



THIAGO PAIVA ALMEIDA

**ANÁLISE QUALITATIVA DE DEFORMAÇÕES EM SÓLIDOS,
POR MEIO DE MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DO
MAPA DE FASES DA SHEAROGRAFIA DIGITAL**

LAVRAS – MG

2021

THIAGO PAIVA ALMEIDA

**ANÁLISE QUALITATIVA DE DEFORMAÇÕES EM SÓLIDOS, POR MEIO DE
MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DO MAPA DE FASES DA
SHEAROGRAFIA DIGITAL**

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola.

Prof. Dr. Roberto Alves Braga Júnior

Orientador

LAVRAS – MG

2021

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Almeida, Thiago Paiva

Análise qualitativa de deformações em sólidos, por meio de monitoramento em tempo real do mapa de fases da Shearografia digital / . Thiago Paiva Almeida – Lavras : UFLA, 2021.
74 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Alves Braga Júnior.
Tese(doutorado)–Universidade Federal de Lavras, 2021.
Bibliografia.

1. Shearografia. 2. Mapa de fases. 3. Monitoramento em tempo real.I. Braga Junior, Roberto Alves. II. Título.

THIAGO PAIVA ALMEIDA

**ANÁLISE QUALITATIVA DE DEFORMAÇÕES EM SÓLIDOS, POR MEIO DE
MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DO MAPA DE FASES DA
SHEAROGRAFIA DIGITAL
QUALITATIVE ANALYSIS OF DEFORMATIONS IN SOLIDS BY REAL-TIME
MONITORING OF THE PHASE MAP OF DIGITAL SHEAROGRAPHY**

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola.

APROVADA em 12 de Março de 2021.

Prof. Dr. Roberto Alves Braga Júnior	UFLA
Prof. Dr. Luíz Eduardo Teixeira Ferreira	UFLA
Prof. Dr. Ricardo R. Magalhães	UFLA
Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo	UFLA
Dr. Luiz de Gonzaga Ferreira Júnior	Externo

Prof. Dr. Roberto Alves Braga Júnior
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

Dedico os méritos deste trabalho à minha esposa Erika e meus filhos Gabriel e João Paulo. À minha mãe Cláudia, pelo apoio, amor incondicional e por sempre estar ao meu lado na luta pelos meus sonhos. Ao meu pai, Luiz Carlos, por seu amor, confiança, amizade e pelo apoio nas minhas decisões. E a todos que direta ou indiretamente torceram e confiaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus, por me encher de energias nos momentos de desânimo, por ser meu porto seguro nos meus momentos de inseguranças e minha sogra Anita e meu cunhado Wagner que lá do céu intercederam por mim. Agradeço a minha esposa Erika e meus filhos Gabriel e João Paulo, pela paciência de me aguentar nas horas de dificuldades e de falta de tempo. À minha família, alicerce da minha vida, fonte de segurança e amor, com a qual divido meus sonhos e ambições. Aos meus pais, Luiz Carlos e Cláudia, que sempre lutaram pelo bem e prosperidade de nossa família, pela dedicação, amor, compreensão e incentivo nos momentos difíceis. A minha irmã pela disposição em me ajudar e sempre acreditarem em mim. Aos meus amigos que sempre torceram e acreditaram que este sonho seria possível. Aos colegas de profissão pelos conselhos e incentivos à mim passados. À Universidade Federal de Lavras (UFLA), pelos recursos oferecidos por meio do Centro de Instrumentação Aplicada a Agropecuária (CEDIA), em forma de estrutura física, computacional e docente. Ao Departamento de Engenharia (DEG), pela oportunidade e a estrutura disponibilizada na realização deste trabalho e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, que me deu a oportunidade de realizar o Doutorado. Agradeço também à Universidade Federal de Lavras, ao CNPq, Fapemig, Capes e Finep que financiaram parte deste projeto. Agradeço, em especial, ao meu orientador, professor Dr. Roberto Alves Braga Júnior, pela contribuição, pela paciência, e por me oferecer a oportunidade de trabalhar ao seu lado. Também agradeço pelos seus ensinamentos, dedicação, disponibilidade e responsabilidade com que orienta. Àqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização desta etapa árdua e importante na minha vida, o meu sincero agradecimento pela participação de cada um nesta conquista. Obrigado!

O Homem é do tamanho dos seus sonhos. (Fernando Pessoa)

RESUMO

Com o avanço da tecnologia cada vez há a necessidade de se inspecionar e monitorar estruturas e elementos compósitos, com o intuito de se antecipar a possíveis danos estruturais. O desenvolver desse projeto foi baseado no princípio da Luz coerente juntamente com a técnica de sheargrafia, com a finalidade de se observar deformação em sólidos. Foram realizados testes em materiais como Aço, madeira, Nylon e acrílico como forma de validar a técnica para diferentes compósitos. Utilizando um ambiente controlado, um sistema interferométrico, uma câmera CCD e um sistema processado, com uma IHM (Interface Homem máquina), foi possível gerar os mapas de deformação em tempo real, e mostrar ao final gráficos que permitem identificar visualmente a deformação que está acontecendo nos corpos de prova. Dessa forma, este projeto contribui por meio de imagens em três dimensões, como uma ferramenta complementar para que os profissionais da área da engenharia possam utilizar para iniciar, a partir de inspeção visual qualitativa, processos de reparos em possíveis danos estruturais.

Palavras-chave: Shearografia. Mapa de fases. Monitoramento em tempo real.

ABSTRACT

With the advancement of technology, there is a need to inspect and monitor structures and composite elements in order to anticipate possible structural damage. The development of this project was based on the principle of coherent Light together with the shearography technique, with the purpose of observing deformation in solids. Tests were carried out on materials such as steel, wood, nylon and acrylic as a way to validate the technique for different composites. Using a controlled environment, an interferometric system, a CCD camera and a processed system, with an HMI (Human Machine Interface), it was possible to generate the deformation maps in real time, and show at the end graphs that allow to visually identify the deformation that is happening in the specimens. In this way, this project contributes through images in three dimensions, as a complementary tool for professionals in the engineering area to use to start, from qualitative visual inspection, repair processes in possible structural damages.

Keywords: Shearography. Phase map. Real-time monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Padrão de “Speckle” Beppler et al. (2006)	21
Figura 4.2 – Comportamento do padrão de interferência	22
Figura 4.3 – Arranjo experimental do ESPI.	23
Figura 4.4 – Franjas de interferência	24
Figura 4.5 – Configuração para shearografia inspirada no Interferômetro de <i>Michelson</i>	25
Figura 4.6 – Configuração para shearografia inspirada no Interferômetro de <i>Michelson</i>	30
Figura 4.7 – Erro de fase plotados contra a diferença de fase por um erro no passo de fase de 5° (passo de fase de 95° em vez de 90°).	34
Figura 4.8 – O movimento do PZT como uma função da tensão aplicada a ele que mostra os erros típicos: (a) não linear simples; (b) a histerese; e (c) desvio linear.	35
Figura 4.9 – Erro de fase plotados contra a diferença de fase para uma PZT com desvios da linearidade de $\pm 1^\circ$ a deslocamentos de fase nominais de $\pm 90^\circ$	36
Figura 4.10 – Shearografia digital com interferômetro de Michelson modificado.	39
Figura 4.11 – Procedimento de obtenção do padrão de interferência: a) Padrão de referência, b) Padrão de deformação, e c) Padrão de interferência.	40
Figura 4.12 – Mapas obtidos a partir do padrão de interferência: a) Padrão de interferência, b) Mapa de fases empacotadas, e c) Mapa de fases desempacotadas.	41
Figura 5.1 – Setup <i>Digital Speckle Shearing Pattern Interferometry</i>	45
Figura 5.2 – Setup <i>Configuração usada no laboratório</i>	46
Figura 5.3 – Setup Fluxograma de funcionamento da IHM	47
Figura 5.4 – Setup para o teste 1	49
Figura 5.5 – Setup iluminado para o teste 1	49
Figura 5.6 – Setup para o teste 2	50
Figura 5.7 – Setup para o teste 2	50
Figura 5.8 – Interface da IHM utilizada para análise em tempo real	51
Figura 5.9 – Interface da IHM utilizada para análise em tempo real	52
Figura 5.10 – Interface da IHM utilizada para análise em tempo real	52
Figura 5.11 – Interface da IHM utilizada para análise em tempo real	53
Figura 5.12 – Interface da IHM utilizada para análise em tempo real	53
Figura 5.13 – Interface da IHM utilizada para análise em tempo real	54
Figura 5.14 – Interface da IHM utilizada para análise em tempo real	54

