aos efeitos de umidade, poeira e nevoa salina.

Isolamento à radiação ou luz de fundo: Na construção do cabeçote se utiliza um filtro de luz, compatível com o comprimento de onda do laser de iluminação. Dessa forma, o sistema de shearografia torna-se insensível a qualquer outro comprimento de onda.

Compacto: O cabeçote contém elementos de pequenas dimensões arranjados próximos uns dos outros, de forma tal que o volume do cabeçote é reduzido.

Fixação rígida: A fixação do cabeçote é um elemento muito importante, já que a ideia principal é suprimir o deslocamento relativo entre a peça e o cabeçote. Na Figura 3.9 mostra-se um exemplo de fixação rígida.

Figura 3.9 Esquema de fixação do cabeçote em um tubo para inspeção.



Fonte: Autor.

3.4.2. Aspectos negativos

Como qualquer instrumento de medição, o cabeçote de shearografia está limitado a operar em condições dentro de certos limites das perturbações externas, que não comprometem a integridade do equipamento nem a qualidade dos seus resultados. Fora dos limites, o desempenho é comprometido. Por exemplo, as temperaturas de trabalho se baseiam nas temperaturas ambientais, uma temperatura maior do que 70°C comprometeria os componentes não só ópticos como também os componentes eletrônicos. Da mesma forma, no caso de poeira extrema, ou correntes de ar com muito material particulado podem causar variações significativas no percurso da iluminação e na imagem. No caso de muita umidade tem-se condensação na janela óptica do cabeçote e condensação na peça de medição, o que tornaria inviável uma medição.

Um fator crítico que pode ser melhorado, e que é o objetivo do presente trabalho, é a sensibilidade às vibrações. Lembrando-se dos princípios de shearografia apresentados na seção 2.3, vê-se que o deslocamento de fase (seção 2.3.3) é feito através de um espelho conectado a um atuador PZT. Uma instabilidade no deslocamento do PZT pode resultar na instabilidade no deslocamento de fase aplicado, comprometendo a medição. Essa instabilidade pode ser provocada pela vibração do instrumento. É necessário explorar novas maneiras ou estratégias de obtenção da fase para tornar o instrumento menos sensível às vibrações.

3.5. ALTERNATIVAS PARA A REDUÇÃO DOS EFEITOS PROVOCADOS PELA VIBRAÇÃO

Na sequência, são apresentadas algumas técnicas exploradas na atualidade para reduzir os efeitos provocados pela vibração.

3.5.1. Concepção rígida

Como foi mencionada anteriormente (3.3.2.5), a rigidez na construção é um fator muito importante na sensibilidade à vibração, pelo qual uma solução para o interferômetro está baseada na fixação rígida dos elementos no interior do interferômetro. Para isso o projeto do interferômetro deve considerar o menor número possível de partes móveis. Sempre que possível, os elementos mecânicos e ópticos devem

ser colados ou montados formando um monobloco, evitando assim movimentos relativos.

3.5.2. Redução do tempo de aquisição

Para diminuir os efeitos das vibrações pode ser feito o processo de redução de tempo de aquisição ou *Fast-shot* (Item 3.3.2.2). A ideia é adquirir todas as imagens necessárias para o processamento em uma fração de tempo na qual o efeito da vibração seja imperceptível. Esta técnica está limitada à velocidade de resposta da câmera (FPS) e à resposta do deslocamento do PZT.

3.5.3. Algoritmo robusto

Conforme discutido no item 3.3.2.4, outra forma de tornar o sistema insensível às vibrações é fazendo algoritmos que possam determinar o valor de fase a partir de incrementos irregulares. O trabalho de (Albertazzi, Vieira Fantin, Willemann, & Benedet, 2014) descreve uma possibilidade de determinar o valor da fase por meio de uma sequência de imagens adquirida com incrementos de fase desconhecidos. O algoritmo utiliza os princípios das figuras de Lissajous.

3.5.4. Estabilização ativa de fase

Com a estabilização ativa de fase também é possível diminuir os efeitos das vibrações pelo cancelamento resultante da adição de sinal com fase contrária ao da perturbação (Item 3.3.1.3). Os trabalhos de (Troncoso, 1998) e de (Noll, 2006) apresentam a possibilidade e a aplicação dessa técnica em medições interferométricas. Com estes sistemas se obtém uma forma de reduzir os efeitos de vibração pela análise das imagens, pelo qual o sistema é capaz de manter a medição estável.

3.5.5. Deslocamento de fase por polarização

Outra forma potencialmente promissora de minimizar o problema causado pela vibração é realizar o deslocamento de fase a partir da rotação de um polarizador. O deslocamento de fase por polarização, que é a técnica de foco deste trabalho, tem base nos princípios da polarização da luz. A principal vantagem desse método é a redução da

sensibilidade a vibrações do deslocamento de fase, o que torna o sistema potencialmente imune aos efeitos da vibração. Os princípios desta técnica serão aprofundados no próximo capítulo.

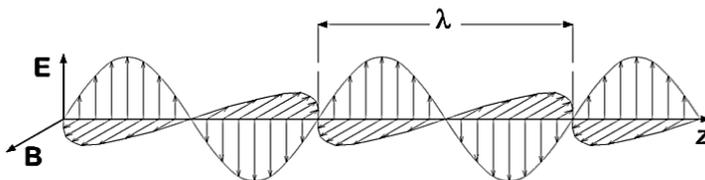
CAPÍTULO IV

4. DESENVOLVIMENTO DO INTERFERÔMETRO ROBUSTO

4.1. POLARIZAÇÃO

A luz é uma onda eletromagnética cujos campos elétrico e magnético vibram em planos mutuamente ortogonais, representados na Figura 4.1. Nos livros textos de física é comum estudar apenas a direção de oscilação do campo elétrico. Por exemplo, a onda de luz representada na Figura 4.1 é linearmente polarizada, porque o campo elétrico oscila apenas num plano. No exemplo, o plano de oscilação é vertical, disse-se então que a luz é polarizada verticalmente (Hitz, Jeff, & J., 2012).

Figura 4.1. Composição da luz, por ondas elétrica e magnética ortogonais.



Fonte: (Hecht & Zajac, 1974).

Dado que a direção da polarização corresponde à direção de oscilação do campo elétrico, de agora em diante será considerada somente a direção do campo elétrico. Dessa forma, pode-se escrever qualquer tipo de orientação ou polarização da luz em termos do campo elétrico no plano x-y (tendo que o plano z corresponde à direção de propagação da onda), de acordo com o vetor:

$$\vec{E}(t) = \begin{bmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x e^{i(kz - \omega t + \phi_x)} \\ E_y e^{i(kz - \omega t + \phi_y)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x e^{i\phi_x} \\ E_y e^{i\phi_y} \end{bmatrix} e^{i(kz - \omega t)} \quad (4.1)$$

Onde:

E_x e E_y são as amplitudes do campo elétrico nos planos x e y respectivamente.

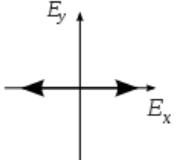
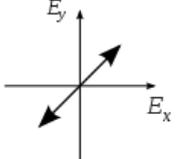
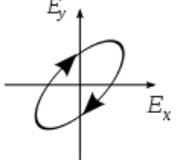
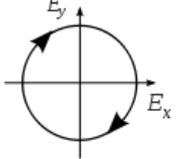
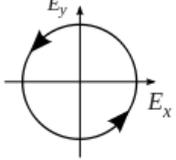
ϕ_x e ϕ_y correspondem às fases do campo elétrico nas direções x e y.

k é o termo da direção de propagação da luz na direção z.

ω é a frequência de oscilação da luz.

O vetor que contém a amplitude do campo elétrico e sua fase é denominado de “vetor de Jones” (Hecht & Zajac, 1974). Vê-se que com diferentes variações na amplitude ou na fase pode-se ter diferentes comportamentos no tipo de polarização da luz (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 Exemplos de diferentes tipos de polarização e seu correspondente vetor de Jones \vec{J} .

E_x	E_y	$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x$	\vec{J}	Esquema
1	0	-	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	0	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$0 < \Delta\phi < \frac{\pi}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} e^{i\phi_x} \\ e^{i\phi_y} \end{bmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{\pi}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ +i \end{bmatrix}$	

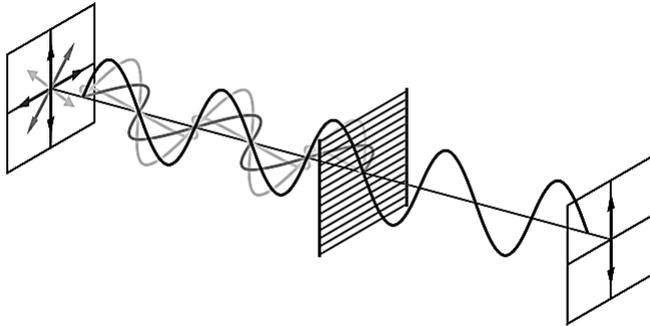
Fonte: Autor.

A polarização da luz pode ser catalogada de acordo com a direção da oscilação, podendo ser: linear, nos casos em que a direção de oscilação segue um plano; circular, quando a polarização muda sua orientação ao longo do espaço de forma simétrica, como os dois últimos casos da Tabela 4.1; e elíptica nos casos intermediários.

4.1.1. Filtro polarizador

O filtro polarizador, ou simplesmente polarizador, é um componente óptico que permite a passagem da luz em apenas uma determinada direção de oscilação.

Figura 4.2 Esquema de uma onda eletromagnética passando por um polarizador.



Fonte: (Mellish, 2006)

Na Figura 4.2, é visível que uma fonte de luz oscilando em diferentes direções passa a ter uma única direção de oscilação ao passar pelo filtro polarizador. O efeito de um polarizador pode ser numericamente expressado pela matriz de Jones como:

$$\vec{J}_P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Onde θ é o ângulo de giro do polarizador com respeito ao feixe x .

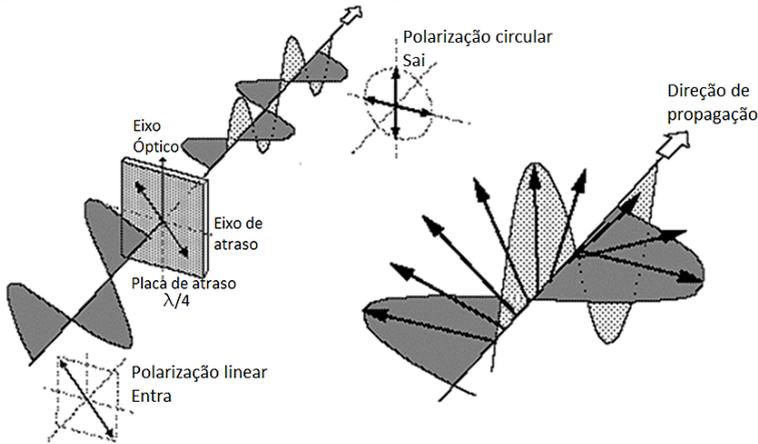
4.1.2. Placas de atraso (*Wave plate WP*)

As placas de atraso são componentes ópticos formados por materiais nos quais o índice de refração é dependente da direção de

oscilação da onda. Assim, as ondas viajam com velocidades diferentes no interior deste, provocando um defasamento na composição das ondas ao emergir do material. O plano no qual a onda viaja com menor velocidade é denominado plano de atraso, cuja interseção com o plano do polarizador define o eixo de atraso.

Supõe-se, por exemplo, que uma onda linearmente polarizada incida orientada 45° com o eixo de atraso da placa e que esta placa produz um defasamento de $\lambda/4$ (90°) na componente horizontal da onda incidente. Como resultado obtém-se na saída uma onda com polarização circular, como na Figura 4.3.

Figura 4.3 Efeito de uma onda ao passar por uma placa de atraso de $\lambda/4$ (90°).



Fonte: (HyperPhysics, 2005)

As placas de atraso também podem ser representadas por uma matriz de Jones da forma:

$$\vec{J}_{WP}(\phi, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \frac{\phi}{2} + i \operatorname{sen} \frac{\phi}{2} \cos 2\theta & i \operatorname{sen} \frac{\phi}{2} \operatorname{sen} 2\theta \\ -i \operatorname{sen} \frac{\phi}{2} \operatorname{sen} 2\theta & \cos \frac{\phi}{2} - i \operatorname{sen} \frac{\phi}{2} \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Onde:

ϕ é a defasagem produzida pelo material,
 θ é o ângulo que faz a onda incidente com o feixe de atraso da placa.

No caso de uma placa de atraso de fase $\phi = \lambda/4 = \pi/2$ (90°) e uma onda incidente formando um ângulo $\theta = \pi/4$ (45°) com respeito ao eixo de atraso, tem-se que:

$$\vec{J}_{WP}\left(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{bmatrix} = \vec{J}_{QWP}\left(\frac{\pi}{4}\right) \quad (4.4)$$

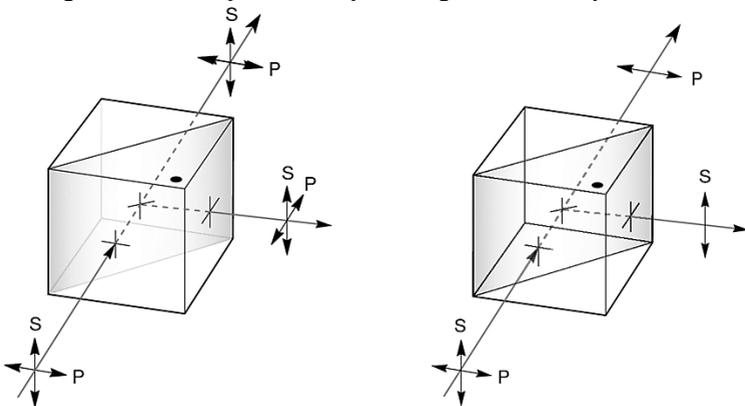
Vê-se que o termo \vec{J}_{QWP} é a matriz de Jones para uma placa de atraso de um quarto de onda ou “*Quarter-Wave Plate*”.

4.1.3. *Beam Splitter*

Beam Splitter (BS), divisor de feixe ou espelho parcial, é um componente óptico com a função principal de dividir a amplitude de um feixe de luz. É uma parte fundamental da maioria dos interferômetros.

Normalmente é feito a partir de dois prismas de vidro triangulares colados. Na construção do *Beam Splitter* é ajustada a espessura da cola de forma a se obter uma divisão do feixe, onde os dois feixes emergentes sejam de igual intensidade. Também pode ser construído de tal forma que os feixes emergentes sejam perpendicularmente polarizados, neste caso chama-se de *Polarizing Beam Splitter* (PBS) ou divisor de feixes polarizado.

Figura 4.4 *Beam Splitter*: à esquerda regular, à direita polarizado.



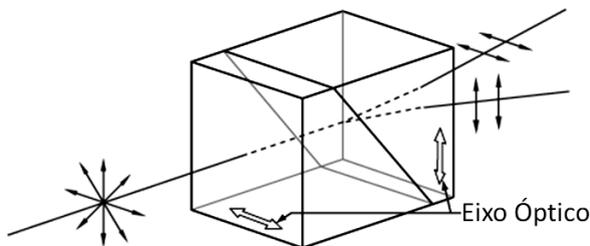
Fonte: (Newport Corporation).

4.1.4. Prisma de Wollaston

Prisma de Wollaston (Figura 4.5) é um componente feito de um material birrefringente (Hecht & Zajac, 1974). A luz incidente no prisma de Wollaston produz refração dependente do plano de polarização, onde cada componente terá um percurso óptico diferente e resulta em dois feixes polarizados perpendicularmente e formando um ângulo entre eles.

Na construção de um prisma de Wollaston, são colados dois prismas triangulares retos, formados regularmente de calcita ou quartzo, com eixos de atraso perpendiculares. A luz que entra por uma das faces, ao incidir na face diagonal, se divide em dois feixes de menor amplitude e diferente polarização. Os feixes emergentes divergem do prisma com ângulos dependentes do ângulo de corte dos prismas e do comprimento de onda da luz. Comercialmente, os ângulos de divergência mais comuns são de 20° e 2° para um comprimento de onda na faixa da luz visível.

Figura 4.5 Configuração de um prisma de Wollaston.



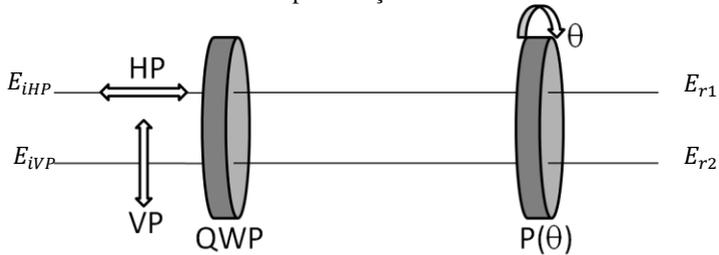
Fonte: (Thorlabs, Inc).

4.1.5. Deslocamento de fase por polarização

O deslocamento de fase por polarização foi primeiramente discutido por Pancharatnam (Pancharatnam, 1956), que demonstrou ser possível obter a interferência de duas ondas nas quais o deslocamento de fase é feito como resultado de uma alteração cíclica no seu estado de polarização.

O sistema óptico da Figura 4.6 mostra um esquema do deslocamento de fase a partir de um polarizador.

Figura 4.6 Configuração do sistema óptico para deslocamento de fase por polarização.



Fonte: Autor

O sistema é composto principalmente por uma placa de atraso de quarto de onda (QWP), como o eixo de atraso posicionado em 45° em relação à horizontal, e um polarizador linear $P(\theta)$ com a possibilidade de girar um ângulo θ . Na entrada do sistema incidem dois feixes de luz, um com polarização horizontal (HP) e outro com polarização vertical (VP).

Por meio das matrizes e vetores de Jones tem-se o desenvolvimento matemático do percurso do feixe HP pelo sistema:

$$\vec{E}_{r1} = \vec{J}_P(\theta) \cdot \vec{J}_{QWP}\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \vec{E}_{iHP} \quad (4.5)$$

Que pode ser reescrito da forma:

$$\vec{E}_{r1} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\vec{E}_{r1} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Depois de passar pela QWP vê-se que a onda horizontalmente polarizada fica da forma de uma onda circular à direita (ver Tabela 4.1 e Figura 4.7), resultando em:

$$\vec{E}_{r1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \cdot e^{-i\theta} \quad (4.8)$$

De acordo com a equação (4.8), obtêm-se que a onda resultante será uma onda linearmente polarizada inclinada num ângulo θ e fase $-\theta$.

O procedimento também é feito para uma onda incidente verticalmente polarizada, onde se tem como resultado:

$$\vec{E}_{r2} = \frac{1}{\sqrt{2}} [\text{Cos}\theta] \cdot e^{i\theta} \quad (4.9)$$

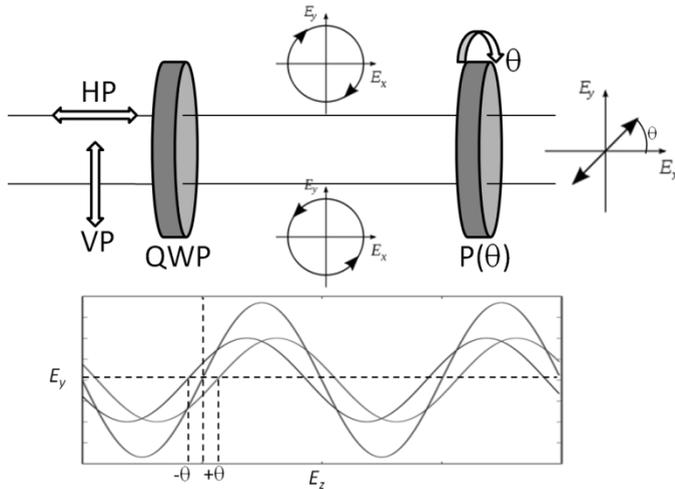
Vê-se, para este caso, que a onda se encontra na mesma direção de propagação, mas o ângulo de fase, neste caso, é $+\theta$.

A intensidade resultante da interferência entre os feixes \vec{E}_{r1} e \vec{E}_{r2} pode ser escrita como:

$$I = I_{r1} + I_{r2} + 2\sqrt{I_{r1}I_{r2}}\cos\Delta\theta \quad (4.10)$$

Neste caso $\Delta\theta = 2\theta$, que é o deslocamento de fase.

Figura 4.7. Diagrama do sistema óptico e do comportamento dos feixes passando pelo sistema.



Fonte: Autor.

Então, tem-se que o deslocamento de fase pode ser feito pelo giro do polarizador $P(\theta)$ e o defasamento será duas vezes o ângulo de giro

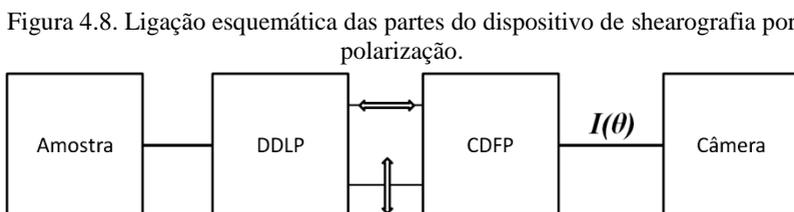
do polarizador, diferentemente do método tradicional onde o deslocamento de fase é feito através de um espelho deslocado por atuador piezoelétrico.

Neste documento, o conjunto de QWP e $P(\theta)$ será referido como Configuração para Deslocamento de Fase por Polarização (CDFP).

Nos ensaios com shearografia, os feixes HP e VP correspondem aos feixes deslocados lateralmente e emergentes do interferômetro. No sistema tradicional os feixes não têm uma polarização específica. É então necessário modificar o interferômetro.

Além de dois feixes perpendicularmente polarizados o sistema deve ter a capacidade de fazer o deslocamento lateral, característico da shearografia. Esse sistema será chamado Dispositivo de Deslocamento Lateral Polarizado (DDLDP).

Na Figura 4.8, tem-se uma representação básica da ligação entre as partes que compõem o dispositivo de shearografia com deslocamento de fase por polarização.



Fonte: Autor.

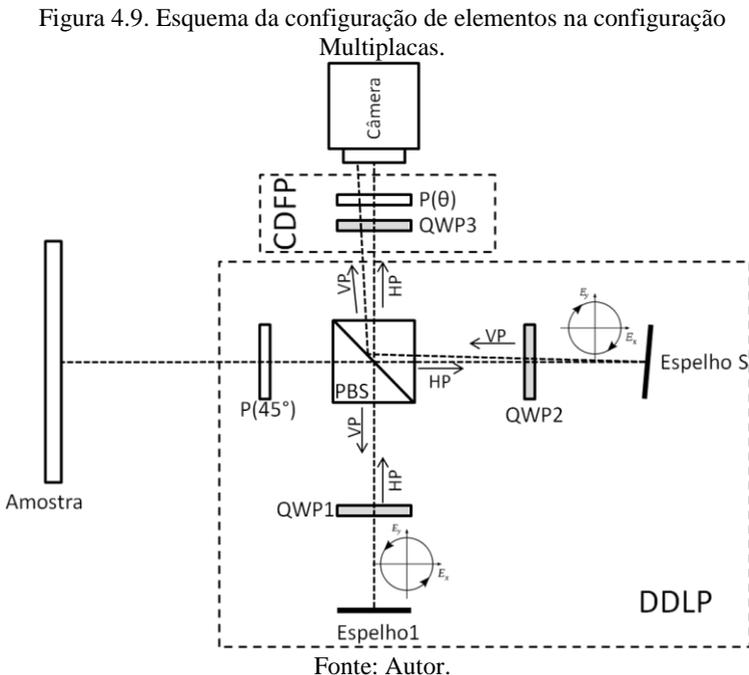
Para ter um interferômetro robusto, além de efetuar a CDFP, é necessário avaliar as possibilidades de construção do DDLDP nas quais seja possível ter um elemento mais compacto e robusto. Neste trabalho, testaram-se três configurações diferentes para obter este resultado.

4.2. CONFIGURAÇÃO MULTIPLACAS

Nesta configuração, visível na Figura 4.9, é modificado o DDLDP. Foi trocado o BS por um PBS. Foram adicionadas placas de atraso QWP1 e QWP2 nos braços do interferômetro. Também, foi colocado um polarizador $P(45^\circ)$ na entrada do PBS. A CDFP foi disposta ao final do interferômetro para realizar o deslocamento de fase por polarização.

4.2.1. Princípio de funcionamento

A configuração Multiplacas é mostrada na Figura 4.9. Os feixes refletidos pelo objeto analisado, aqui denominado simplesmente de “amostra”, passam por um polarizador inclinado 45° $P(45^\circ)$, para garantir que as intensidades das componentes de polarização incidentes no PBS sejam da mesma ordem de grandeza. Os feixes são divididos em suas componentes vertical (VP) e horizontal (HP) de polarização. Cada feixe atravessa uma placa de atraso QWP1(45°) e QWP2(45°) se tornando uma onda com polarização circular à direita para a componente HP e circular à esquerda para a componente VP. As componentes são refletidas pelo Espelho1 e Espelho S encarregado de fazer o “shear” ou deslocamento lateral. Os feixes ao serem refletidos passam novamente pelas placas de atraso QWP1(45°) e QWP2(45°), pelo qual mudam a orientação inicial VP e HP da polarização em 90° e saem com polarizações HP e VP, respectivamente. Os feixes ingressam novamente no PBS, fazendo o percurso mostrado na Figura 4.9. Depois, atravessam a CDFP e interferem no sensor da câmera.



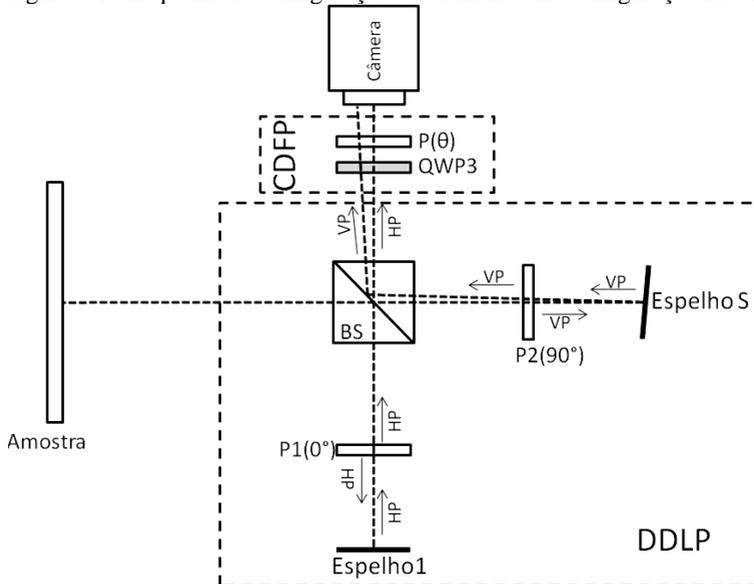
4.3. CONFIGURAÇÃO DP4F

A configuração DP4f (Figura 4.10) é um pouco mais simples do que a configuração Multiplacas. Nesta, continua-se utilizando o BS tradicional, mas nos braços do interferômetro são posicionados os polarizadores P1 e P2. A localização da CDFP continua igual.

4.3.1. Princípio de funcionamento

Como é mostrado na figura 4.10, na primeira etapa do percurso os feixes incidem no BS. Ali são divididos em dois feixes perpendiculares que atravessam os polarizadores P1(0°) e P2(90°), pelo qual ficam com polarizações HP e VP, respectivamente. Depois os feixes são refletidos pelo Espelho1 e Espelho S regressando de novo até o BS. Os feixes que chegam ao BS chegam perpendicularmente polarizados e ingressam na CDFP para o deslocamento de fase por polarização. Por último, interferem no sensor da câmera.

Figura 4.10 Esquema da configuração de elementos na configuração DP4f.



Fonte: Autor.

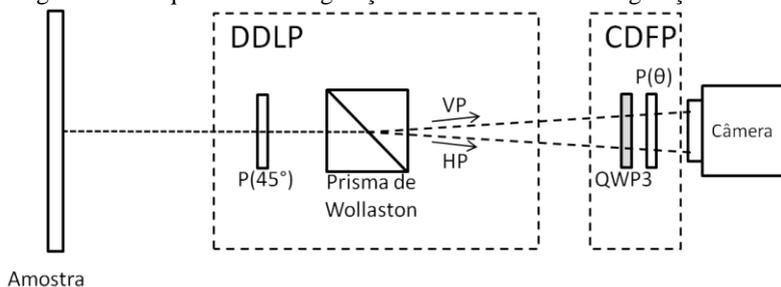
4.4. CONFIGURAÇÃO W4F

A configuração W4f (Figura 4.11) é aquela que apresenta menor quantidade de componentes e maiores diferenças em relação ao sistema tradicional. Vê-se que o DDLP muda completamente. Nesta configuração, o BS e os espelhos são substituídos por um polarizador $P(45^\circ)$ e um prisma de Wollaston, tornando o interferômetro muito mais compacto.

4.4.1. Princípio de funcionamento

Tem-se na Figura 4.11 que o feixe incide primeiramente no polarizador $P(45^\circ)$, para garantir que as intensidades das componentes de polarização incidentes no prisma de Wollaston sejam iguais. Posteriormente, o feixe atravessa o prisma de Wollaston e se divide em duas componentes perpendiculares entre elas (VP e HP), de acordo com a seção 4.1.4. Por último, atravessam a CDFP para o deslocamento de fase por polarização e interferem no sensor da câmera.

Figura 4.11 Esquema da configuração de elementos na configuração W4f.



Fonte: Autor.

CAPÍTULO V

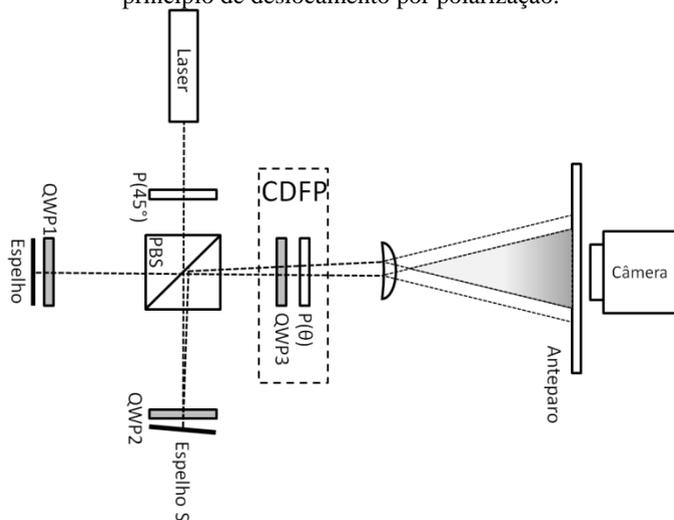
5. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é verificada experimentalmente a validade dos princípios e conceitos definidos neste trabalho, além de apresentados os resultados obtidos para cada configuração testada.

5.1. VALIDAÇÃO DO DESLOCAMENTO DE FASE POR POLARIZAÇÃO

Para a validação do princípio foi montada uma bancada como a descrita na Figura 5.1.

Figura 5.1 Diagrama da configuração de interferômetro para validação do princípio de deslocamento por polarização.



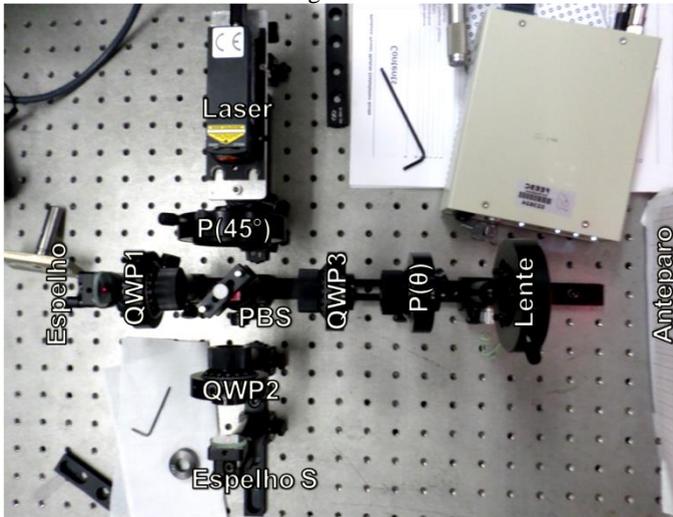
Fonte: Autor.

Vê-se que a configuração interna do interferômetro é similar à configuração Multiplacas descrita no capítulo anterior. A diferença é que nesta configuração tem-se o laser incidindo diretamente na entrada do interferômetro e, na saída, tem-se uma lente para expandir os feixes que interferem no anteparo translúcido. As imagens projetadas no anteparo são captadas pela câmera colocada na face oposta do anteparo. A ideia é gerar um padrão de interferência e verificar o deslocamento de

fase ao girar o polarizador, que é o que se espera de acordo com o princípio de deslocamento por polarização.

Depois de fazer a montagem da Figura 5.2, obteve-se o padrão de interferência. Posteriormente, tomaram-se imagens girando o polarizador com incrementos de 20° . O conjunto de imagens é observado na Figura 5.3. Além disso, traçou-se o perfil de uma linha na mesma posição nas três imagens, correspondentes ao giro do polarizador em $P(0)$, $P(60)$ e $P(120)$, conforme destacado na Figura 5.3. Com o perfil das linhas pode-se verificar o deslocamento das franjas correspondente ao giro do polarizador (Figura 5.4), conforme esperado.