Figura 5.15 – Interface da IHM utilizada para análise em tempo real	55
Figura 5.16 – Gráfico 3D da deformação do corpo de prova	56
Figura 5.17 – Gráfico 3D da deformação do corpo de prova	56
Figura 6.1 – Comparação Digital x FEM 45g	58
Figura 6.2 – Comparação do Phase shift digital x FEM, utilizando uma função Linear	59
Figura 6.3 – Comparação do Phase shift digital x FEM, utilizando uma função exponencial	59
Figura 6.4 – Comparação dos valores obtidos por Almeida et al. (2016) e os valores obtidos pela IHM utilizada neste trabalho	60
Figura 6.5 – Teste 1 - Chapa em aço	60
Figura 6.6 – Teste 1 - Chapa em aço	61
Figura 6.7 – Teste 1 - Chapa em aço	61
Figura 6.8 – Gráfico em tons de cinza mostrando a curva de deformação da chapa em acrílico	62
Figura 6.9 – Extração dos valores em tons de cinza e geração do gráfico em 2D	62
Figura 6.10 – Teste 2 - Chapa em acrílico	63
Figura 6.11 – Teste 2 - Chapa em acrílico	64
Figura 6.12 – Teste 2 - Chapa em acrílico	64
Figura 6.13 – Teste 3 - Chapa em madeira	65
Figura 6.14 – Teste 3 - Chapa em madeira	65
Figura 6.15 – Teste 3 - Vareta de derriçadeira	66
Figura 6.16 – Teste 3 - Vareta de derriçadeira	66
Figura 6.17 – Teste 3 - Vareta de derriçadeira	67
Figura 6.18 – Teste 4 - Borracha da haste do puxavante	67
Figura 6.19 – Teste 4 - Borracha da haste do puxavante	68
Figura 6.20 – Teste 4 - Borracha da haste do puxavante	69

LISTA DE TABELAS

LISTA DE QUADROS

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivos Específicos	15
3	HIPÓTESE	16
4	REFERENCIAL TEÓRICO	17
4.1	Danos e Defeitos em Materiais Compósitos	17
4.2	Técnicas ópticas aplicadas à análise estrutural	18
4.3	Fundamentos e técnicas de interferometria óptica	19
4.3.1	Speckle	21
4.3.2	Holografia digital	21
4.3.3	ESPI	22
4.3.4	Shearografia digital	22
4.3.4.1	Princípios da Shearografia	24
4.3.4.2	Formação de franjas no DSPI	25
4.3.4.3	Princípio básico da técnica de mudança de fase	27
4.3.4.4	Mudança de fase a partir do interferômetro de Michelson	30
4.3.5	Algoritmos de mudança de fase	30
4.3.6	Cálculo das diferenças de fase	32
4.4	Vantagens e desvantagens da Shearografia	37
4.5	Arranjo experimental da shearografia	38
4.5.1	Interferômetro de Michelson modificado	38
4.6	Padrão de interferência	38
4.7	Mapa de fases	39
4.7.1	Deslocamento de fase temporal	40
4.7.2	Deslocamento de fase espacial	42
4.8	Monitoramento estático e dinâmico	43
4.9	Análise qualitativa aplicada à Shearografia em tempo real	44
5	MATERIAIS E MÉTODOS	45
5.1	Configuração experimental	45
5.1.1	Montagem e calibração	45
5.2	Configurações da IHM	46

5.2.1	Teste 1 - Chapa acrílica	48
5.2.2	Teste 2 - Chapa de aço para teste de deformação	49
5.3	Monitoramento em tempo real	50
6	RESULTADOS	58
6.1	Validação da técnica por meio de comparações estáticas	58
6.2	Teste comparativo ao trabalho realizado por Almeida et al. (2016) utilizando chapa em aço com flexão no sentido fora do plano	60
6.3	Análise comparativa com a curva de deformação por meio de saída em tons de cinza obtidas pela IHM	61
6.4	Teste de deformação em chapa de acrílico no sentido fora do plano	63
6.5	Teste de deformação em chapa de madeira no sentido fora do plano	63
6.6	Teste de aplicabilidade dentro do campo de atuação da Engenharia Agrícola, utilizando varetas de colhedoras mecânicas.	64
6.7	Teste de aplicabilidade utilizando borracha da haste puxavante	66
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

No ramo das engenharias, existe um vasto interesse no monitoramento estrutural, tentando-se detectar precocemente o dano ocasionado por deformações, ou até mesmo desgaste ao longo do tempo. O risco de perda de vidas humanas, resultante de falhas estruturais, como queda de aviões, pontes ou edifícios têm motivado cada vez mais estudos e investigações da comunidade acadêmica. A investigação precoce do dano tem por finalidade a prevenção da falha estrutural e a programação da substituição do elemento danificado.

A grande necessidade de desenvolver métodos globais de detecção de dano tem sido essencialmente motivada por aplicações ao ramo aeronáutico e aeroespacial. Atualmente as principais técnicas de inspeção podem ser classificadas em métodos globais e métodos localizados. As várias técnicas globais disponíveis utilizam a acústica ou métodos por ultra-som, variações do campo magnético, inspeção por radiações, corrente elétrica, medição da emissão térmica e técnicas de inspeção visual, com e sem auxílio. Todas estas técnicas partem do princípio que o comportamento do material na vizinhança do dano é conhecido. Além disso, a grande maioria destas técnicas destina-se exclusivamente à investigação do dano em estruturas metálicas. Por outro lado, a detecção de delimitações a partir da alteração das características mecânicas e resposta, estática ou dinâmica, da estrutura tem sido amplamente referenciado na literatura como técnicas preferenciais.

As técnicas interferométricas revelam elevado potencial na detecção do dano em estruturas laminadas compósitas. Estas técnicas de medição global e sem contato são baseadas na interferência de luz LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) para a medição estática e dinâmica do campo de deslocamentos e de rotações em superfícies difusas. Estas técnicas permitem medições com uma resolução que pode chegar a uma ordem de grandeza abaixo do comprimento de onda da luz. O Shear (Shearography) é uma técnica interferométrica atualmente usada para inspeção não-destrutiva.

A associação das técnicas interferométricas às metodologias globais de detecção vem potencializar novas linhas de desenvolvimento de procedimentos dedicados à investigação do dano, que necessitam ser exploradas.

O desenvolvimento e aprimoramento de novas técnicas experimentais e numéricas que permitam estudar o comportamento de deformações em materiais são de suma importância para determinar suas limitações, avaliar e classificar as propriedades dos mesmos, como, por exemplo, capacidade de carga, elasticidade, rigidez, dentre outras. Assim, há um interesse

grande no estudo de técnicas que permitam uma medição do campo de deformações, de forma não destrutiva e sem contato com o material, dentre essas técnicas se destaca a Shearografia.

Há vários métodos de medição de deformações em um componente, podendo ser técnicas destrutivas ou semidestrutivas, entre elas citam-se, a remoção de camadas, o seccionamento e a técnica do furo cego. Também há técnicas não destrutivas como a difração de raios-X, a difração de nêutrons, o ultrassom, as técnicas magnéticas, a termografia, a técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas e a Shearografia.

Diante disso, fica evidente a necessidade de se utilizar o processo de monitoramento em tempo real, pois aumenta a chance de se realizar reparos, antes que estes possam ser irreversíveis.

Dessa forma, objetivou-se com este estudo desenvolver meios que possibilitassem, por meio da shearografia, gerar mapas de fases que pudessem mostrar através de imagem a deformação que acontece nos compósitos analisados, permitindo assim uma análise visual qualitativa, em tempo real.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo realizar análise qualitativa da shearografia digital pelo método de processamento de padrão único em tempo real no teste de sólidos em ambiente controlado. Para isto, são definidos os seguintes objetivos específicos:

2.1 Objetivos Específicos

1. Fazer o aprimoramento das etapas de pré processamento e processamento realizadas por meio de um software desenvolvido no CEDIA para realização de processamento digital;
2. Validar a técnica utilizada pela IHM (Interface Homem Máquina) comparando-a com resultados obtidos em outros trabalhos;
3. Verificar qualitativamente a deformação em sólidos realizadas em chapa de aço, acrílico e madeira;
4. Analisar qualitativamente aplicações dentro do campo de atuação da Engenharia Agrícola.

3 HIPÓTESE

O método interferométrico proposto pode ser aplicado de forma satisfatória para análise qualitativa em tempo real de corpo de provas de aço, acrílico e madeira, em ambiente controlado.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Na engenharia existe um amplo interesse na monitorização estrutural, procurando a detecção precoce do dano. O risco de perda de vidas humanas, resultante de falhas estruturais imprevisíveis, como nos casos da queda de aviões, pontes ou edifícios, têm motivado a investigação da comunidade científica dos vários ramos da Engenharia. Neste caso, a monitorização ocorre de modo periódico ou contínuo em função da acessibilidade, viabilidade técnica e grau de tolerância ao dano. A identificação precoce do dano tem por finalidade a prevenção da falha estrutural e a programação da substituição do elemento danificado.

Atualmente, as principais técnicas de inspeção podem ser classificadas em métodos globais e métodos localizados. As diversas técnicas globais disponíveis utilizam a acústica ou métodos por ultra-som, variações do campo magnético, inspeção por radiações, corrente elétrica, medição da emissividade térmica e técnicas de inspeção visual, com e sem auxílio.