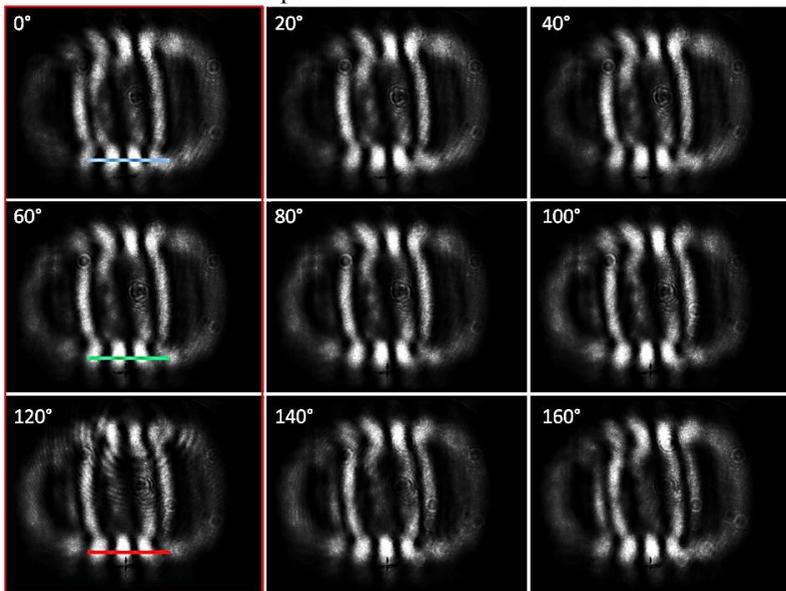
Figura 5.2 Montagem feita para a avaliação de acordo com o diagrama da Figura 5.1.



Fonte: Autor.

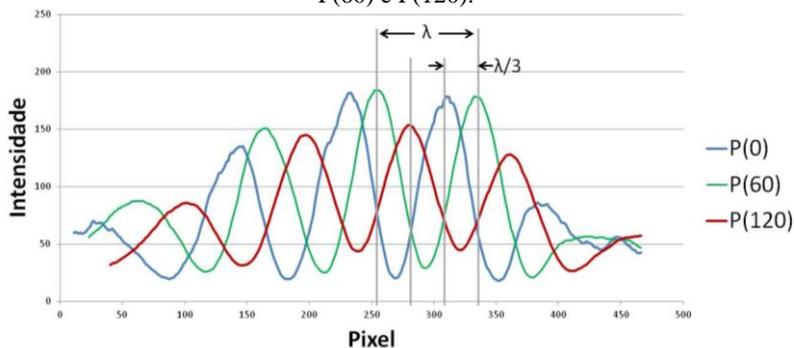
Considerando que o giro de θ no polarizador equivale a um deslocamento de fase de 2θ , tem-se um deslocamento de fase de 0° , 120° e 240° . Na Figura 5.4 pode-se verificar que o deslocamento entre os picos das linhas é próximo a $1/3$ do comprimento de onda (λ), ou seu equivalente de 120° em deslocamento de fase. Vê-se também que no giro do polarizador em 120° a amplitude do sinal é menor em comparação às outras duas, possivelmente pelo desalinhamento das componentes ou a não circularidade na polarização, como será discutida na próxima seção.

Figura 5.3 Conjunto de imagens do padrão de interferência, obtido girando o polarizador a cada 20° .



Fonte: Autor.

Figura 5.4 Perfil de linha para as imagens do padrão de interferência em P(0), P(60) e P(120).



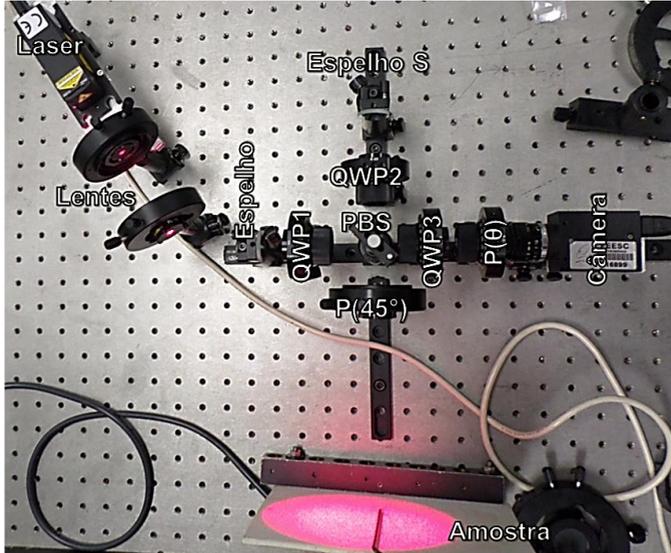
Fonte: Autor.

Realizada a validação do princípio, o próximo passo é testar as diferentes configurações ou alternativas de deslocamento lateral polarizado.

5.2. CONFIGURAÇÃO MULTIPLACAS

De acordo com configuração proposta na Figura 4.9, realizou-se a montagem experimental visível na Figura 5.5.

Figura 5.5 Montagem física da Configuração Multiplacas.



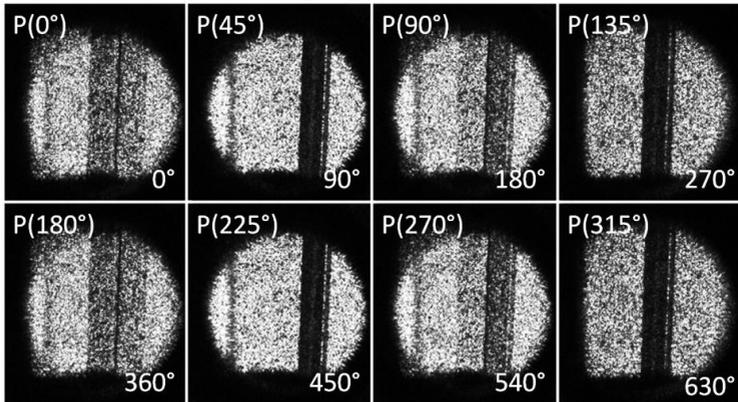
Fonte: Autor.

5.2.1. Resultados

Antes de fazer os testes com shearografia foram obtidas imagens girando o polarizador. É visível que, ao girar o polarizador, as intensidades das duas imagens que formam a imagem dupla, característica da shearografia, mudam consideravelmente, como mostra a Figura 5.6. Vê-se, por exemplo, que na posição de $P(0^\circ)$ tem-se a imagem dupla, mas nas posições $P(45^\circ)$ e $P(135^\circ)$ apenas uma das duas imagens é visível. Esperava-se que as intensidades das imagens que formam a imagem dupla fossem independentes do giro do polarizador. Este efeito pode ser compreendido considerando os múltiplos elementos que devem ser alinhados para ter as intensidades e as polarizações certas. As placas utilizadas neste experimento produzem o atraso de $\lambda/4$ apenas em uma faixa restrita de comprimento de onda, que não coincide com a faixa para a qual os outros componentes ópticos são otimizados para trabalhar. No Apêndice A pode-se ver as características e

configurações dos elementos usados nos testes. Ressalta-se que o comprimento de onda ótimo para o PBS (632,8 nm) está de acordo com o comprimento de onda utilizado no experimento, mas varia levemente ao comprimento de onda ótimo das QWP (500 nm – 600 nm).

Figura 5.6 Imagens resultantes do primeiro teste da configuração I, tomadas girando o polarizador a cada 45°.

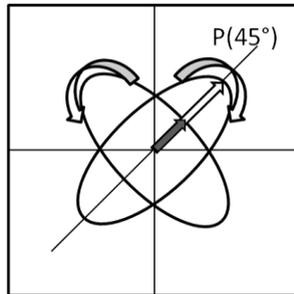


Fonte: Autor.

O efeito inesperado gerado pela não-otimização dos componentes ópticos para o comprimento de onda do laser utilizado pode ser melhor compreendidos com auxílio da Figura 5.7. Os resultados não são as imagens com polarizações circulares esperadas, mas sim elípticas. Vê-se nas Figura 5.6 e Figura 5.7 que nos ângulos de polarização $P(0^\circ)$, $P(90^\circ)$, $P(180^\circ)$ e $P(270^\circ)$ se espera que as ondas elípticas tenham igual intensidade. Nos ângulos $P(45^\circ)$ e $P(225^\circ)$ terão maior intensidade se a polarização elíptica for inclinada para a direita, e nos ângulos $P(135^\circ)$ e $P(315^\circ)$ a maior intensidade da imagem corresponderá à inclinação para a esquerda.

Uma solução paliativa para conviver com componentes ópticos não-otimizadas foi proposta por (Watanabe, Hayasaka, Sato, & Tanno, 2005) e (Suja Helen, Kothiyal, & Sirohi, 1998): ao adicionar uma placa de atraso de meia onda tem-se um atraso equivalente combinado de $\lambda/4$. Este atraso é quase acromático, já que a placa de atraso de meia onda introduz um erro de atraso que é equivalente a uma correção do erro induzido pela primeira placa. A ideia é deixar as duas imagens com a polarização o mais próxima da circular possível.

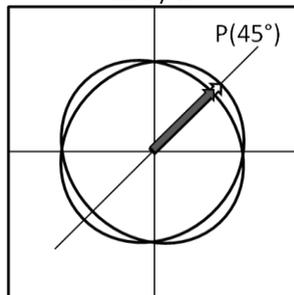
Figura 5.7 Efeito da placa de retardo na polarização ao ficar desalinhada ou ter um retardo diferente a $\lambda/4$.



Fonte: Autor.

Na Figura 5.8 tem-se uma representação do efeito na polarização das imagens depois de passar pelo conjunto QWP e HWP.

Figura 5.8 Resultado na polarização ao adicionar a placa de $\lambda/2$ depois da placa de $\lambda/4$.



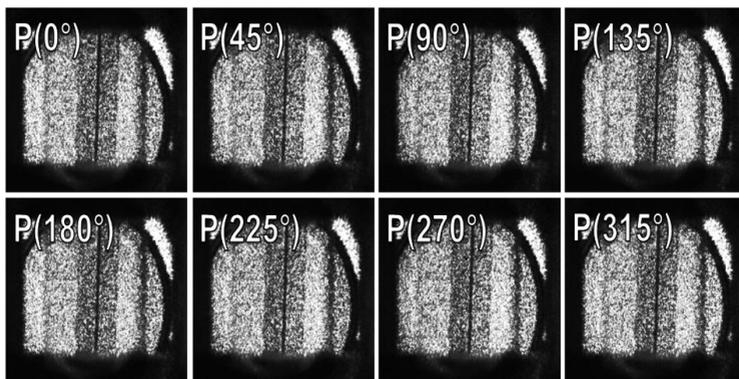
Fonte: Autor.

Novamente foi feito o teste a partir do giro de 45° do polarizador. As imagens são visíveis na Figura 5.9. Vê-se, que neste caso, não é perceptível a mudança das intensidades das duas imagens ao girar o polarizador.

Com base nos resultados anteriores, o sistema foi então reconfigurado e os efeitos indesejáveis, devido a diferenças na polarização, foram eliminados.

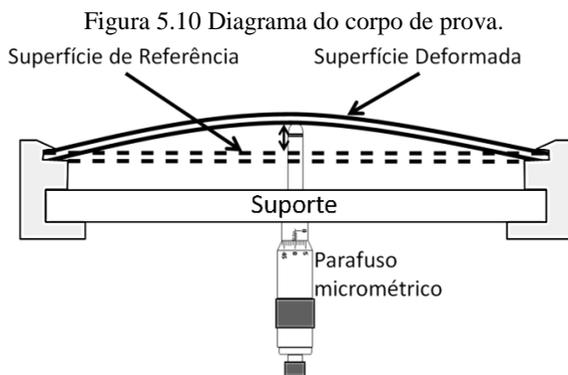
Para realização de testes com shearografia foi usado um corpo de prova, que é composto por uma placa de alumínio circular engastada nas extremidades num suporte e na qual é aplicada deformação controlada com um parafuso micrométrico posicionado no centro da mesma, como mostra a Figura 5.10 em escala exagerada.

Figura 5.9 Imagens resultantes ao adicionar a placa de $\lambda/2$. Tomadas girando o polarizador cada 45° .



Fonte: Autor.

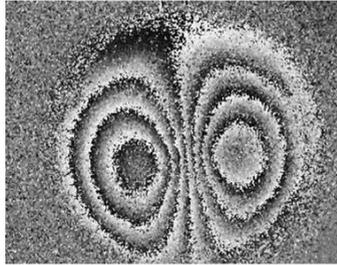
As imagens de shearografia foram adquiridas e processadas de acordo com o algoritmo de quatro passos, apresentado no Capítulo II. Um dos resultados pode ser observado na Figura 5.11.



Fonte: Autor.

Para a configuração Multiplacas, vê-se então que se requer o alinhamento minucioso de muitos elementos, tendo em conta que os de maior sensibilidade ao desalinhamento são as placas de atraso, que nesta configuração conta-se com três. Porém testaram-se outras configurações que foram mais compactas, são elas: DP4f e W4f, onde o termo 4f faz referência ao sistema óptico utilizado no cabeçote de medição desenvolvido pelo projeto SHIC na UFSC, visível na Figura 3.8.

Figura 5.11 Mapa de fase resultantes da configuração I.



Fonte: Autor.

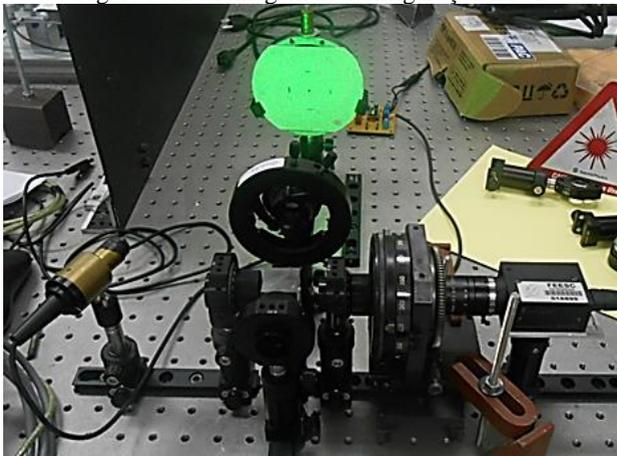
5.3.CONFIGURAÇÃO DP4F

A descrição do cabeçote DP4f foi feita de forma detalhada na seção 4.3 e a configuração é visível na Figura 4.10. A seguir são apresentados os resultados desta configuração nos testes feitos com shearografia.

5.3.1. Resultados

Os primeiros testes foram feitos em uma bancada de laboratório como é mostrado na Figura 5.12

Figura 5.12 Montagem da Configuração DP4f.

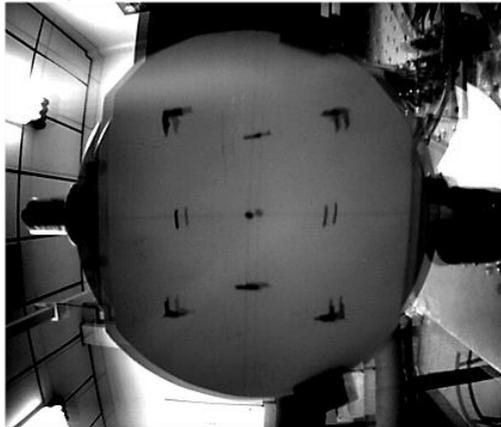


Fonte: Autor.

A primeira mudança nesta configuração é a troca da fonte de iluminação. Desta vez, a iluminação é realizada com um laser verde, que emite luz com comprimento de onda de 532 nm. Essa alteração foi realizada pelo fato de que a placa de atraso utilizada para os testes produz o atraso necessário de $\lambda/4$ nesse comprimento de onda. Por outro lado, no cabeçote Multiplacas, foi utilizado o laser vermelho pelo fato de que o PBS é otimizado para 632 nm de comprimento de onda.

Os testes com shearografia foram realizados utilizando o cabeçote DP4f. A Figura 5.13 mostra uma imagem com deslocamento lateral tomada com essa configuração. A Figura 5.14 apresenta o conjunto de imagens de “franjas ao vivo”, as quais são resultado da subtração de uma imagem de referência e uma imagem com carregamento aplicado. As imagens representam uma mesma deformação, porém com diferentes giros do polarizador, com defasamentos de $\pi/2$.

Figura 5.13 Imagem com deslocamento lateral na configuração DP4f.