4.1 Danos e Defeitos em Materiais Compósitos

De acordo com Quinteros (2015) para compreender melhor os resultados do ensaio shearográfico, é necessária uma diferenciação entre os conceitos de defeito (defect, flaw) e dano (damage). Conforme Miranda (2011), defeitos são gerados durante os estágios de manufatura e de reparo dos laminados compósitos (inclusive como decorrência de erros no estágio de projeto ou concepção da peça, componente ou estrutura). Já os danos podem ser criados, além das duas etapas acima, durante os estágios de montagem, em situações de voo e durante, principalmente, as etapas de manutenção e inspeção não destrutiva da aeronave. De qualquer maneira, tanto danos quanto defeitos comprometem severamente o desempenho mecânico do componente estrutural em serviço.

Os defeitos mais comuns nos laminados compósitos, de acordo com Miranda (2011), podem ser listados:

- Número, posicionamento e orientação impróprios de fibras fortalecedoras;
- Fibras onduladas;
- Presença de vincos;
- Gradientes indesejáveis de espessura;
- Sequência incorreta de empilhamento das camadas ou lâminas individuais;

- Resina incompatível ao compósito;
- Concentradores indesejáveis de tensão;
- Cura imprópria da resina;
- Áreas ricas em resina (ou carentes de fibras);
- Bolhas, vazios, inclusões (papeis e filmes poliméricos);
- Trincas, fibras rompidas;
- Delaminações;
- Usinagem, lixamento e furação impróprios;
- Contaminação da superfície de linhas de colagem (levando a descolamentos ou falta de adesão);
- Posicionamento incorreto de furos e demais detalhes construtivos.

Enquanto isso, os principais tipos de danos incluem:

- Trincas e delaminações;
- Fibras quebradas;
- Descolamento de fibras da matriz, causadas por cargas dinâmicas (impactos), cíclicas (fadiga), manuseio impróprio (ex. quedas), além de queima por descargas elétricas naturais (raios) ou por incêndio;
- Erosão, degradação da matriz, das fibras e da interface matriz/fibra por exposição a raios ultravioletas, líquidos (combustível, fluido hidráulico, solventes), a ambientes salinos, oxidativos, úmidos (especialmente sob altas temperaturas), bem como por ação de ciclos térmicos e termomecânicos.

4.2 Técnicas ópticas aplicadas à análise estrutural

Conforme Ribeiro et al. (2005), a medição de deslocamentos no plano é um problema comum em Mecânica Experimental, motivo ao qual têm sido desenvolvidas várias técnicas para

medir estes deslocamentos. As técnicas disponíveis podem ser classificadas em dois grandes grupos: técnicas de campo e técnicas discretas. As primeiras medem de forma global e contínua os deslocamentos de uma região do plano, enquanto que as outras fazem essas medições em pontos discretos. Das inúmeras técnicas experimentais utilizadas na medição de deslocamentos no plano, as mais versáteis são as técnicas ópticas por permitirem uma medição de carácter global e sem contato, destacando-se dentre elas, as seguintes:

- Técnicas de Moiré - É uma técnica que utiliza duas imagens do objeto sob diferentes perspectivas e identifica pontos comuns nas duas imagens. Essa técnica também computacionalmente intensiva não permite o seu uso para medições em alta velocidade ou em tempo real. Dentre as técnicas de Moiré (TM) existentes, a de Sombra e Projeção são as mais utilizadas devido, principalmente, à sua simplicidade e rapidez de medição, e por isso, têm sido utilizadas frequentemente em estudos e alvo de vários tipos de aplicações (FERNANDES et al., 2003).
- Correlação de imagens - consiste em uma técnica óptico-numérica que oferece a possibilidade de determinar campos cinemáticos em superfícies planas de materiais, sob qualquer solicitação, com base em uma comparação entre imagens, tomadas em diferentes instantes ao longo do carregamento (REBOUÇAS et al., 2019).
- Interferometria holográfica - é uma técnica óptica com a qual se pode gravar e reconstruir toda a informação numa frente de onda (amplitude e fase) sendo a gravação destas grandezas feita com recurso a fenômenos interferométricos. Esta técnica tem como principais vantagens a possibilidade de medição no plano e fora dele, bem como a sua elevada resolução ($\lambda/2$) da radiação laser de iluminação. Contudo, é muito sensível a perturbações exteriores, o que implica que o objeto a medir deva estar rigidamente fixado à montagem óptica utilizada (LOPES et al., 2012).

4.3 Fundamentos e técnicas de interferometria óptica

As técnicas interferométricas utilizam a sobreposição de duas ou mais frentes de onda para criar a interferência. Quando uma, ou ambas, contêm informação sobre uma superfície difusa é possível caracterizar as alterações da superfície, correlacionando entre si frentes de onda registradas em instantes distintos. Um registo holográfico, ou holograma, é obtido quando a frente de onda proveniente do objeto é sobreposta numa frente de onda coerente, utilizada

como referência. Desta forma é possível converter as diferenças de fase em variações de amplitude e, assim, gravar toda a informação contida na frente de onda.

A correlação entre hologramas permite medir grandezas que alterem a geometria ou a textura das superfícies. São várias as técnicas experimentais que utilizam o princípio da interferência na medição das grandezas físicas, dentre as mais importantes podem citar-se, o Moiré e a interferometria holográfica. Nas técnicas de Moiré é previamente gravada uma grade sobre a superfície, esta é depois usada como referência na caracterização do deslocamento no plano. Neste caso, a região da medição está limitada pela área de gravação da grade, sendo a sua resolução definida pelo espaçamento entre as linhas, designado por passo da grade. Devido ao difícil processo de gravação das grades com frequências adequadas (1200 linhas/mm, por exemplo), a medição é, normalmente, circunscrita a pequenas áreas. De forma contrária, a interferometria holográfica utiliza a interferência mútua das frentes de onda como forma de medir os deslocamentos em superfícies rugosas e difusas. Diferentemente das técnicas de Moiré, pode ser usada em grandes regiões e é sensível aos deslocamentos tanto no plano como fora deste, sendo a sensibilidade definida pela configuração geométrica do interferômetro.

Os registros holográficos gravam a intensidade e a fase de luz proveniente de objetos, através da sua interferência com uma frente de onda coerente, utilizada como referência. Por interferometria holográfica, designa-se uma técnica de medição que recorre à interferência entre frentes de onda, onde, pelo menos, uma delas é obtida de um holograma. É uma técnica óptica de medição de elevada resolução que utiliza a interferência entre registros holográficos para caracterizar grandezas que alteram as frentes de onda. No âmbito da Mecânica Experimental, estas técnicas são usadas na medição global e sem contato de deslocamentos em superfícies sob solicitação.

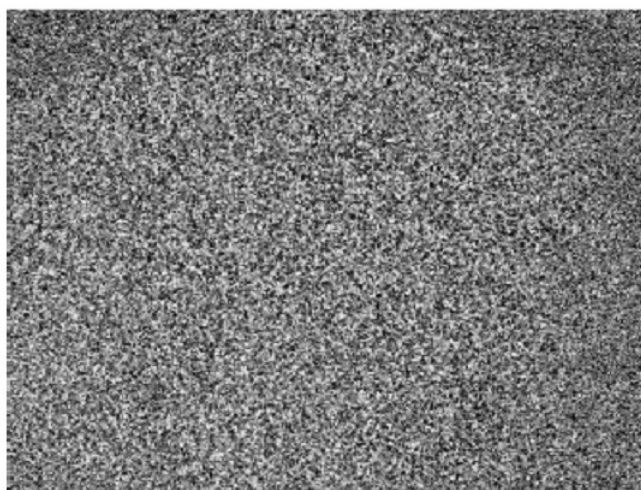
Nas três últimas décadas, com a chegada dos computadores e, com eles, do aumento do poder de cálculo numérico, que juntamente com o aparecimento de matrizes de sensores CCD (Charge-coupled device) e CMOS (Complementary metal-oxide–semiconductor) integrados em câmeras, com elevadas resoluções e reduzidas dimensões, possibilitou um enorme desenvolvimento destas técnicas. Com a utilização do registo electrónico de imagem e a necessidade de resolver o Speckle, dada a menor resolução deste, estas técnicas são por vezes designadas como de interferometria Speckle. O registro da intensidade das frentes de onda em câmeras de vídeo, em substituição das antigas placas holográficas, e o aparecimento de técnicas numéricas para o cálculo preciso da fase, transformaram a interferometria de Speckle numa ferramenta de grande

utilidade no estudo do comportamento de estruturas. A versatilidade destas técnicas permite, através de diferentes configurações do sistema óptico, registrar o comportamento destas tanto em solicitações estáticas como dinâmicas.

4.3.1 Speckle

O termo "Speckle", que significa "granulado" em inglês, é o atribuído ao resultado da interferência construtiva e destrutiva da luz coerente de um laser dispersado aleatoriamente por uma superfície rugosa, formando um padrão estocástico de pontos claros e escuros, como mostrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Padrão de “Speckle” Beppler et al. (2006)



Fonte: Adaptado de Schöntag et al. (2012)

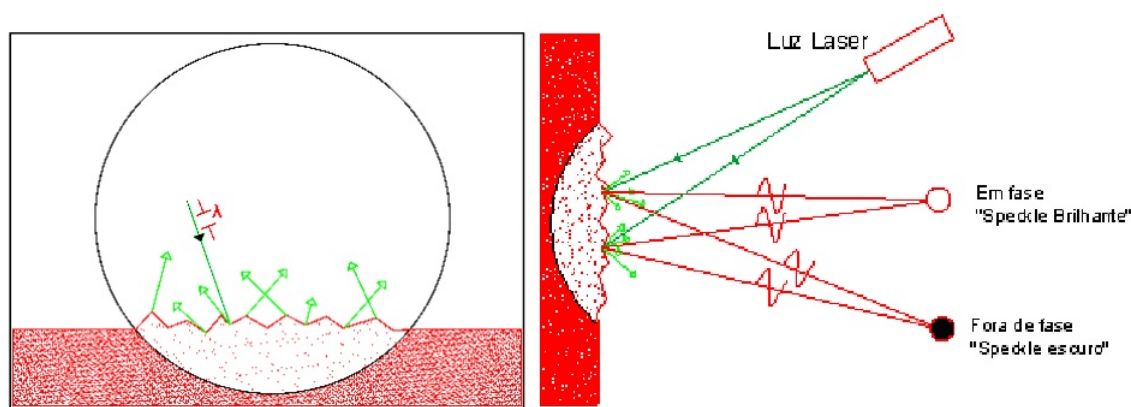
Para obter um padrão granulado bem definido, é necessário iluminar uma superfície rugosa com um laser cujo comprimento de onda λ é menor que a rugosidade da superfície. A luz de uma fonte de laser deve ser usada porque tem alta coerência espacial e temporal.

Quando as ondas luminosas refletidas aleatoriamente por uma região da superfície rugosa interferem entre si e estão predominantemente em fase, forma-se um *speckle* claro. Se, ao contrário, a interferência é predominantemente destrutiva, forma-se um *speckle* escuro, conforme Figura 4.2. No conjunto, considerando todas as combinações dispostas aleatoriamente, forma-se o padrão característico de *speckle* mostrado na Figura 4.1.

4.3.2 Holografia digital

O procedimento experimental da holografia permanece o mesmo discutido na seção 4.2. A diferença é que em sua forma digital, os registros holográficos são obtidos por um sensor

Figura 4.2 – Comportamento do padrão de interferência



Fonte: Adaptado de Schöntag et al. (2012)

digital, tal como uma câmera CCD ou similar, e processados em um sistema microprocessado, geralmente um computador, permitindo uma experimentação mais rápida e com maior qualidade, além da extração de mais informações através do processamento numérico digital (PICART; MONTRESOR, 2020).

4.3.3 ESPI

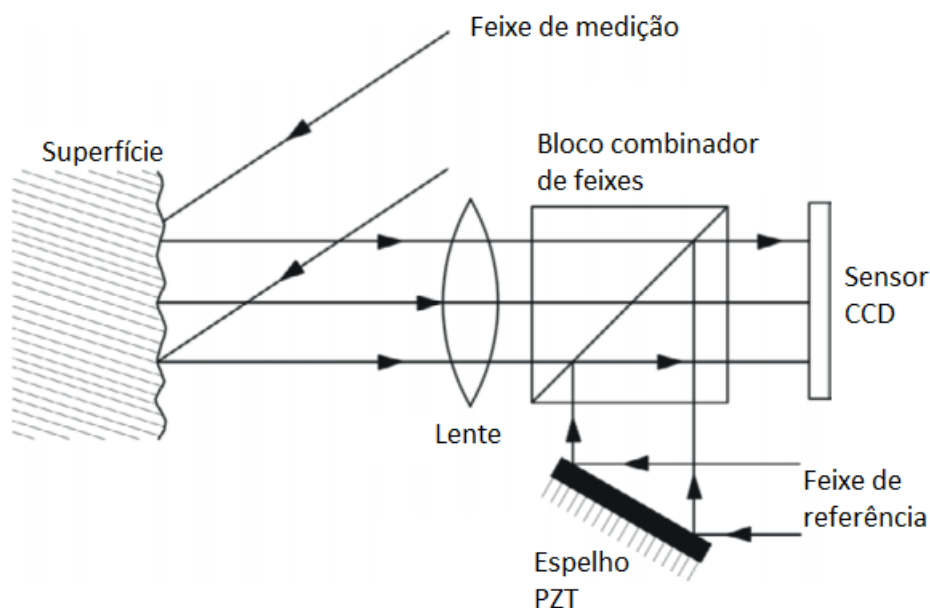
As técnicas de ESPI, Electronic Speckle Pattern Interferometry, surgiram a partir do desenvolvimento das técnicas de interferometria holográfica, substituindo as emulsões fotográficas por uma câmara de vídeo. Dependendo da configuração óptica do sistema de ESPI, este pode ser sensível a deslocamentos fora do plano ou a deslocamentos no plano. Para que um sistema seja sensível a deslocamentos fora do plano, o objeto precisa ser iluminado por um feixe de luz e a referência obtida por meio de um feixe especular proveniente da mesma fonte (LØKBERG, 1987). A Figura 4.3 exibe o arranjo experimental de um sistema ESPI.

4.3.4 Shearografia digital

Shearografia é uma tradução adotada para o português da técnica de medição conhecida como *Shearography* (ALBERTAZZI et al., 2006). É originária da junção das palavras *shear*, que significa cisalhamento ou deslocamento lateral e *graphy* que significa registro (WILLEMANN; ALBERTAZZI; MENICONI, 2007). É também conhecida como SPSI (*Speckle Pattern Shearing Interferometry*) (SCHÖNTAG, 2008).

As técnicas de shearografia e holografia eletrônica possuem princípios ópticos similares, porém medem grandezas distintas. A holografia mede campos de deslocamentos. A shearo-

Figura 4.3 – Arranjo experimental do ESPI.



Fonte: Adaptado de Ibrahim (2016)

grafia mede primeiras derivadas do campo de deslocamento na direção coincidente com a do deslocamento lateral aplicado (SCHÖNTAG, 2008).

A shearografia mede campos de pequenas deformações na superfície do objeto inspecionado. É uma técnica com certa similaridade com a holografia eletrônica por efetuar a medição a partir da interferência entre *speckles*. A shearografia usa uma configuração diferente com a qual mede a primeira derivada no campo de deslocamento na direção do deslocamento lateral ao qual essa imagem é submetida (horizontal, vertical, diagonal ou radial)(STEINCHEN; YANG, 2003)

Quando um objeto é submetido a um carregamento, podem surgir deformações e consequentemente o padrão de *speckle* é ligeiramente alterado (ANGELIS, 2001). Da mesma forma que a holografia eletrônica, a shearografia se baseia na diferença de dois padrões de *speckle*, coletados antes e após a aplicação do carregamento, que dá origem à deformação do material.

Se o campo de deslocamentos for constante em cada ponto do objeto, a primeira derivada do deslocamento será igual a zero, o que não produzirá franjas na medição com shearografia. Esta propriedade a torna praticamente insensível a movimentos de corpo rígido e permite sua aplicação fora de ambientes laboratoriais (SCHÖNTAG, 2008).

A shearografia tem apresentado bons resultados para a detecção de falhas em materiais compósitos, principalmente na indústria aeroespacial e naval. Sua aplicação em campo é possível, pois é pouco sensível a deslocamentos de corpo rígido.

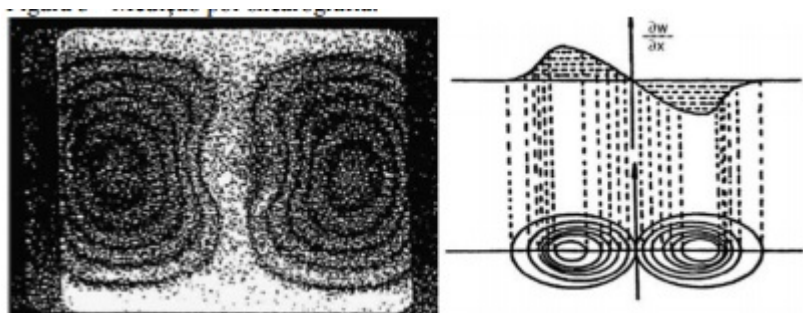
O procedimento experimental da shearografia exige a obtenção de dois registros, também chamados de padrões, da superfície estudada: Um registro obtido da superfície sem aplicação de carga e outro com aplicação de carga. Através da correlação existente entre estes padrões, é possível extrair o padrão de interferência. O grande benefício na utilização da shearografia com relação às outras técnicas interferométricas é que o padrão obtido apresenta diretamente o gradiente da deformação, ou seja, a shearografia é capaz de realizar a diferenciação de maneira óptica. A diferenciação da deformação apresenta melhor os defeitos através pontos de tensão localizados presentes no corpo estudado. Além disto, a diferenciação numérica causa grandes irregularidades no padrão resultante, dado a presença de grande nível de ruído speckle presente nos padrões obtidos, destacando assim a praticidade e a vantagem da shearografia sobre outras técnicas interferométricas (STEINCHEN; YANG, 2003).