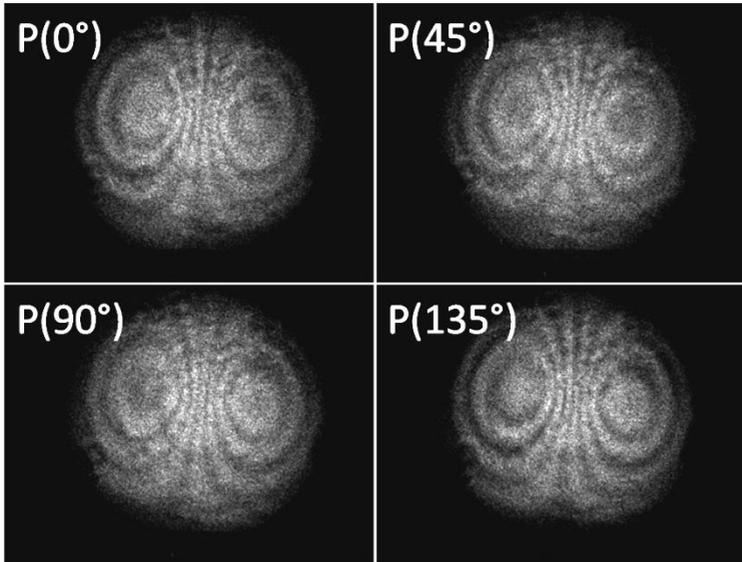


Fonte: Autor.

Já para fazer o mapa da diferença de fase, visível na Figura 5.15, foi necessário um conjunto de quatro imagens antes e quatro imagens depois da deformação, como foi descrito na seção 2.3.2.

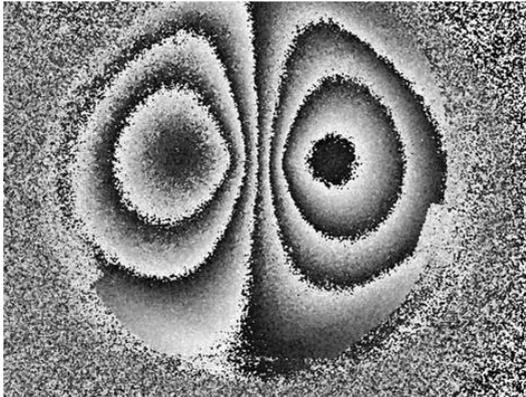
Com esta configuração foi possível determinar que não é necessária a adição da placa de atraso de $\lambda/2$ para fazer a correção na polarização das imagens, já que a circularidade da polarização resultante só depende de uma única placa de atraso de $\lambda/4$. Por esse motivo a configuração multiplacas foi descartada, não sendo necessária a aquisição de placas de atraso otimizadas para o comprimento de onda do laser.

Figura 5.14 Imagens de interferência obtidas girando o polarizador a cada 45°.



Fonte: Autor.

Figura 5.15 Mapa de fase resultante usando a cabeçote DP4f.



Fonte: Autor.

Depois de se comprovar a viabilidade da configuração DP4f, foi desenhado um protótipo para testes futuros com vibração, visível na Figura 5.16.

Figura 5.16 Desenho do protótipo do cabeçote DP4f.



Fonte: Autor.

5.4. CONFIGURAÇÃO W4f

A descrição do cabeçote W4f foi feita de forma detalhada na seção 4.4 e a configuração pode ser observada na Figura 4.11. A seguir são apresentados os resultados desta configuração nos testes feitos com shearografia.

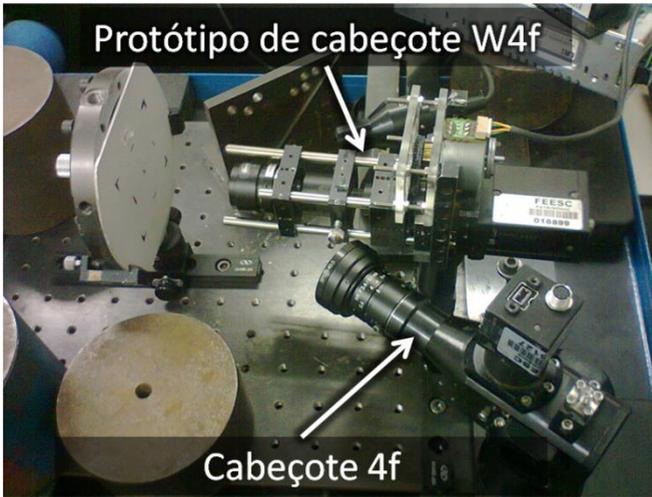
5.4.1. Resultados

Nos ensaios realizados com a configuração W4f, foi utilizado primeiramente um protótipo de bancada, como é visível na Figura 5.17.

A Figura 5.18 apresenta uma imagem tomada com o cabeçote W4f, onde é visível o deslocamento lateral típico da shearografia. Porém, a utilização do prisma de Wollaston apresenta uma dificuldade, pois o deslocamento lateral não é constante em toda a imagem, como pode ser visto na Figura 5.18. Por exemplo, na parte esquerda tem-se um deslocamento maior do que na parte direita da imagem.

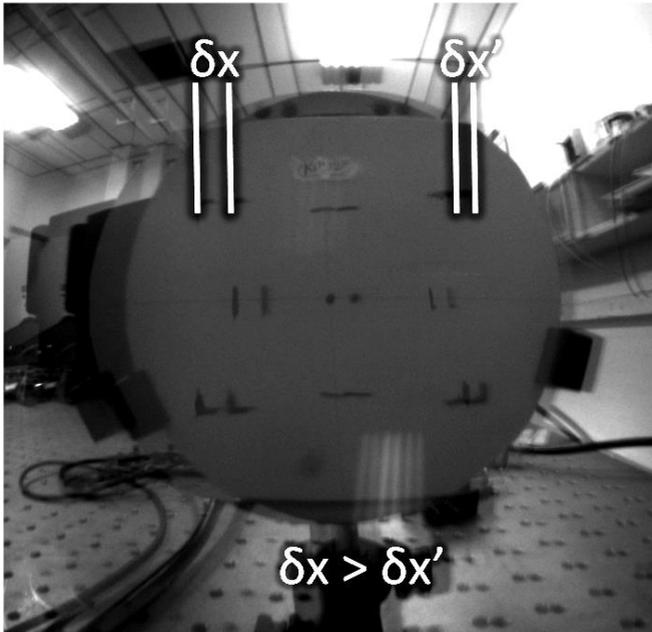
Para uma melhor compreensão dos efeitos do prisma, foi realizada uma simulação do percurso dos raios pelo sistema óptico, conforme apresentado na Figura 5.19. O detalhamento da formação das imagens e do percurso dos raios é visível na Figura 5.20.

Figura 5.17 Protótipo de cabeçote WP4f e cabeçote 4f.



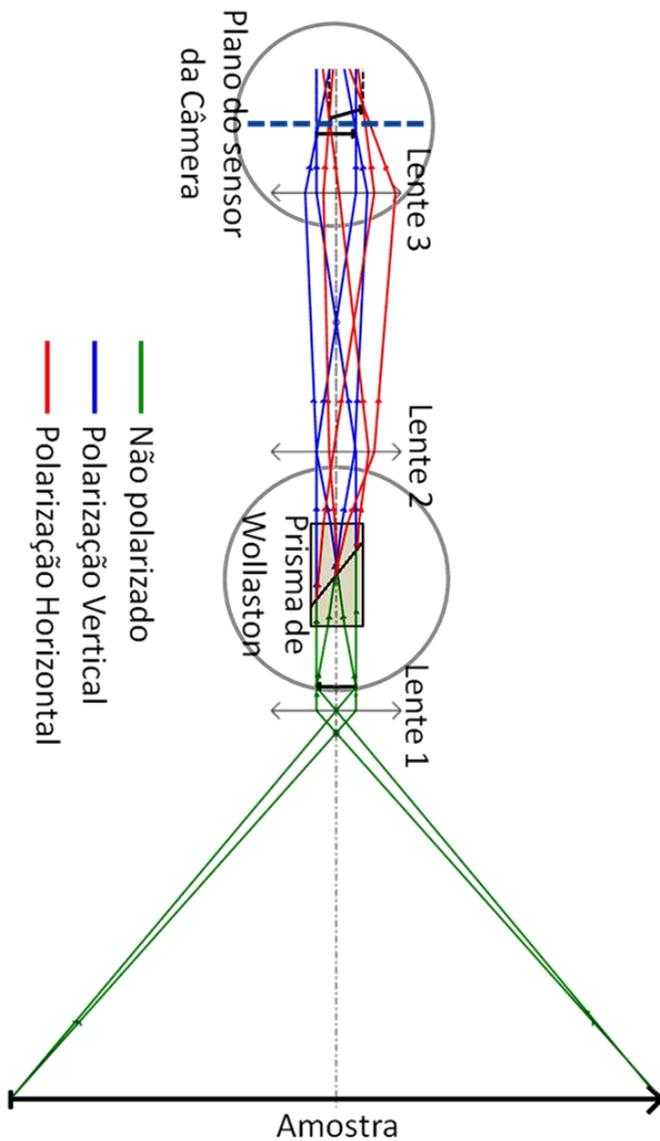
Fonte: Autor.

Figura 5.18 Imagem tomada com o cabeçote W4f.



Fonte: Autor.

Figura 5.19 Diagrama de percurso dos raios pelo sistema óptico usando o prisma de Wollaston.

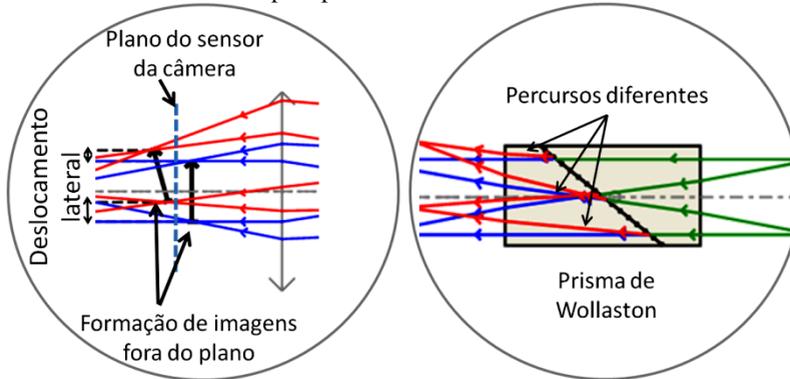


Fonte: Autor.

Os resultados dos testes de shearografia com o cabeçote W4f podem ser vistos na Figura 5.21.

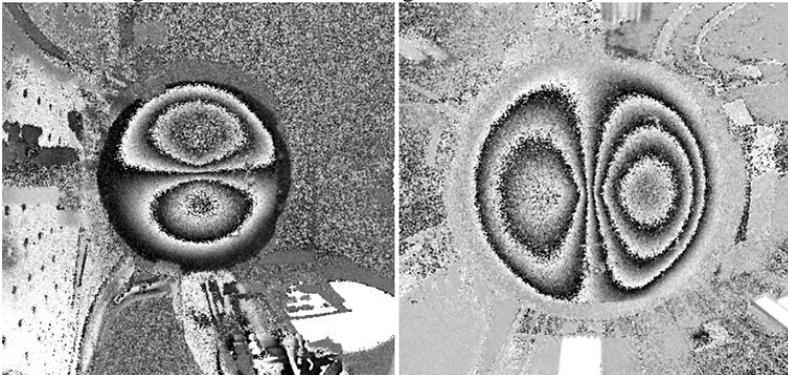
Depois de se comprovar a viabilidade da configuração W4f foi desenhado um protótipo para testes futuros com vibração, visível na Figura 5.22.

Figura 5.20 Detalhamento da formação das imagens e do percurso dos raios pelo prisma de Wollaston.



Fonte: Autor.

Figura 5.21 Testes de shearografia com o cabeçote W4f.



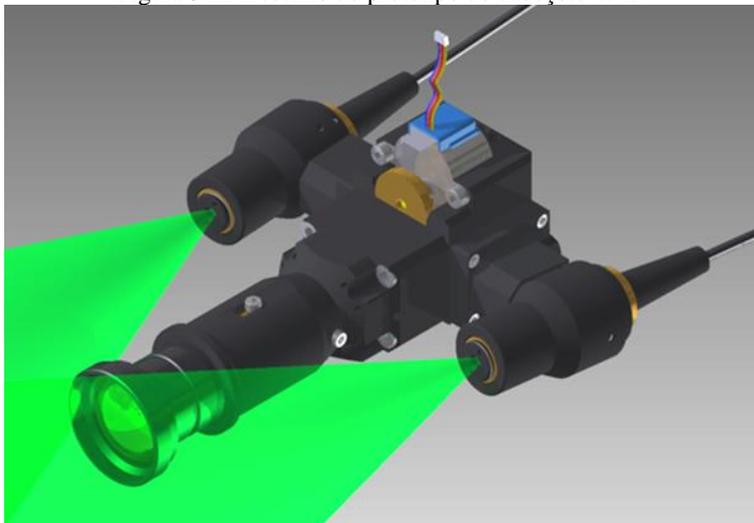
Fonte: Autor.

5.5. DIFICULDADES

Uma dificuldade presente nas configurações, no momento da visualização dos mapas de fase, foi a redução do contraste em alguns

momentos dos testes. Testes adicionais foram realizados para determinar a razão. Os testes de validação consistiam em pegar quatro pixels de uma imagem ao vivo e ver a variação da intensidade ao girar o polarizador.

Figura 5.22 Desenho do protótipo do cabeçote W4f.

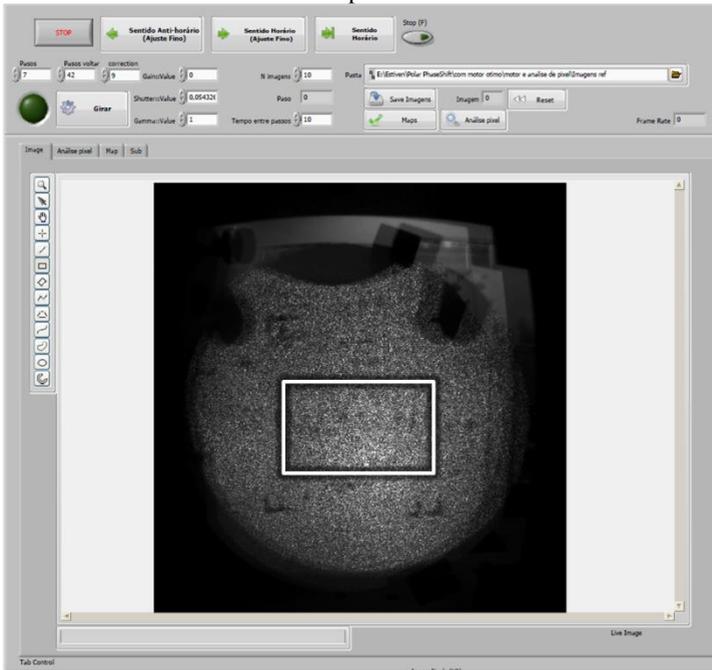


Fonte: Autor.

Para fazer os testes foi desenvolvido um aplicativo utilizando as ferramentas do software LabVIEW®. O aplicativo permite capturar as imagens, controlar o motor de passo que gira o polarizador, fazer os processamentos para cálculo de fase e aplicar filtros simples. Na Figura 5.23 pode-se ver uma imagem do aplicativo com uma captura de imagem, os vértices do quadro vermelho na imagem apresentam a posição dos quatro pixels examinados.

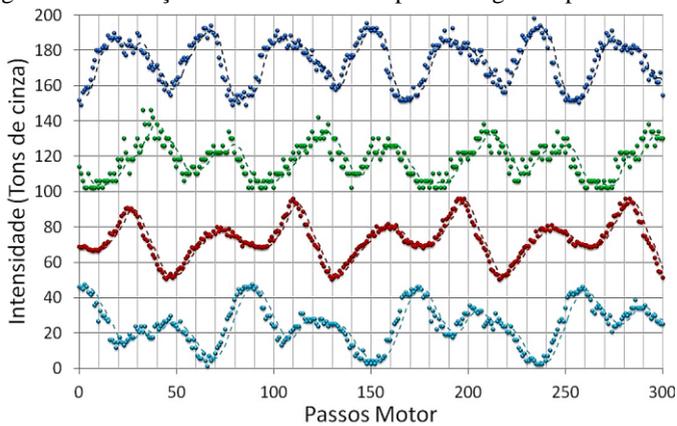
Posteriormente foram analisadas as variações de intensidade dos quatro pixels ao avançar cada passo do motor, equivalente a um giro de 4,2 graus do polarizador por passo. Os resultados podem ser vistos na Figura 5.24. Para fazer uma melhor análise, os dados foram exportados e analisados no software Microsoft Excel®. No resultado é visível que os ciclos de intensidade não correspondem a ondas senoidais, como era esperado.

Figura 5.23 Captura da aplicação desenvolvida em LabVIEW® para a análise dos pixels.