Em sua forma digital, os padrões são obtidos por algum dispositivo de captura conectado a um computador, geralmente uma câmera digital CCD. É atualmente a forma mais utilizada, dado os inúmeros benefícios que esta configuração permite, tais como velocidade de processamento, qualidade visual dos padrões e resultados, praticidade experimental, análises numéricas mais aprofundadas, possibilidade de monitoração dinâmica, etc.

4.3.4.1 Princípios da Shearografia

A shearografia mede, aproximadamente, a primeira derivada do deslocamento na direção correspondente do deslocamento lateral ao qual a imagem é submetida (horizontal, vertical, diagonal ou radial) (STEINCHEN; YANG, 2003). A Figura 4.4 apresenta um padrão de franjas típico e o gráfico da amplitude que representa a primeira derivada de w (componente do deslocamento fora do plano) em relação ao eixo x (horizontal) do campo de amplitudes de uma placa retangular (HUNG; HO, 2005).

Figura 4.4 – Franjas de interferência

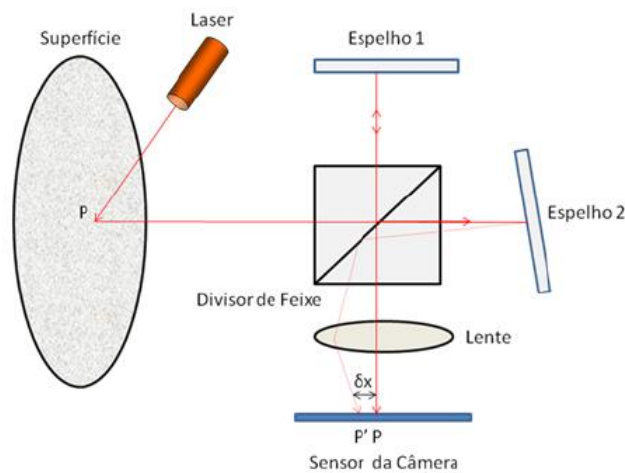


Fonte: Adaptado de Hung e Ho (2005)

Como na holografia, o sistema óptico utilizado pode ser inspirado no interferômetro de *Michelson*, que contém dois espelhos móveis e um divisor de feixe em seu centro. Porém, há uma diferença fundamental: a interferência é obtida entre a imagem original da superfície medida com outra imagem da mesma superfície, porém lateralmente deslocada. Na Figura 4.5 é possível visualizar um exemplo de configuração dos componentes ópticos seguindo o modelo de *Michelson*.

Para entender o seu funcionamento, de acordo com Albertazzi et al. (2006) é necessário caracterizar os conceitos de diferença de fase e deslocamento de fase.

Figura 4.5 – Configuração para shearografia inspirada no Interferômetro de *Michelson*.



Fonte: Adaptado de Willemann, Albertazzi e Meniconi (2007)

4.3.4.2 Formação de franjas no DSPI

Yang et al. (1995) diz que quando uma configuração de manchas produzida por um difusor na superfície do objeto interfere com uma onda de luz de referência ou com outro padrão de *speckle*, a interferência aleatória padrão é produzida. A distribuição da intensidade $I(x,y)$ do padrão de interferência é dada, como para todos tipos de interferometria, por:

$$I(x,y) = I_0[1 + \gamma \cos\phi(x,y)] \quad (4.1)$$

Onde I_0 representa a intensidade média dos dois feixes de luz, γ representa a modulação do termo de interferência e $\phi(x,y)$ representa o ângulo de fase aleatória antes da deformação do objeto. Quando o objeto é deformado, uma alteração óptica do caminho ocorre devido ao deslocamento da superfície do objeto. Assim, a distribuição de intensidade $I'(x,y)$ do padrão de interferência é ligeiramente alterado e agora representado por:

$$I'(x,y) = I_0\{1 + \gamma\cos[\phi(x,y) + \Delta]\} \quad (4.2)$$

Onde $\phi(x,y)$ representa o ângulo de fase aleatória após a deformação do objeto e Δ representa a mudança de fase relativa devido à deformação do objeto, o que pode ser descrito por:

$$\Delta = \phi'(x,y) - \phi(x,y) \quad (4.3)$$

Assim, o olho não vê franjas. No entanto, esta franja padrão varia de tipo de frequência e pode ser convertida em franjas visíveis de intensidade por meio da filtragem ótica de Fourier ou uma simples configuração de reconstrução de luz branca (para SPSI). As franjas visíveis descrevem a diferença de fase relativa Δ . Nas áreas onde $\Delta = (2n + 1)\pi$ as franjas aparecem escuras, n sendo a ordem de franja (YANG et al., 1995).

Em *electronic* SPI e SPSI, isto é ESPI e ESPSI, as duas distribuições de intensidade $I(x,y)$ e $I'(x,y)$ antes e após a deformação são digitalizadas e armazenadas em dois quadros. A Subtração dos dois quadros produzem um padrão de franjas. Uma vez que a intensidade de uma imagem não pode ser negativa, valores absolutos da subtração serão exibidos. Agora o olho vê a média dos valores absolutos da subtração sobre uma área primária.

Esta função é semelhante à franjas em um interferômetro clássico onde as franjas são senoidalmente dependente de uma mudança de fase relativa Δ . Obviamente, um padrão de franjas visível é obtido sob um brilho máximo quando $\Delta = (2n + 1)\pi$ e um mínimo quando $\Delta = 2n\pi$, n é a ordem de franja. No método de tempo real, a primeira distribuição de intensidade é armazenada em um quadro enquanto a segunda imagem é armazenada por um quadro em tempo real e a imagem resultante da subtração da operação anterior é apresentada também em tempo real na placa de captura, e, portanto, as franjas pode ser observada em tempo real no monitor (a taxa de vídeo)(YANG et al., 1995).

ESPI e ESPSI superam as desvantagens da técnica fotográfica. Elas eliminam a gravação fotográfica, processamento úmido e reconstrução, e perceber-se a observação de franja em tempo real. Elas são adequadas para realizar muito bem em teste não destrutivo. No entanto, como o SPI fotográfico e SPSI, ESPI e ESPSI não pode determinar a distribuição fase de seus padrões de franjas automaticamente e precisamente. Portanto, é muito difícil processar as informações do padrão de franjas mais distante (YANG et al., 1995).

4.3.4.3 Princípio básico da técnica de mudança de fase

Desmodulação de fase é um processo fundamental para a projeção de franja. Muitos métodos de desmodulação de fase têm sido desenvolvidos nas últimas décadas. Entre eles, o algoritmo de mudança de fase é preferido em medição de precisão. Para desmodulação de fase, a utilização de um projetor digital faz com que seja possível definir de forma flexível a fase dos padrões de franjas projetadas. No entanto, a gama não linear em projetores digitais e câmeras, que representa a relação entre a intensidade de luz entrada e a intensidades de luz de saída, traz erro na fase modulada. O erro de fase acabará por reduzir a precisão da medição 3D. Portanto, o efeito gama deve ser considerado, especialmente quando um pequeno passo de desmodulação de fase é adotado (ZHANG et al., 2015).

Muitos métodos têm sido propostos para reduzir os efeitos adversos influência da gama na última década. Alguns métodos de pré-calibrar a curva gama, e, em seguida, pré-distorcer a intensidade dos padrões de franjas projetadas com base nele; alguns métodos de detectar a distribuição do erro de fase causada pelo gamma para compensar a fase calculada; alguns métodos de analisar a gama do sistema de medição, e enquanto isso, trabalhar para fora uma fase mais precisa com base em algumas características estatísticas; aumento do número de deslocamento de fase é também um meio eficaz para suprimir o erro de fase causado pela gama; Todos estes métodos contribuem para a diminuição do erro de fase causada por gama. No entanto, cada uma delas tem as suas características próprias. Note-se por Hoang et al. (2010) e Liu et al. (2010) que o valor gamma varia de acordo com o pixel de coordenadas. Embora a não uniformidade gama seja considerada, um algoritmo de *phase-shifting* de grande passo tem que ser empregado em cada medição, graças ao método de Liu et al. (2010). Surrel (1996) demonstra que erro de fase causado pelo conteúdo harmônico dos padrões de franjas amostrados pode ser grandemente minimizado quando um algoritmo de passa alta de mudança de fase é utilizado. Para uma medição 3D dinâmica, no entanto, um algoritmo de mudança de fase passa baixa é uma escolha melhor. Um método simples para detectar a fase de campo total de distribuições de erro causadas por gama continua a ser desvendado, e uma abordagem eficaz e fácil de usar para compensar o erro de fase de campo total induzido por gamma também continua a ser mais pesquisado (ZHANG et al., 2015).