Fonte: Autor

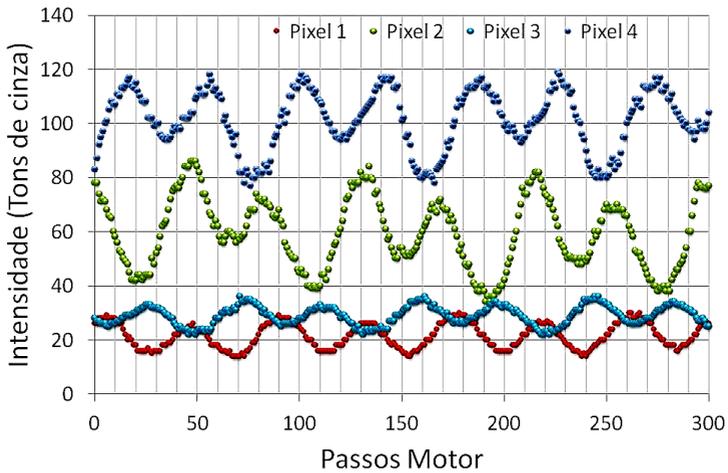
Figura 5.24 Variação da intensidade dos pixels ao girar o polarizador.



Fonte: Autor.

A principal suspeita da distorção nos sinais obtidos é o alinhamento imperfeito dos componentes ópticos. O alinhamento foi feito com cuidado e os testes foram repetidos, tomando quatro pixels diferentes, mas em posições similares do teste anterior, levando aos resultados da Figura 5.25. Houve uma melhora significativa, mas ainda não se obteve o sinal senoidal ideal esperado.

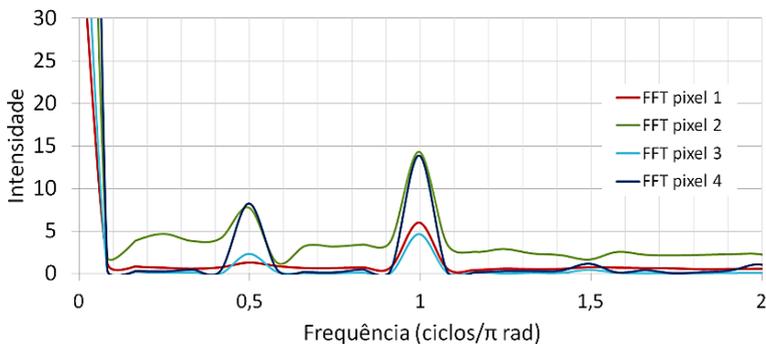
Figura 5.25 Variação da intensidade dos pixels ao girar o polarizador depois do alinhamento minucioso.



Fonte: Autor.

Observando detalhadamente os resultados na Figura 5.25 vê-se que a forma da onda resultante pode ser obtida com a somatória de duas ondas senoidais com frequências diferentes. Por esta razão foi feita uma análise de Fourier nos dados obtidos. O resultado é visível na Figura 5.26. Como foi suposto, o resultado das componentes de frequência é de duas ondas principais, uma com frequência de um ciclo por cada meio giro do polarizador, que corresponde ao resultado esperado. A outra frequência, com a metade da frequência principal, tem quase a metade da amplitude.

Figura 5.26 Análise de Fourier dos dados obtidos nos quatro pixels girando o polarizador.

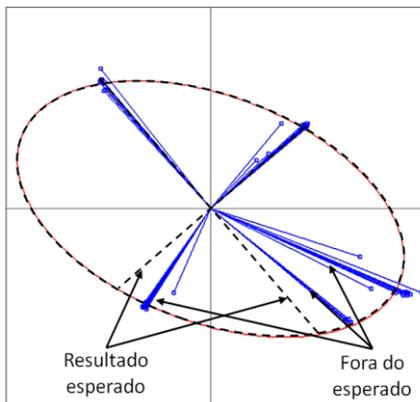


Também foram feitos testes com o software de análise de fase por meio dos gráficos de Lissajous (Albertazzi, Vieira Fantin, Willemann, & Benedet, 2014), desenvolvido pelo grupo de pesquisa em shearografia da UFSC. O resultado pode ser visto na Figura 5.27. Para fazer a análise com esta ferramenta foram tomados grupos de 10 imagens, onde cada grupo contém imagens com quatro valores de deslocamento de fase, correspondendo a 0 , $\pi/2$, π e $2\pi/3$. O resultado esperado na análise com o software de Lissajous é a formação de quatro conglomerados de pontos, conectados de forma intercalada por uma linha passando pelo centro da elipse. Porém o resultado obtido não apresentou a forma esperada.

Determinou-se, depois das análises, que a causa da distorção dos sinais está associada a muitos possíveis fatores, entre eles a transmitância do polarizador que não é completamente uniforme. Adicionalmente, um problema de alinhamento mecânico entre o vetor normal ao polarizador e o eixo do dispositivo de rotação pode alterar levemente o ângulo de incidência dos feixes. Estas suspeitas foram fortalecidas porque verificou-se que uma rotação de 90° não apresenta os mesmos resultados que uma rotação de 270° , o que resulta na adição de uma onda com a metade da frequência do esperado. Esse efeito pode ser visto na Figura 5.26.

Para contornar essa dificuldade, optou-se por dois métodos para fazer o processamento das imagens.

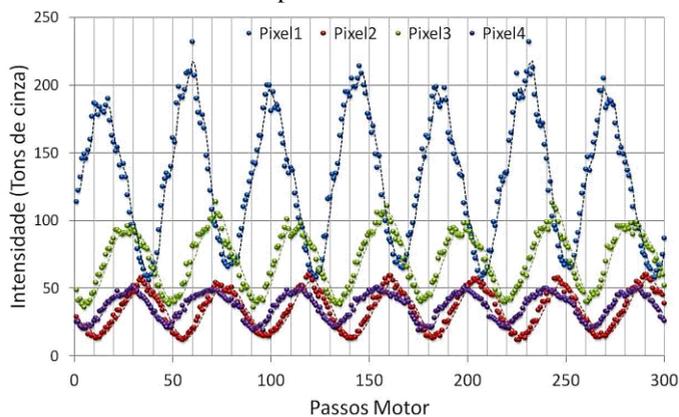
Figura 5.27 Análise de fase com software Lissajous.



Fonte: Autor.

O primeiro consiste na utilização de apenas o primeiro ciclo do polarizador, ou seja, girando o polarizador de 0° até 180° e pulando a faixa de 180° até 360° . Dessa forma, o movimento do motor, que gira o polarizador de modo automático, passou a ser sempre no mesmo sentido, evitando assim a histerese causada pelos mecanismos e utilizando sempre a mesma região do polarizador. O resultado da variação da intensidade em quatro pixels diferentes é visível na Figura 5.28.

Figura 5.28 Variação da intensidade ao pular a faixa de 180° a 360° no giro do polarizador.

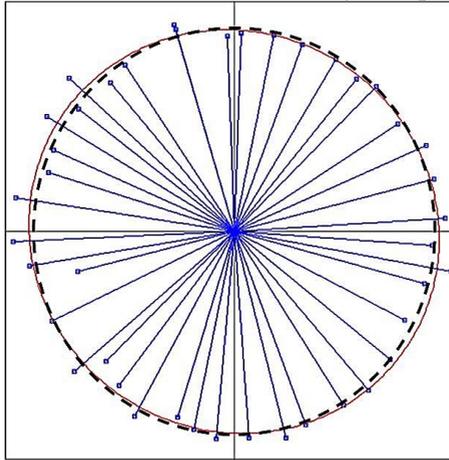


Fonte: Autor.

É claramente visível que a variação da intensidade ficou muito mais repetitiva. Além disso, foram refeitos os testes com o software de Lissajous, desta vez, pegando imagens com diferentes valores de deslocamento de fase. O resultado é visível na Figura 5.29. Vê-se que o resultado está muito mais próximo do esperado.

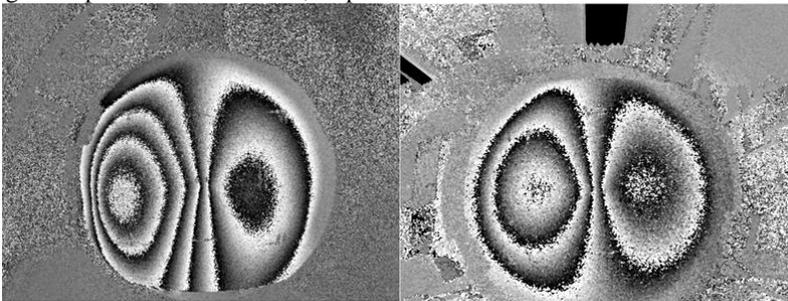
Foram refeitos testes com a técnica de shearografia e os novos resultados apresentaram melhoria no contraste das franjas, visíveis na Figura 5.30.

Figura 5.29 Análise de fase com software Lissajous depois da correção.



Fonte: Autor.

Figura 5.30 À esquerda, mapa de fase resultante utilizando o método de meio giro do polarizador. À direita, mapa de fase resultante do método tradicional.



Fonte: Autor.

O segundo método para fazer o processamento das imagens consiste em considerar a frequência adicional que se obtém ao fazer um

giro completo do polarizador. Porém, tem-se que reescrever a Equação (2.13) adicionando a componente com a metade da frequência, como resultado tem-se a equação (5.1):

$$I = I_f + I_M \cos(\phi) + I'_M \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (5.1)$$

Tem-se então, que para fazer o cálculo do mapa de fase o algoritmo de quatro passos não é suficiente. Foi feita uma modificação do cálculo de mapa de fase, fazendo agora com um algoritmo de oito passos com deslocamentos de fase de $\pi/2$ até $7\pi/2$. As intensidades resultantes ficaram da forma:

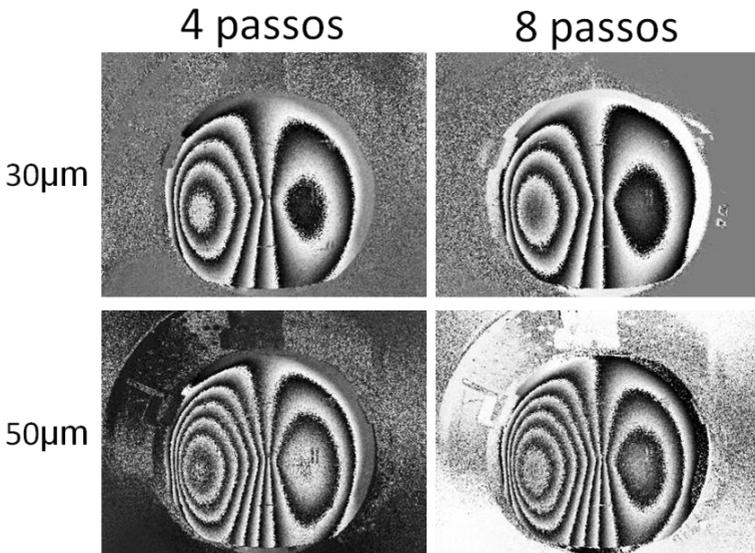
$$\begin{aligned} I_0 &= I_f + I_M \cos(\phi + 0) + I'_M \cos\left(\frac{\phi + 0}{2}\right) \\ I_{90} &= I_f + I_M \cos\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) + I'_M \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \\ I_{180} &= I_f + I_M \cos(\phi + \pi) + I'_M \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) \\ I_{270} &= I_f + I_M \cos\left(\phi + \frac{3\pi}{2}\right) + I'_M \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{3\pi}{4}\right) \\ I_{360} &= I_f + I_M \cos(\phi + 2\pi) + I'_M \cos\left(\frac{\phi}{2} + \pi\right) \\ I_{450} &= I_f + I_M \cos\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) + I'_M \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{5\pi}{4}\right) \\ I_{540} &= I_f + I_M \cos(\phi + \pi) + I'_M \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{3\pi}{2}\right) \\ I_{630} &= I_f + I_M \cos\left(\phi + \frac{3\pi}{2}\right) + I'_M \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{7\pi}{4}\right) \end{aligned} \quad (5.2)$$

Combinando os sinais, pode-se chegar a uma expressão para o cálculo de fase presente na Equação (5.3):

$$\phi = \arctan \left[\frac{(I_{270} + I_{630}) - (I_{90} + I_{450})}{(I_0 + I_{360}) - (I_{180} + I_{540})} \right]; \quad -\pi \leq \phi \leq \pi \quad (5.3)$$

Foram feitas as modificações para o cálculo de fase e fizeram-se alguns ensaios. Na Figura 5.31 vê-se o resultado dos testes feitos com o algoritmo de oito passos e comparando com o método anterior de quatro passos para duas deformações diferentes.

Figura 5.31 Resultado dos testes feitos com o algoritmo de oito e quatro passos para duas deformações.



Fonte: Autor.

Na Figura 5.31 vê-se que a diferença entre o algoritmo de quatro passos, em meio giro, e o algoritmo de oito passos, em um giro completo do polarizador, não é significativa. Porém, o algoritmo de oito passos requer mais tempo para adquirir as imagens, o que pode ser uma variável importante em um caso de carregamento térmico, já que poderia ter uma mudança significativa da deformação entre cada imagem adquirida.

Foram feitos testes com carregamento térmico para observar o comportamento dos dois algoritmos neste caso. Para fazer estes ensaios foi utilizado outro corpo de prova (Figura 5.32). O novo corpo de prova consiste em uma placa de alumínio com furações de diferentes diâmetros e formas, isto para simular defeitos. A placa está coberta com um revestimento de material compósito em uma das faces.

Figura 5.32 Corpo de prova para os ensaios com carregamento térmico. À esquerda, vista frontal. À direita, vista posterior.



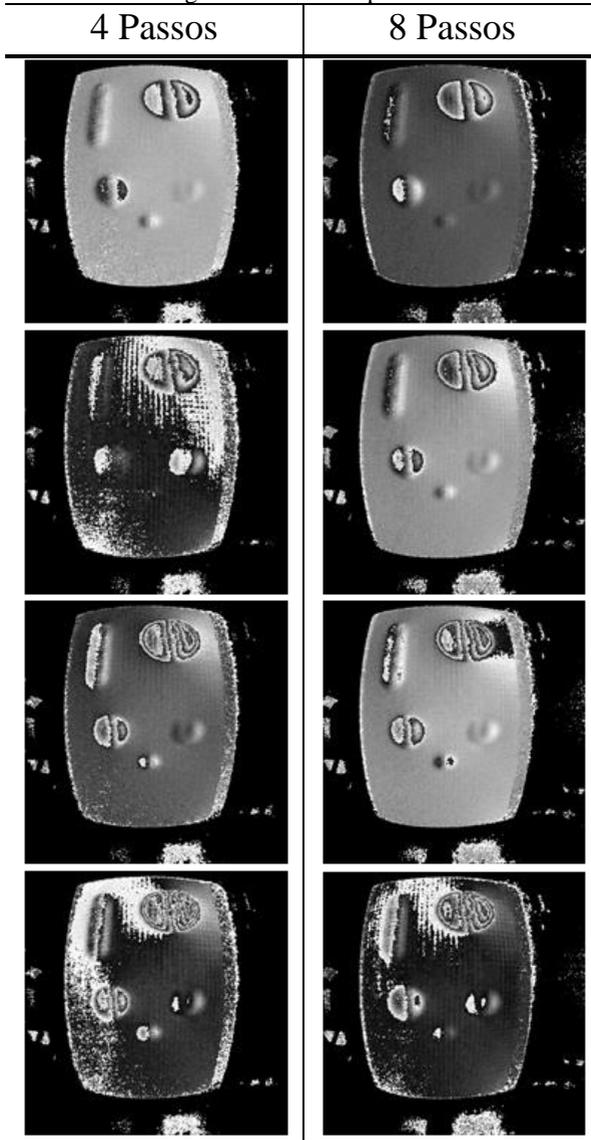
Fonte: Autor.

Os resultados dos ensaios com carregamento térmico usando a técnica de sheargrafia são visíveis na Figura 5.33. O cálculo do mapa de fase foi feito com os algoritmos de quatro e oito passos. Além disso, as imagens foram arrumadas de forma tal que ficaram lado a lado valores de deformação similares, para facilitar a comparação dos dois métodos.

Vê-se, na Figura 5.33, que os resultados dos testes com o algoritmo de oito passos foram muito bons e apresentam um bom contraste entre as franjas formadas e facilitaram a localização dos defeitos. Assim, o tempo entre a captura das imagens não foi um inconveniente, como era suspeito. Também, pode-se dizer que visualmente não tem muita diferença o desempenho dos dois algoritmos.

Depois, de se avaliar o desempenho das configurações e das possíveis soluções às dificuldades em cada uma delas, avaliou-se a robustez do interferômetro.

Figura 5.33 Resultado dos testes feitos com carregamento térmico utilizando os algoritmos de 4 e 8 passos.



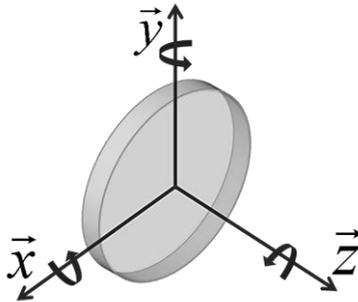
Fonte: Autor.