A técnica de mudança de fase é utilizada para determinar a distribuição de fases em franjas de interferometria. Quando esta técnica é utilizada em SPI e SPSI, a mudança de fase relativa correspondente ao deslocamentos de superfície do objeto (em SPI) ou para o desloca-

mento gradiente da superfície do objeto (em SPSI) devido à deformação do objeto e que pode ser determinado automaticamente e precisamente por meio do cálculo dos padrões de interferência de fase distribuídos antes e após a deformação das intensidades medidas. De um modo geral, existem três incógnitas à distribuição de intensidade da Equação(5). A fim de calcular a fase ϕ , é necessário gravar, pelo menos, três distribuições de intensidade correspondentes a diferentes quantidades de deslocamento de fase. Para cada registo de intensidade um deslocamento de fase adicional de 120° para um feixe no interferômetro é utilizado. A digitalização de três padrões de intensidade fornece três equações como Equação(10):

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= I_0\{1 + \gamma\cos[\phi(x, y)]\} \\ I_2(x, y) &= I_0\{1 + \gamma\cos[\phi(x, y) + 120]\} \\ I_3(x, y) &= I_0\{1 + \gamma\cos[\phi(x, y) - 120]\} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Existem apenas três incógnitas nestas três equações, por conseguinte, a fase calculada em cada ponto detectados neste padrão de interferência é:

$$\phi = \arctan \frac{\sqrt{3(I_3 - I_2)}}{2I_1 - I_2 - I_3} \quad (4.5)$$

Depois que o objeto é deformado, mais três quadros de dados de intensidade são tomados enquanto a mudança de fase com a mesma quantidade serve para o primeiro conjunto de dados. A distribuição de fases ϕ' do padrão de interferência após a deformação pode também ser calculada, como ϕ . O tempo para a aquisição de uma imagem é geralmente $40\mu s$ e o cálculo da fase distribuição ϕ ou ϕ' pode ser concluído no prazo de um segundo. Uma vez que estes dados são tomados, a relativa mudança de fase pode ser calculada simplificando a subtração da equação (6). A fase computadorizada está envolvida no intervalo 0 para 2π , e um padrão de franjas de modulo fase 2π descrevendo a mudança de fase relativa Δ é encontrado. (O contraste do padrão de franjas torna-se quase ideal através do processamento de ruído.) Uma distribuição de fase desenvolvida pode ser determinada por uma algoritmo de desempacotamento de fase (YANG et al., 1995).

Técnicas de interferometria *speckle* de dupla-exposição de medidas com *electronic speckle pattern interferometry*(ESPI) que medem deformações e contornos têm sido utilizados por

cerca de 15 anos. Estas técnicas de produzir franjas de correlação que correspondem ao movimento do objeto entre as exposições e a forma do objeto. Para obter franjas correspondentes a uma deformação objeto, interferograma primário do objeto são gravados utilizando uma câmera de TV antes e depois a deformação. Estes interferogramas são, em seguida, eletronicamente processado para produzir franjas de correlação ou um interferograma secundário, que corresponde exatamente ao movimento do objeto entre as exposições. Contudo, as franjas de correlação não estão claramente definidas, porque eles são compostos de variações em contraste de *speckle*. Técnicas de interferometria *speckle* tem sido boa para medições qualitativas, mas não têm produzido bons resultados quantitativos, uma vez que é difícil de determinar os centros de franja (YANG et al., 1995).

Os dados quantitativos podem ser obtidos utilizando deslocamento de fase de interferometria(PSI). PSI foi usado para objetos de teste especulares não destrutivos, deslocando o fase de um feixe no interferômetro respectivo para o outro. A fase de frente de onda do teste relativo para a frente de onda de referência pode ser simplesmente calculada a partir das intensidades interferograma medidos para múltiplos deslocamentos de fase. Medições de fase de dupla-exposição (isto é, de deformações) foram feitas por combinação holografia de dupla-exposição e interferometria de mudança de fase em interferometria holográfica digital(DHI). DHI requer a realização de um holograma intermediário(usando algo tal como uma câmera termoplástica) com o objeto de teste no lugar. Em seguida, o objeto é deformado, e a fase de um feixe do interferômetro é alterado, e a interferência entre a frente de onda gravada no holograma e a frente de onda deformada produz franjas de interferência secundárias correspondente à deformação. As intensidades destas franjas secundárias são registradas em diferentes deslocamentos de fase relativo de modo que a fase pode ser calculada. DHI foi usado para testar quantitativamente tanto opticamente superfícies lisas e difusas (YANG et al., 1995).

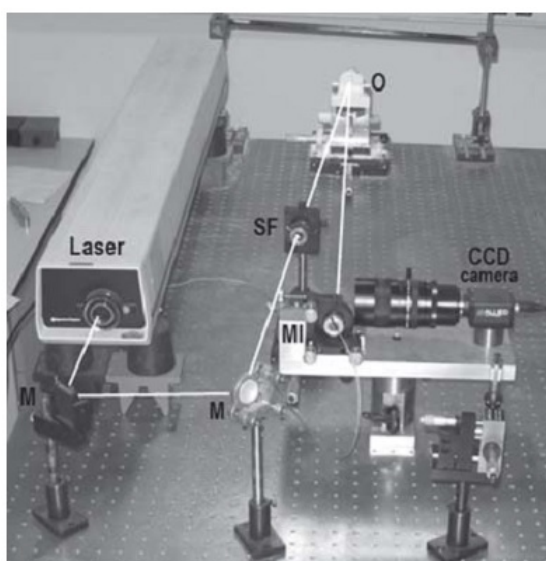
Mudança de fase pode ser aplicado a interferometria *speckle* para produzir amplificadores de fase para exposições duplas de superfícies difusas sem um passo de gravação intermediária. Os mapas de fase são calculados a partir de conjuntos de fase deslocado de dados de intensidade medida antes e após a deformação e, em seguida, combinados para produzir a fase da diferença entre as exposições. Cada conjunto de fase deslocada de dados de intensidade é obtido da mesma forma como PSI. Para determinar a fase de deformação do objeto, as fases dos padrões de manchas antes e após a deformação são simplesmente subtraídas (YANG et al., 1995).

4.3.4.4 Mudança de fase a partir do interferômetro de Michelson

A Figura 4.6 mostra uma instalação experimental usada para medir ESPI em deformações fora do plano. Um feixe de laser de He-Ne (Spectra Physic, 45 mW) é usado como uma fonte de iluminação; o objeto é iluminado a um ângulo de aproximadamente 0° , depois de ser dirigido por espelhos e ampliado por um filtro espacial. A luz dispersa cai em um sistema interferométrico de Michelson que gera duas vigas perpendiculares de igual irradiância, I_0 , por meio de um cubo divisor de feixe. Ambas as vigas são refletidas, respectivamente, em dois espelhos perpendiculares, um deles com uma inclinação para obter o cisalhamento e o outro com um transdutor piezoelétrico para a aplicação de desvios de fase (CREATH, 1985).

Estes feixes voltam ao centro do interferômetro, se fundem na entrada da lente fotográfica (Sigma 28 a 200 mm), e gravam a imagem na câmera CCD.

Figura 4.6 – Configuração para shearografia inspirada no Interferômetro de *Michelson*.



Fonte: Adaptado de Salvador-Palmer et al. (2012)

4.3.5 Algoritmos de mudança de fase

A "Shearografia" (DSPI) tem uma melhora significativa na aquisição de imagem, se comparada com as abordagens que usam dispositivos analógicos, apesar de sua resolução reduzida, como em comparação com os meios de comunicação holográficas, e bem como com o ruído introduzido pelo "speckles" (GOODMAN, 2007).

Uma forma de melhorar a qualidade das imagens que vêm da interferência dos padrões de manchas em aplicação digital é a adoção do processo de mudança de fase Gu e Wang (2010)

Creath (1985). Deslocamento de fase, a aplicação de uma mudança de fase das ondas de referência a partir do objeto em análise. A montagem tradicional adotada por DSPI ou métodos de shearografia digital é semelhante da disposição da shearografia presente. Um divisor de feixe, representado por um cubo óptico com um espelho semi-transparente, proporciona a separação e a união das vigas criando a interferência deles. O feixe proveniente do objeto é dividido em duas partes pelo cubo, com dois feixes atingindo os espelhos. Um dos espelhos tem o transdutor piezoelétrico (PZT), que é responsável pela inclinação na mesma, proporcionando o deslocamento de fase e, portanto, a melhoria da imagem resultado final. O método permite a medição das deformações para fora do plano, com alguns melhoria da qualidade das imagens finais obtidas pela interpolação resultante do deslocamento do espelho (MARTÍNEZ-CELORIO et al., 2010). A diferença de fase para um ângulo de iluminação objeto muito pequeno é mostrado como se segue:

$$\Delta\Psi = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\delta w(x,y)}{\delta y} \right) \Delta y \quad (4.6)$$

onde λ é o comprimento de onda do feixe de laser, $\frac{\delta w(x,y)}{\delta y}$ é a deformação para fora do plano, no ponto (x, y) do objeto, e Δy é o cisalhamento introduzido pelo espelho.

Há alguns algoritmos que realizam o deslocamento de fase, e o objetivo é criar quatro imagens com uma mudança de fase de $\frac{\pi}{2}$ entre as duas imagens na sequência (HIPPEL et al., 2004). Por exemplo, obter uma imagem como a referência antes da deformação de um objeto e outras quatro, após a deformação. A imagem de referência é então comparada (subtraída) para cada uma das quatro imagens deslocadas, e as quatro comparações são utilizadas para criar apenas uma imagem. equação 4.7 representa o processamento de uma das quatro imagens, depois das comparações (STEINCHEN; YANG, 2003).

$$\Psi(x,y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_4(x,y) - I_2(x,y)}{I_1(x,y) - 2I_3(x,y)} \right] \quad (4.7)$$

Segundo Cheng e Wyant (1985b) a criação das imagens usando um deslocamento PZT, apesar da sua grande utilização, tem algumas desvantagens, tais como o custo do aparelho e, o mais importante, as dificuldades para aplicar o mesmo deslocamento do espelho por intermédio do PZT. Alguns causadores dessas dificuldades estão relacionadas com a ligação do PZT para o espelho, e o ajustamento da tensão de direita para mover o PZT com o mesmo intervalo dos três

deslocamentos para gerar o deslocamento (VEUSTER et al., 1996). O desafio da polarização do PZT cria alguns problemas de repetibilidade, o que pode comprometer os resultados.

4.3.6 Cálculo das diferenças de fase

Em interferometria de mudança de fase digital, a diferença de fase entre os dois feixes de interferência é variada numa maneira conhecida, e as medições são feitas da distribuição de intensidade por meio da pupila correspondendo a, pelo menos, três diferentes deslocamentos de fase. Se os valores destes desvios de fase são conhecidos, é possível calcular a diferença de fase inicial entre os feixes de interferência (BRUNING et al., 1974). Uma maneira simples de introduzir estas mudanças de fase é montar um dos espelhos do interferômetro em um transdutor piezoelétrico (PZT) e aplicar as tensões apropriadas para o PZT. A calibração precisa do PZT é muito importante para obter os deslocamentos de fase desejadas entre os quadros de dados (SCHWIDER et al., 1983). Dois problemas básicos são encontrados neste contexto. O primeiro é a sensibilidade desconhecida do PZT. A segunda é variações na resposta do PZT através de um diâmetro que pode introduzir uma inclinação e resultar em uma mudança de fase variando em todo o escopo.

De acordo com Carré (1966), estes problemas podem ser ultrapassados por meio de um algoritmo que avalia implicitamente os deslocamentos de fase reais em cada apontamento e as utiliza para calcular os valores da diferença de fase original entre os feixes de interferência. A forma mais simples de um algoritmo de auto-calibração requer quatro medições da intensidade em cada ponto correspondente a três passos de fase iguais (CHENG; WYANT, 1985a). Se φ é a fase inicial da diferença entre os dois feixes no interferômetro e I_1, I_2, I_3 e I_4 são as intensidades correspondentes ao deslocamentos de fase adicional de $-3\alpha, -\alpha, +\alpha$ e $+3\alpha$, respectivamente, tem se:

$$\tan^2 \alpha = \frac{3I_2 - 3I_3 - I_1 + I_4}{I_1 + I_2 - I_3 - I_4} \quad (4.8)$$

$$\tan^2 \varphi = \frac{(3I_2 - 3I_3 - I_1 + I_4)(I_1 + I_2 - I_3 - I_4)}{(I_1 + I_2 - I_3 - I_4)^2} \quad (4.9)$$

No entanto, para medições de alta precisão sobre plano e superfícies esféricas, é desejável que trabalhe com uma campo uniforme. Dificuldades podem surgir com Eqs. (4.8) e (4.9) a diferença de fase original entre os dois feixes é perto de $m\pi$ onde m é um número inteiro. Nessas

condições, o numerador e o denominador das Eqs. (4.8) e (4.9) tende para zero, aumentando a incerteza nos valores de $\tan\alpha$ e $\tan\varphi$. Este problema é evitado com um algoritmo de cálculo de fase que utiliza cinco medições da intensidade I_1, I_2, I_3, I_4 e I_5 , correspondente aos passos de fase adicional de $-2\alpha, -\alpha, 0, +\alpha$, e $+2\alpha$, respectivamente. Podemos, então, escrever:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= A + B + 2(AB)^{1/2} \cos(\varphi - 2\alpha) \\
 I_2 &= A + B + 2(AB)^{1/2} \cos(\varphi - \alpha) \\
 I_3 &= A + B + 2(AB)^{1/2} \cos \varphi \\
 I_4 &= A + B + 2(AB)^{1/2} \cos(\varphi + \alpha) \\
 I_5 &= A + B + 2(AB)^{1/2} \cos(\varphi + 2\alpha)
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Em que A e B são as intensidades dos dois feixes. Estas equações produzem o resultado:

$$\frac{I_2 - I_4}{(2I_3 - I_5 - I_1)} = \frac{\sin \alpha \sin \varphi}{(1 \cos 2\alpha) \cos \varphi} \tag{4.11}$$

Pode-se mostrar que a variação do lado direito da eq.(4.11) com α cai para zero quando $\alpha = 90^\circ$. A equação (4.11), em seguida reduzida para:

$$\tan \varphi = \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \tag{4.12}$$

Uma vez que não é possível para o numerador e denominador Eq. (4.12) ir a zero ao mesmo tempo, ele pode ser usado para todos valores de φ . A possibilidade de utilizar esse algoritmo simples, com cinco medições de intensidade tem sido sugerido por (SCHWIDER et al., 1983) mas eles parecem ter avaliado os erros residuais incorretamente e ignoraram o fato de que ele dá muito pequeno erros de desvio bastante significativos do passo de fase α a partir de um valor nominal de 90° . Vamos supor que o PZT é ajustado de modo que inicialmente o passo de fase α é nominalmente igual a 90° ; isso é $\alpha = (\pi/2) + \varepsilon$, onde ε é uma pequena quantidade.

Pode então ser mostrado a partir da Eq. (4.13) para que um erro ε no passo de fase, o valor da diferença de fase inicial obtido a partir da Eq. (4.12) é fornecido a uma primeira aproximação pela relação

$$\tan \varphi' = [1 + (\varepsilon^2/2)] \tan \varphi \quad (4.13)$$

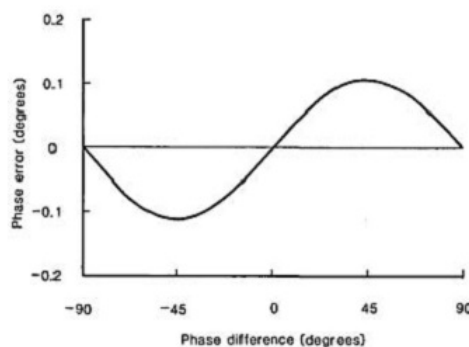
Por conseguinte, o erro no valor calculado de φ é:

$$\Delta\varphi = \varphi' - \varphi = (\varepsilon^2/4)\sin 2\varphi \quad (4.14)$$

Segue-se a partir da Eq. (4.14) um desvio em que o 2.º passo de fase a partir do seu valor nominal de 90 ° resulta num erro máximo no valor calculado da diferença de fase única de $\pm 0,02$ °.

Este valor do erro é confirmada por um cálculo numérico. Por outro lado, com um algoritmo convencional usando três valores da intensidade, o mesmo desvio da passo de fase a partir do seu valor nominal dá um erro de ± 1 °. A capacidade deste algoritmo para compensar grandes desvios no passo de fase a partir do seu valor nominal de 90 ° é mostrado pela Fig. 4.7, que é derivado de cálculos numéricos e mostra o erro como uma função de φ para um passo de fase de 95 ° (HARIHARAN; OREB; EIJU, 1987).

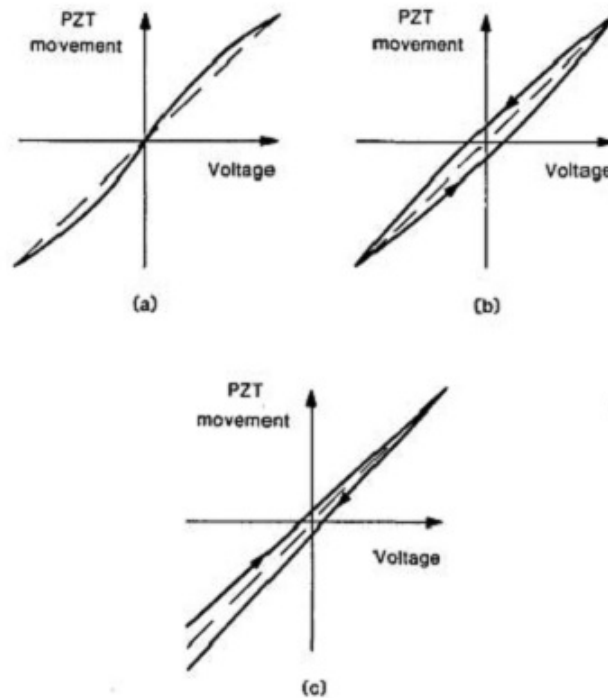
Figura 4.7 – Erro de fase plotados contra a diferença de fase por um erro no passo de fase de 5 ° (passo de fase de 95 ° em vez de 90 °).