5.6. AVALIAÇÃO DA ROBUSTEZ NO DESLOCAMENTO DE FASE POR POLARIZAÇÃO

A principal motivação da troca do tipo de interferômetro utilizado em shearografia é a redução da sensibilidade à vibração em relação ao interferômetro tradicional. Como foi descrito na seção 2.3.3 e visível na Figura 2.12 o interferômetro tradicional, tipo Michelson, é altamente sensível a deslocamentos relativos dos espelhos que compõem o interferômetro. De acordo aos princípios do deslocamento de fase por polarização descritos na seção 4.1.5, o deslocamento de fase ocorre só no caso do giro do polarizador no eixo \vec{z} , sendo invariante a qualquer outra movimentação que poderia ser causada por vibrações em \vec{x} e \vec{y} .

A seguir, são apresentados os resultados experimentais da avaliação da imunidade do deslocamento de fase por polarização à movimentação do polarizador em seus diferentes graus de liberdade (Figura 5.34). Os testes foram feitos sobre este elemento já que é o único elemento móvel no interior do interferômetro.

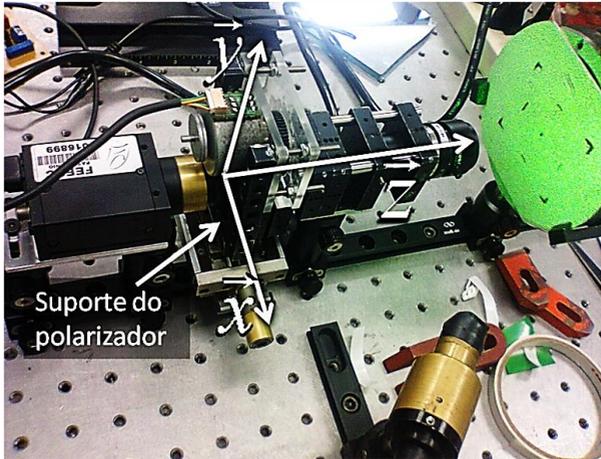
Figura 5.34 Representação dos graus de liberdade do polarizador.



Fonte: Autor.

Os testes foram feitos com a configuração W4f e o corpo de prova visível na Figura 5.10, no qual a deformação é feita com um parafuso micrométrico, isto para ter uma mesma deformação nos testes e fazer uma boa comparação dos resultados. A montagem experimental é visível na Figura 5.35.

Figura 5.35 Montagem para a movimentação do polarizador em seus diferentes graus de liberdade.



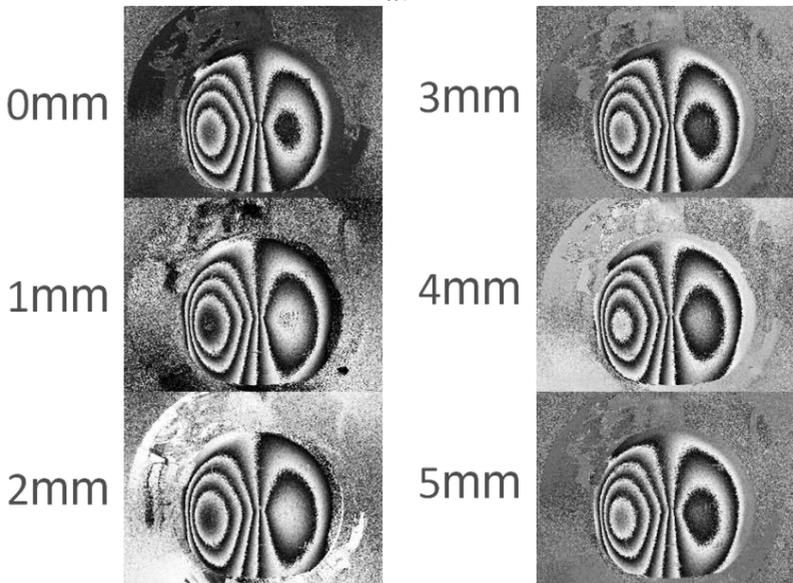
Fonte: Autor.

Primeiro foi adquirido um mapa de fase de referência. Em seguida foi provocada uma deformação com o parafuso micrométrico no corpo de prova. Depois foram adquiridos mapas de fase para cada deslocamento do polarizador.

Na Figura 5.36 são visíveis os diferentes mapas de fase resultantes do teste movimentando o polarizador ao longo do \vec{x} . O deslocamento ao longo do \vec{x} foi feito até os cinco milímetros, sendo este um deslocamento muito além do esperado, já que na construção do cabeçote a tolerância para este movimento é menor do que um milímetro. Não se percebeu uma mudança apreciável na qualidade das imagens.

Na Figura 5.37 são visíveis os resultados ao movimentar o polarizador ao longo de \vec{y} . Como no resultado anterior não tem-se uma mudança apreciável nos diferentes mapas de fase. No deslocamento correspondente aos 10 mm, vê-se uma perda da qualidade, isto pelo fato que aos 10 mm mais da metade da lente principal ficava por fora da formação da imagem. O destaque é que, sob esta condição, ainda é possível ver franjas.

Figura 5.36 Mapas de fase resultantes ao movimentar o polarizador ao longo de \vec{x} .



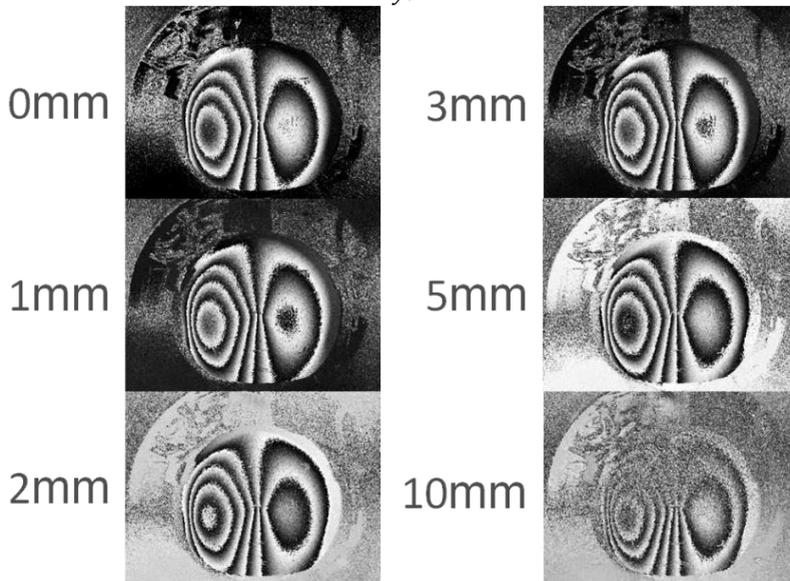
Fonte: Autor

O resultado da movimentação ao longo de \vec{z} é visível na Figura 5.38. Similar aos resultados anteriores, não se percebe nenhuma mudança significativa.

O teste de giro do polarizador foi feito entorno a \vec{y} . Vê-se na Figura 5.39 os mapas de fase resultantes. Nos valores de zero até seis graus de giro não é apreciável uma mudança na qualidade das imagens. Nos valores de oito até catorze graus vê-se uma diminuição na qualidade das imagens. A diminuição da qualidade pode ser compreendida pelo fato de que o polarizador está entre duas camadas de vidro e ao girá-lo em torno de \vec{y} produz-se um deslocamento perceptível da imagem, pelos efeitos da refração.

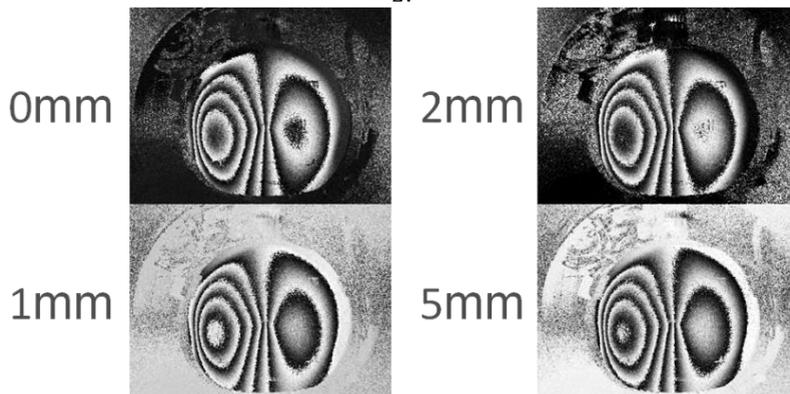
Para validar mais os resultados foi feito um teste adicional, tomando cada imagem que compõe os mapas de fase em posições angulares diferentes do polarizador, similar ao que aconteceria em um ambiente com vibração. O resultado é visível na Figura 5.40. Não se percebe mudanças significativas na qualidade das imagens.

Figura 5.37 Mapas de fase resultantes ao movimentar o polarizador ao longo de \vec{y} .



Fonte: Autor.

Figura 5.38 Mapas de fase resultantes ao movimentar o polarizador ao longo de \vec{z} .

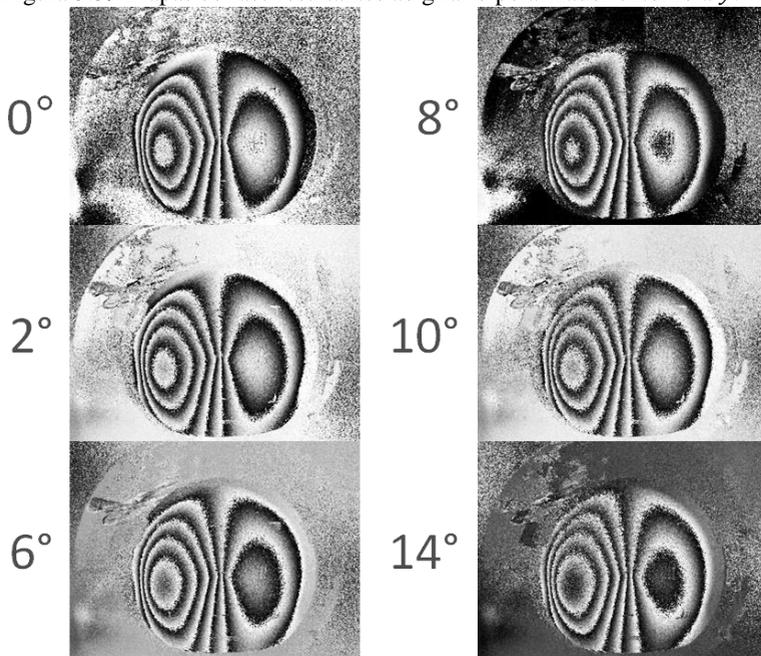


Fonte: Autor.

Não foi necessário validar o giro em torno a \vec{x} , já que apresenta a mesma condição que o giro em \vec{y} . O giro em torno a \vec{z} , como foi descrito anteriormente, corresponde ao deslocamento de fase.

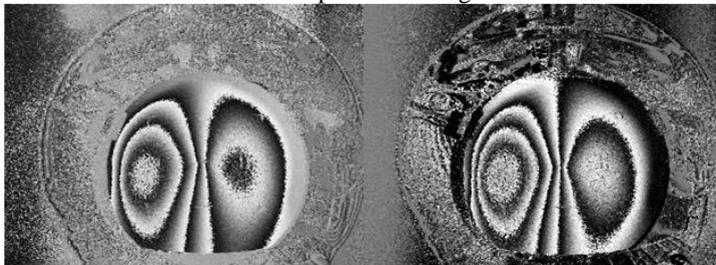
Com os resultados anteriores avaliou-se a robustez do polarizador como elemento para fazer o deslocamento de fase. Além disso, é possível afirmar que o interferômetro é robusto, já que os outros elementos que o compõem ficarão fixos e sem movimentos relativos entre eles.

Figura 5.39 Mapas de fase resultantes ao girar o polarizador entorno a \vec{y} .



Fonte: Autor.

Figura 5.40 Mapas de fase resultantes ao deslocar o polarizador em posições aleatórias para cada imagem.



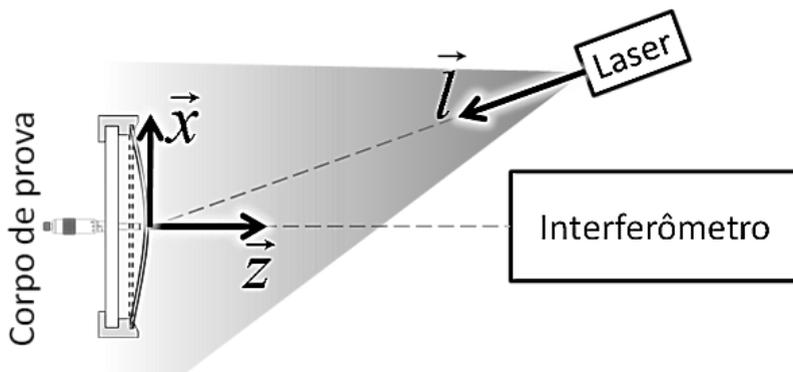
Fonte: Autor.

5.7. VALIDAÇÃO DOS COMPONENTES EXTERNOS AO INTERFERÔMETRO

Em uma medição com shearografia são dois os componentes principais externos ao interferômetro: a fonte de iluminação e a amostra ou corpo de prova. No caso de uma medição feita em um ambiente com vibração, os dois componentes externos serão afetados e comprometerão o resultado da medição.

Para fazer a avaliação dos efeitos provocados pela vibração, foi realizada uma configuração similar à Figura 5.35. Desta vez o deslocamento foi feito nos elementos externos. No laser o deslocamento foi feito ao longo de \vec{l} . No corpo de prova o deslocamento foi realizado ao longo de \vec{z} e \vec{x} , como é visível na Figura 5.41.

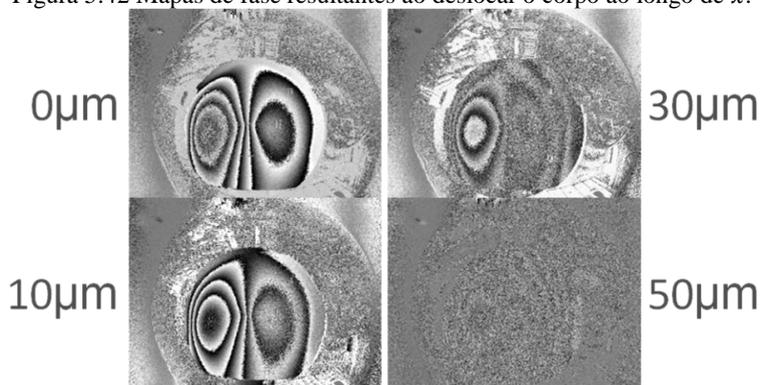
Figura 5.41 Esquema da configuração para avaliação dos componentes externos ao interferômetro.



Fonte: Autor

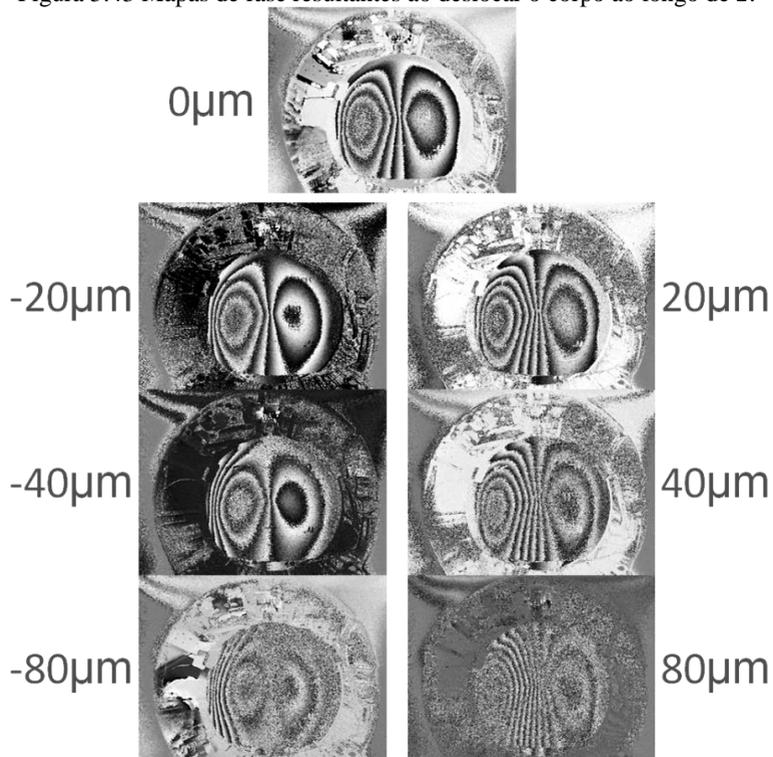
O teste consistiu em uma medição com a técnica de shearografia, tomando o mapa de fase de referência em uma posição. Depois foi provocada uma deformação por meio do parafuso micrométrico no corpo de prova e foram processados mapas de fase depois da deformação em diferentes deslocamentos, tanto do corpo de prova, como do laser. Os resultados são visíveis nas Figura 5.42, Figura 5.43 e Figura 5.44.

Figura 5.42 Mapas de fase resultantes ao deslocar o corpo ao longo de \vec{x} .



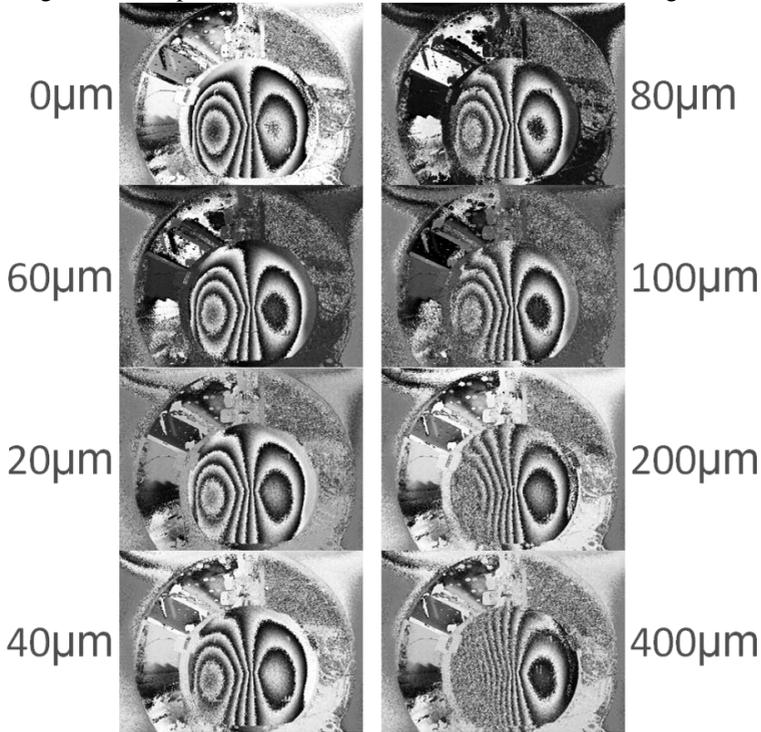
Fonte: Autor.

Figura 5.43 Mapas de fase resultantes ao deslocar o corpo ao longo de \vec{z} .



Fonte: Autor.

Figura 5.44 Mapas de fase resultantes ao deslocar o laser ao longo de \vec{l} .

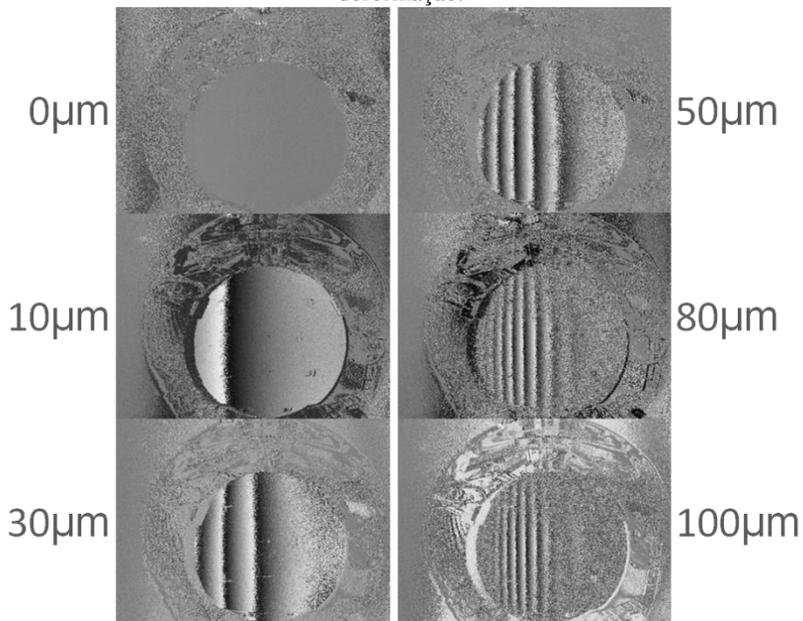


Fonte: Autor.

É possível notar, nas figuras, um aumento na quantidade das franjas ao provocar o deslocamento nos eixos descritos. Para comprovar a adição das franjas com o deslocamento do corpo, foi realizado o teste novamente, movimentando o corpo de prova ao longo de \vec{z} e \vec{x} , mas desta vez sem provocar uma deformação. Os resultados são visíveis nas Figura 5.45 e Figura 5.46. Também foi testado o resultado com diferentes tipos de deslocamento lateral movimentando o corpo em \vec{z} (Figura 5.47).

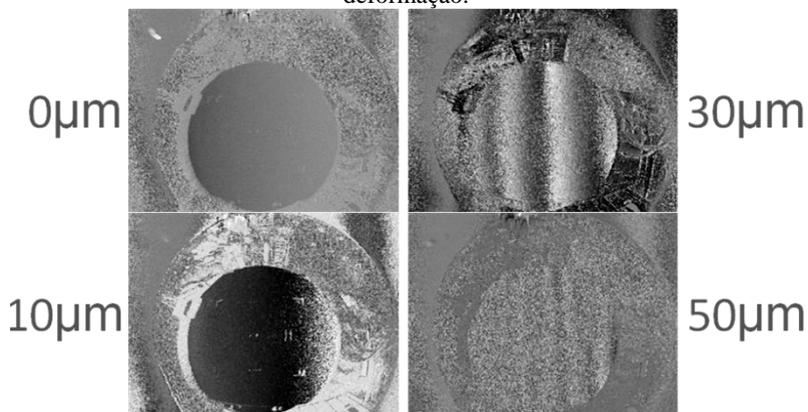
Comprova-se a adição de franjas ao deslocar o corpo de prova, de acordo às Figuras 5.45, 5.46, 5.47 e 5.48. Este efeito surge da diferença dos percursos ópticos, na passagem pelo prisma de Wollaston (Figura 5.19 e Figura 5.20). Esta diferença de percurso, ao deslocar o corpo em \vec{z} e \vec{x} , provoca uma diferença de fase maior onde a diferença de percurso é maior, por isso é visível o surgimento de franjas de forma crescente com o deslocamento lateral na imagem.

Figura 5.45 Resultado do deslocamento do corpo ao longo de \vec{z} sem deformação.



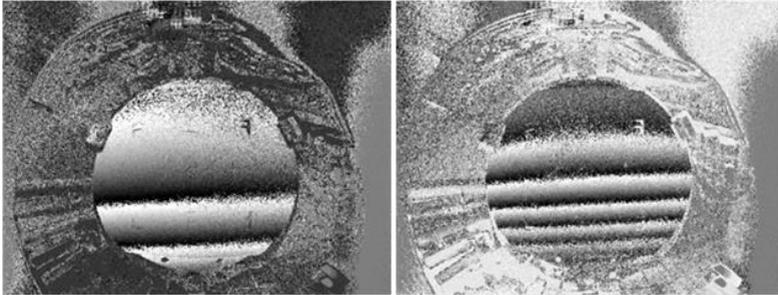
Fonte: Autor.

Figura 5.46 Resultado do deslocamento do corpo ao longo de \vec{x} sem deformação.



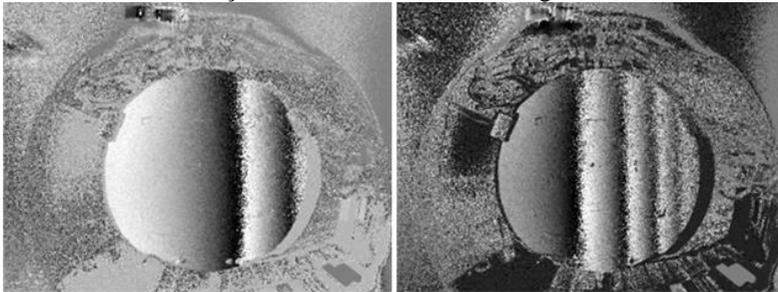
Fonte: Autor.

Figura 5.47 Resultado do deslocamento do corpo ao longo de \vec{z} sem deformação e deslocamento vertical.



Fonte: Autor.

Figura 5.48 Resultado do deslocamento do corpo ao longo de \vec{z} sem deformação e deslocamento horizontal girado 180° .

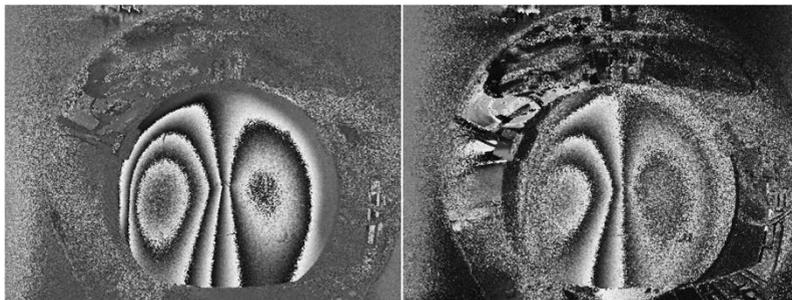


Fonte: Autor.

Torna-se evidente, depois dos muitos testes, que para garantir bons resultados na aplicação da técnica de shearografia em ambientes com vibração é de grande importância a fixação ao corpo de prova e o acoplamento do laser, além do interferômetro robusto.

Na sequência, foi feito um teste simulando uma vibração no corpo de prova, visível na Figura 5.49. O teste consistia em tomar as imagens, que compõem os mapas de fase, com deslocamentos aleatórios em \vec{z} , sempre na faixa de $\pm 20\mu\text{m}$. Como resultado vê-se que as franjas se conservam no centro da imagem, onde a deformação é maior. O contraste das franjas diminui nos extremos da imagem, onde a deformação é menor.

Figura 5.49 Mapa de fase resultante depois da deformação. À esquerda: resultado da deformação sem vibração. À direita: simulando uma vibração em \bar{z} .



Fonte: Autor.

5.8. TESTES COM VIBRAÇÃO

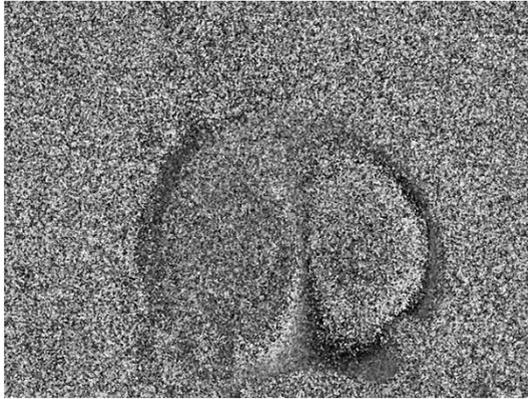
Depois dos testes, feitos para avaliar o comportamento e robustez dos elementos que compõem o interferômetro e os elementos externos, foi feito um teste com vibração real.

Para fazer os testes foi necessário acoplar todos os elementos (corpo de prova, laser e cabeçote de medição) a uma mesa vibrante. A vibração é provocada por um motor elétrico acoplado à mesa.

Uma dificuldade do sistema gerador de vibrações disponível é que não é possível ter uma variação controlada dos níveis e frequência de vibração. Isto levou a utilizar vibrações com características semelhantes às mais elevadas nas quais o sistema tradicional consegue ainda medir com baixa qualidade. Outra dificuldade foi a fixação dos demais componentes do interferômetro, uma vez que não se dispunha de uma estrutura mecânica apropriada. Assim, os elementos foram fixados precariamente com hastes e suportes normalmente usados em protótipo de teste em laboratório. Os resultados obtidos nesta avaliação são simplesmente indicativos e foram úteis para apontar as principais dificuldades do protótipo decorrentes da vibração.

O primeiro teste foi feito com uma fixação simples dos componentes. Estes ficaram fixos por meio de suportes usados normalmente em mesas de trabalho de óptica. O mapa de fase resultante depois de aplicar um carregamento e sob o efeito da vibração quase não é visível na Figura 5.50.

Figura 5.50 Mapa de fase resultante do primeiro teste com vibração.

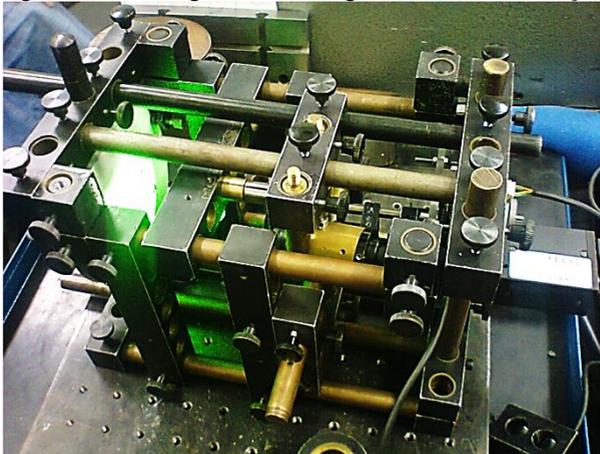


Fonte: Autor.

Vê-se na Figura 5.50 uma perda significativa do contraste das franjas. A razão principal desta perda de contraste, como foi discutida anteriormente, deve-se aos movimentos relativos dos elementos.

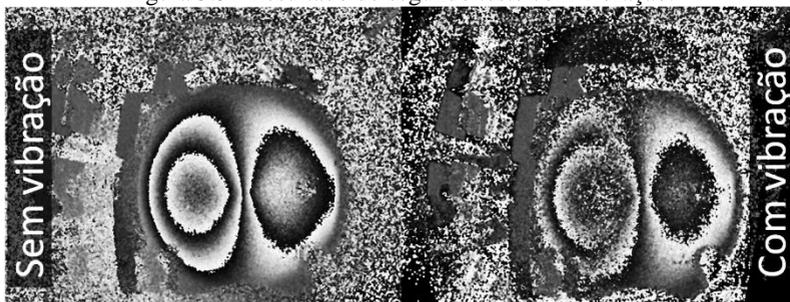
O segundo teste foi feito fixando os elementos com suportes mais robustos, como é visível na Figura 5.51. Depois repetiu-se a avaliação no mesmo nível de vibração que no teste anterior. O resultado é mostrado na Figura 5.52.

Figura 5.51 Montagem feito no segundo teste com vibração.



Fonte: Autor.

Figura 5.52 Resultado do segundo teste com vibração.



Fonte: Autor.

Nota-se uma melhoria nos resultados obtidos, reflexo do melhoramento da fixação. Mas ainda existe uma perda do contraste nas franjas.

Apesar dos testes serem simplesmente qualitativos, comprova-se, depois de garantir a robustez do interferômetro, que a fixação é um dos pontos mais críticos nos testes com vibração.

Havia a expectativa de poder avaliar os sistemas desenvolvidos em condições plenas de vibrações ainda no escopo desse trabalho. Porém, a grande demora no processo de importação do prisma de Wollaston gerou limitações de tempo que inviabilizaram a construção de um protótipo mecanicamente robusto em tempo hábil.

5.9. SÍNTESE E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para cada um dos movimentos aplicados nos componentes do cabeçote foi possível identificar os níveis máximos aceitáveis até onde a qualidade da imagem resultante não é comprometida. Constituem, portanto, as tolerâncias aceitáveis para operação em ambientes com vibração.

Na Tabela 5.1, são visíveis os limites de movimentação do polarizador, no qual não é comprometida a qualidade da imagem realizando os testes com shearografia.

Os valores correspondentes à translação nos eixos \vec{x} e \vec{y} são limitados pelas dimensões do polarizador. O valor correspondente ao deslocamento em \vec{z} é limitado pelo espaçamento entre a placa de atraso e a lente, localizada frente à câmera. Estas limitações são físicas, já que supondo um polarizador de dimensões infinitas e um espaçamento infinito entre a placa e a lente, não existiriam tais limitações.

Os valores correspondentes à rotação em \vec{x} e \vec{y} estão limitados principalmente pelo efeito da refração, que produz uma movimentação da imagem formada, que resulta em uma perda da correlação.

Tabela 5.1 Tolerância aos deslocamentos do polarizador no deslocamento de fase por polarização.

	Eixo de deslocamento	Tolerância ao movimento
Translação	\vec{x}	$\pm 2,5$ mm *
	\vec{y}	$\pm 2,5$ mm *
	\vec{z}	0 mm - 5 mm **
Rotação	\vec{x}	$\pm 10^\circ$ ***
	\vec{y}	$\pm 10^\circ$ ***
	\vec{z}	$0^\circ - 360^\circ$ Equivalente ao deslocamento de fase

* Limitada pelo diâmetro interno do polarizador e o tamanho das lentes utilizadas.

** Limitada fisicamente pelas dimensões da configuração óptica.

*** Limitado pela espessura do polarizador.

Fonte: Autor.

Na Tabela 5.2, são apresentados os resultados obtidos ao deslocar o corpo de prova e o laser em diferentes graus de liberdade. Estes ensaios foram feitos, principalmente, para demonstrar a importância da fixação dos elementos externos ao interferômetro. A tabela apresenta translações nos eixos \vec{x} , \vec{y} e \vec{z} no corpo de prova, e no eixo \vec{l} no laser.

Pode-se concluir, de acordo com os resultados obtidos, que o interferômetro é robusto às vibrações. Além disso, vê-se que a maior sensibilidade aos efeitos produzidos pela vibração deve-se à fixação dos componentes externos ao interferômetro.

Tabela 5.2 Tolerância aos deslocamentos do corpo de prova nos ensaios com shearografia.

	Eixo de deslocamento	Tolerância ao deslocamento
	\vec{x}	$\pm 20\mu\text{m}$
Corpo de prova	\vec{y}	$\pm 20\mu\text{m}$
	\vec{z}	$\pm 30\mu\text{m}$
Laser	\vec{l}	$\pm 50\mu\text{m}$

Fonte: Autor

CAPÍTULO VI

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral deste trabalho foi atingido. Conceberam-se, construíram-se e validaram-se três concepções de interferômetros com deslocamento lateral para medições com Shearografia que usam polarização e potencialmente capazes de operar em ambientes hostis.

Os objetivos específicos também foram alcançados. O primeiro, que trata sobre a determinação das principais fontes de perturbações nas medições com shearografia realizadas na indústria de petróleo e gás. Determinou-se que existem muitos fatores, mas a vibração era o mais importante e no qual os esforços do presente trabalho foram focados.

O segundo tópico dos objetivos específicos trata dos testes com novas alternativas construtivas de interferômetros, os quais foram realizados satisfatoriamente, já que como resultado obteve-se três alternativas ou configurações diferentes de interferômetros. As três configurações utilizam os princípios de polarização.

O terceiro tópico dos objetivos específicos consiste em avaliar o sistema construído em laboratório e em campo, e este foi parcialmente alcançado. A limitação principal é que as configurações não foram testadas em campo, pela exiguidade de tempo. Sendo assim, os testes foram realizados em uma bancada que simula níveis severos de vibração, como aqueles encontrados em campo.

O quarto objetivo específico, que correspondente à divulgação e registro de patentes, encontra-se em andamento. Existe a possibilidade de submissão de duas publicações: uma correspondente aos resultados obtidos devido à robustez das diferentes configurações e outra de um estudo detalhado da influência dos componentes no deslocamento de fase por polarização e o efeito do prisma de Wollaston. Como concepções novas foram geradas, patentes de invenção serão escritas e submetidas ao INPI.

6.1. CONCLUSÕES

Considerando que o trabalho propõe três diferentes configurações, as conclusões serão apresentadas separadamente. Posteriormente, uma conclusão global, da comparação das três configurações, será apresentada. Para finalizar, serão deixadas algumas recomendações para melhorias e trabalhos futuros.

6.1.1. CONFIGURAÇÃO MULTIPLACAS

Comprovou-se a validade do princípio de deslocamento de fase por polarização nesta configuração.

Devido à quantidade de elementos e à elevada sensibilidade ao desalinhamento dos componentes, esta configuração foi descartada como forma de combater os efeitos das vibrações, já que não foi suficientemente robusta.

6.1.2. CONFIGURAÇÃO DP4F

Comprovou-se também aqui a validade do princípio de deslocamento de fase por polarização nesta configuração.

Construiu-se um protótipo de interferômetro para shearografia com deslocamento de fase por polarização e com possibilidade de ajuste do deslocamento lateral.

6.1.3. CONFIGURAÇÃO W4F

Da mesma forma, comprovou-se a validade do princípio de deslocamento de fase por polarização nesta configuração.

Construiu-se um interferômetro compacto para shearografia utilizando os princípios de polarização em combinação com o prisma de Wollaston.

Obtiveram-se resultados muito bons para as movimentações do polarizador muito acima dos tipicamente esperados em campo.

A configuração W4f, ao utilizar o prisma de Wollaston, resultou na versão mais compacta de interferômetro dentre os propostos nesse trabalho, porém apresentou uma desvantagem em relação às demais: o deslocamento lateral, realizado através do prisma, não é igual em toda a imagem, fazendo com que a sensibilidade da medição seja variável ao longo da imagem. A variação da sensibilidade pode, em alguns casos, tornar a interpretação dos resultados mais difícil, porém não deve ser um problema em casos onde o resultado é apenas qualitativo, ou seja, quando se deseja identificar se existe ou não defeito. Os efeitos da variação de sensibilidade são passíveis de compensação através de algoritmos específicos.

6.1.4. CONCLUSÃO GERAL

Com base na qualidade percebida nos mapas de diferença de fase obtidos, a conclusão geral desse trabalho é que a melhor configuração, dentre as aqui propostas e avaliadas, para testes com shearografia em ambientes sem vibração, é a configuração DP4f. Porém, considerando os ensaios realizados em ambiente severo e de muita vibração, o cabeçote W4f foi o que apresentou melhores resultados, apesar de apresentar sensibilidade variável ao longo da imagem.

Nos ensaios realizados neste trabalho, notou-se que a fixação dos elementos (laser, cabeçote e superfície a medir) são críticos.

Outro ponto importante a ser lembrado é que o tempo de giro do polarizador e, conseqüentemente, de aquisição entre imagens pode ser crítico, principalmente no caso de um carregamento térmico.

Dentro do prazo de execução desse trabalho não foi possível construir protótipos mecanicamente robustos para avaliar seus desempenhos nos níveis de vibração típicos de trabalho na indústria do petróleo e gás. No entanto, foram realizados testes de vibração em bancada de laboratório.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os interferômetros desenvolvidos no presente projeto apresentaram funcionamento satisfatório, mas com limitações, como foi anteriormente mencionado. Sendo assim, foram elaboradas algumas recomendações para trabalhos futuros que supõem um possível melhoramento do sistema:

- Desenvolver um sistema com a capacidade de adquirir as múltiplas imagens deslocadas em fase em um só disparo, ou seja, tornar viável a técnica do tipo *One-shot*. Isto poderia ser feito utilizando uma *Pixelated-Phase-Mask*. (Millerd, 2005). Também uma multiplicação das imagens usando prismas ou grades de difração pode ser levada em conta.
- Melhorar a qualidade das imagens de fase combinando diferentes algoritmos de processamento. Nos testes realizados neste trabalho, foram utilizados algoritmos de quatro, cinco e oito passos para o cálculo de mapa de fase. Uma opção é a utilização simultânea dos algoritmos e por meio de software determinar qual é o processamento de mapa de fase mais

eficiente (em termos de qualidade e tempo), e aplicá-lo nas inspeções.

- Testar elementos alternativos ao prisma de Wollaston para realizar o deslocamento lateral sensível à polarização. Exemplo: placas de Savart, prismas com polarizadores etc.
- Construir um suporte no qual seja possível fixar múltiplos cabeçotes de medição e eliminar as movimentações relativas dos componentes. Isto para fazer testes com vibração e fazer novas comparações, incluindo o N4f para determinação dos desempenhos de cada instrumento.
- Realizar o projeto mecânico e construir os cabeçotes de medição específicos para as configurações presentes no documento. Adicionalmente, testar em campo.

REFERÊNCIAS

- Airy, G. B. (1835). On the diffraction of an object-glass with circular aperture. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 5, 287.
- Albertazzi, A. (2014). Apostilas da disciplina: Fundamentos de Interferometria. Florianópolis: UFSC.
- Albertazzi, A., Vieira Fantin, A., Willemann, D. P., & Benedet, M. (2014). Phase Maps Retrieval from Sequences of Phase Shifted Images with Unknown Phase Steps Using Generalized N-Dimensional Lissajous Figures—Principles and Applications. *International Journal of Optomechatronics*.
- Bleier, Z., Brouillete, C., & Carangelo, R. (1999). A Monolithic Interferometer for FT-IR Spectroscopy. (Spectroscopymag, Ed.) *SpecSheet*, 48.
- C. Ghiglia, D., & D. Pritt, M. (1998). *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software*. Wiley.
- Cheng, Y.-Y., & Wyant, J. C. (1985, September 15). Phase Shifter Calibration in Phase-shifting Interferometry. *Applied Optics*, 24(18).
- Cloud, G. (1998). *Optical Methods of Engineering Analysis*. Cambridge University Press 1998.
- Cooper, J. (2010, Janeiro 25). flickr. Retrieved Março 25, 2015, from Macro Laser Speckle: <https://www.flickr.com/photos/3dphoto/4340029320/>
- Creus, A. (2011). *Instrumentación Industrial* (Vol. 8). Barcelona, España: Marcombo.
- Dainty, J. C. (1976). *The Statistics of Speckle Patterns* (Vol. XIV). London: E. Wolf, Progress in Optics.
- Dataplex. (2007, Outubro 1). *Maintaining High Reliability for New Electronic Designs Intended for Harsh Environments*. Retrieved Agosto 6, 2015, from Dataplex: <http://www.dataplex.com/blog/index.php/2007/10/01/maintaining-high-reliability-for-new-electronic-designs-intended-for-harsh-environments/>
- Deck, L. (1996). Vibration-resistant phase-shifting interferometry. *App. Opt*, 35, 6655-6662.
- Deck, L. (2009). Suppressing phase errors from vibration in phase-shifting interferometry. *App. Opt.*, 48, 3948-3960.

- Ferreira, J. P., Lopez, F., Nicolau, V., Albertazzi, A., & Willemann, D. (2011). Comparison of infrared thermography and shearography for non-destructive evaluation of composites materials by pulse-heating excitation. *5th Pan American Conference for NDT*. Cancun, Mexico.
- Gladstone, J., & Dale, T. (1863). Researches on the Refraction, Dispersion, and Sensitiveness of Liquids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 153, 317-343.
- Goodman, J. W. (1975). Statistical properties of laser speckle patterns. In A. E. John Christopher Dainty, *Laser Speckle and Related Phenomena* (Vol. 9, pp. 9-75). Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Goodman, J. W. (1976, Novembro 11). Some fundamental properties of speckle. (*J. O. Am, Ed.*) 66(11), 1145-1150.
- Groot, P. d. (2009). Design of error-compensating algorithms for sinusoidal phase shifting interferometry. *App. Opt*, 48, 6788-6796.
- Hecht, E., & Zajac, A. (1974). *Optics*. ADDISON-WESLEY WORLD STUDENT SERIES EDITION.
- Hitz, C. B., J. H., & J. E. (2012). *Introduction to Laser Technology* (Vol. 4). IEEE Press Editorial Board.
- Hrebabetzky, F. (1996). Computer-controlled active phase stabilization for electronic holography. *SPIE, Laser Interferometry: Applications, VIII*.
- HyperPhysics*. (2005). Retrieved Março 16, 2015, from HyperPhysics: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/quarwv.html>
- Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid. (2008, fevereiro 10). *Photonic Crystal Group ICMN*. Retrieved Março 30, 2015, from <http://luxrerum.icmm.csic.es/?q=node/research/interference>
- Jones, R., & Wykes, C. (1983,1989). *Holographic and Speckle Interferometry* (Vol. 2). Cambridge University Press.
- Kjell, G. (2002). *Optical Metrology*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Kühn, J. (2007). Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition. In *Optics Express* (Vol. 15, pp. 7231-7242).
- Ledger, A. M. (1975). Monolithic interferometric angle sensor. *Applied Optics*, 14(12).
- Malacara, D. (Ed.). (2007). *Optical Shop Testing* (Third ed.). New Jersey, United States of America: Wiley.

- Marques, J. (2009, Agosto 11). CARACTERIZAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE DEFEITOS EM MATERIAIS COMPOSITOS UTILIZANDO SHEAROGRAFIA COM CARREGAMENTO VIBRACIONAL. Florianópolis, Brasil: Universidade federal de Santa Catarina UFSC.
- Mellish, B. (2006, Abril 21). *Wikimedia Commons*. Retrieved Abril 10, 2015, from Wire-grid-polarizer.svg: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/94/Wire-grid-polarizer.svg>
- Miller, J. (2005). Pixelated phase-mask dynamic interferometers. In W. Osten (Ed.), *Fringes 2005* (pp. 640-647). Springer.
- Newport Corporation. (n.d.). *Newport Products*. Retrieved Abril 23, 2015, from Newport Products Beamsplitter: http://search.newport.com/?q=*&x2=sku&q2=05FC16PB.3
- Noll, V. (2006). *Desenvolvimento de um sistema de controle digital para estabilização ativa de imagens em holografia eletrônica*. Florianópolis, Brasil: Universidad Federal de Santa Catarina.
- Paes, Á. d. (2013, Outubro 18). Proposta de procedimento para estimativa do tamanho de defeitos em tubos de aço perfurados e revestidos com materiais compósitos utilizando Shearografia. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Pancharatnam, S. (1956). Generalized Theory of Interference and its Applications. (I. A. Sci., Ed.) *A44*, 247.
- Pereira, K. (2012). *Procedimento para avaliação da profundidade de defeitos em placas de materiais compósitos usando Shearografia com excitação térmica*. Florianópolis: Programa de Pós-graduação em Engenharia mecânica.
- Schöntag, J. (2009). *Caracterização da profundidade de defeitos em materiais compósitos utilizando shearografia com carregamento vibracional*. Florianópolis: Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Sesselmann, M. (2000). *Interferômetros Robustos Aplicados à Medição de Deslocamentos Radiais em Cilindros Internos Usando Holografia Eletrônica*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Souza, J. (2012). *Inspeção de defeitos em revestimentos de materiais compósitos aplicados em tanques metálicos utilizando shearografia*. Florianópolis: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

- Suja Helen, S., Kothiyal, M., & Sirohi, R. (1998, September 15). Achromatic phase shifting by rotating polarizer. *Optics Communications*, 154, 249-254.
- Sykora, D. M., & de Groot, P. (2010). Instantaneous Interferometry: Another View. (O. S. America, Ed.) *International Optical Design Conference and Optical Fabrication and Testing, paper OMAI*.
- Thorlabs, Inc. (n.d.). *Thorlabs.com*. Retrieved Abril 23, 2015, from Thorlabs products: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=917
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). *Physics for Scientists and Engineers* (6th ed., Vol. 1). New York: Worth Publishers.
- Troncoso, L. H. (1998). *Sistema Activo de Estabilização para Medição com Holografia Eletrônica*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Van Hemelrijck, D., Anastasopoulos, A., & E. Melanitis, N. (Eds.). (2004). *Emerging Technologies in NDT* (Vol. 9). Netherlands: Swets & Zeitlinger BV.
- Viotti, M. R., & Albertazzi, A. J. (2014). *ROBUST SPECKLE METROLOGY Techniques for Stress Analysis and NDT*. SPIE.
- Viotti, M., Kapp, W., & Albertazzi Jr, A. (2009). Achromatic digital speckle pattern interferometer with constant radial in-plane sensitivity by using a diffractive optical element. *Applied Optics*, 48, 2275.
- Watanabe, Y., Hayasaka, Y., Sato, M., & Tanno, N. (2005, 05 10). Full-field optical coherence tomography by achromatic phase shifting with a rotating polarizer. *APPLIED OPTICS*, 44(8).
- Willemann, D. P. (2002, Março 15). Desenvolvimento de uma Roseta Óptica para Medição de Tensões e Deformações Utilizando Holografia Eletrônica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Willemann, D., Fantin, A., & Albertazzi, A. (2010). Defect Assessment of Bonded Joints of Composite Tubes using Shearography. In A. Albertazzi, & G. H. Kaufmann (Eds.), *Speckle 2010: Optical Metrology* (Vol. 7387). SPIE.

APÊNDICE A

A seguir são apresentadas a Tabela 0.1 e Tabela 0.2 com os principais elementos ópticos e os parâmetros de configuração utilizados nos ensaios realizados com shearografia.

Tabela 0.1 Principais elementos ópticos utilizados

Elemento	Descrição
Polarizador P	Polarizer Newport 5511
Placa de atraso $\lambda/2$ HWP	Waveplate Newport 10RP52-1
Placa de atraso $\lambda/4$ QWP	Waveplate Newport 10RP54-1
<i>Beamsplitter</i> BS	Beamsplitter Newport 05BC17MB.1
<i>Polarizing Beamsplitter</i> PBS	Beamsplitter Newport 05BC16PC.4
Câmeras	Point Grey Grasshopper GRAS-20S4-C Point Grey Flea3 FL3-U3-20E4M-C
Lente	Grande-angular 3,5 mm
Microlentes	35 mm

Fonte: Autor.

Tabela 0.2 Parâmetros de configuração.

Parâmetros de configuração	Valor
F#	8 - 2
Câmera:	
Shutter (Absolute)	0,03 - 0,05
Gain (Absolute)	1 - 10
Gama (Absolute)	1

Fonte: Autor.