Fonte: Adaptado de Hariharan, Oreb e Eiju (1987)

A utilização deste algoritmo com cinco leituras de intensidade também reduz substancialmente os efeitos de desvios de linearidade do PZT. Após avaliados os erros residuais numericamente em três casos típicos, caracterizou-se pelas respostas mostradas nas Figs 4.8 a-c.

Figura 4.8 – O movimento do PZT como uma função da tensão aplicada a ele que mostra os erros típicos: (a) não linear simples; (b) a histerese; e (c) desvio linear.

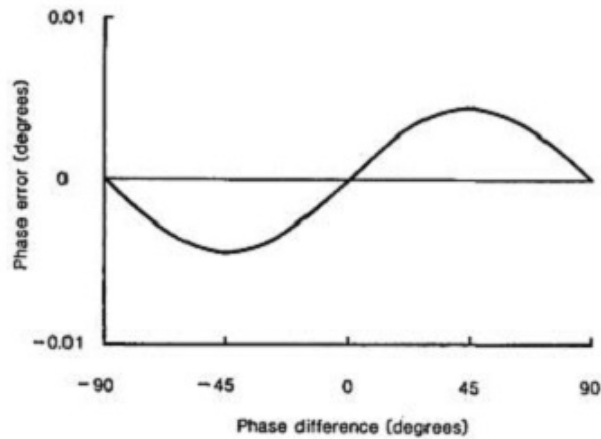


Fonte: Adaptado de Hariharan, Oreb e Eiju (1987)

No primeiro caso, mostrado na Fig. 4.8(a), o PZT tem uma resposta não-linear com desvios de linearidade de $\pm 1^\circ$ em desvios de fase nominal de $\pm 90^\circ$, respectivamente. A Figura 4.9 mostra que o erro máximo no valor de φ neste caso, é inferior a $+ 0.005^\circ$. No segundo caso, mostrado na fig. 4.8 (b), o PZT apresenta histerese com desvios linearidade de $\pm 2^\circ$, quando a mudança de fase é, nominalmente, igual a 0 e $\pm 1^\circ$, quando a mudança de fase é, nominalmente, igual a 90° . O erro de fase principal que é um deslocamento de $\pm 1,00^\circ$, com um erro residual devido à não linearidade que é inferior a $\pm 0,005^\circ$. Uma vez que o offset é uniforme ao longo de todo o campo, que pode ser negligenciado para muitas finalidades. No entanto, uma vez que o sinal do deslocamento depende da direção na qual o circuito é atravessado, é possível eliminar o deslocamento, se necessário, tendo um segundo conjunto de leituras em ordem inversa e a média dos dois conjuntos de valores (HARIHARAN; OREB; EIJU, 1987).

Outra possível fonte de erro, mostrado esquematicamente na fig. 4.8 (c), é um desvio linear do PZT. Os efeitos de um tal desvio pode também ser eliminado, tendo um segundo

Figura 4.9 – Erro de fase plotados contra a diferença de fase para uma PZT com desvios da linearidade de $\pm 1^\circ$ a deslocamentos de fase nominais de $\pm 90^\circ$.



Fonte: Adaptado de Hariharan, Oreb e Eiju (1987)

conjunto de leituras na sequência inversa e calculando a média dos valores de dois conjuntos. A calibração preliminar do PZT para garantir que o passo de fase seja aproximadamente igual a 90° pode ser realizada com quatro dos cinco valores da intensidade. Para esta calibragem, usamos a equação:

$$\cos \alpha = \frac{I_5 - I_1}{2(I_4 - I_2)} \quad (4.15)$$

Para evitar erros que surgem quando tanto o numerador e o denominador da Eq. (4.15) encontram-se perto de zero, algumas franjas são introduzidos através do campo e os dados para os pontos para os quais $(I_4 - I_2)$ é menor do que um limiar especificado são rejeitadas. O valor médio do passo de fase é obtido calculando-se a média dos resultados de mais de um o número de pontos de dados. As tensões aplicadas ao PZT são em seguida, ajustada de modo que $\cos \alpha = 0$ (HARIHARAN; OREB; EIJU, 1987).

A implementação deste algoritmo com um microcomputador não apresenta problemas, além da exigência de adicional espaço de memória para armazenar mais de um quadro. Na verdade, pode resultar numa diminuição no tempo de processamento, uma vez que a fórmula utilizada para calcular a diferença de fase é muito mais simples do que a Eq. (4.9). A gama de

movimento necessário do PZT ($\pm 180^\circ$) também é muito semelhante à que é requerida quando a Eq. (4.9) é usada (HARIHARAN; OREB; EIJU, 1987).

4.4 Vantagens e desvantagens da Shearografia

De acordo com Miranda (2011) as principais vantagens da metodologia shearográfica são:

- Inspeção global (não pontual);
- Sem contato do sensor;
- Grande sensibilidade;
- Rapidez;
- Capacidade de operação fora do ambiente laboratorial;
- Acesso a apenas um lado da peça;
- Insensível à geometria da peça;
- Adequado para grandes superfícies;
- Elevado grau de automação;
- Acompanhamento da evolução por registro digital e comparação ao longo do tempo;
- Possibilidade de avaliação da extensão e severidade de danos/defeitos;
- Customização do sistema de acordo com a necessidade.

A principal desvantagem da shearografia é que os efeitos da presença de defeitos internos à peça, componente ou estrutura devem necessariamente se manifestar como campos de deslocamento, ou deformação, na superfície que está sendo inspecionada. Em suma, assim como a termografia infravermelha, a shearografia não é uma metodologia de volume (como a são a ultrasonografia e a radiografia), mas sim de superfície.

4.5 Arranjo experimental da shearografia

O arranjo experimental da shearografia é composto basicamente de três componentes principais: uma fonte de luz monocromática e coerente, em que o laser é o mais utilizado, um interferômetro, e um dispositivo de captura dos padrões. O que mais difere nos arranjos são os interferômetros utilizados e suas adaptações. Dentre os existentes, os mais utilizados são o interferômetro de Mach–Zehnder e o interferômetro de Michelson modificado. Dentre estes, o último é o mais utilizado devido à simplicidade e menor dificuldade na calibração e ajuste da configuração experimental (HUNG, 1974). O arranjo da shearografia digital com o interferômetro de Michelson é exibido na Figura 4.10.

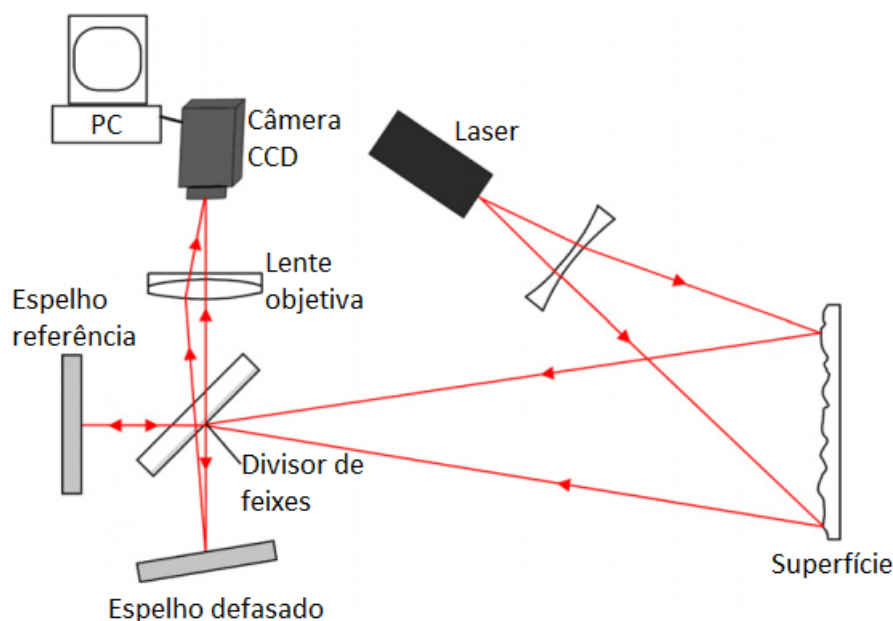
4.5.1 Interferômetro de Michelson modificado

Os componentes presentes neste interferômetro são basicamente um bloco divisor de feixes, dois espelhos e uma lente objetiva. O divisor de feixes recebe os feixes de luz refletidos pela superfície, sendo estes feixes provenientes de uma fonte de luz coerente, e os divide em dois feixes que percorrem por caminho distintos com metade da intensidade. Cada feixe é refletido por um espelho, sendo um destes levemente defasado, e outro definido como de referência, retornando ambos os feixes ao bloco divisor. Ao passar pelo divisor de feixes, os feixes se encontram com leve deslocamento devido ao caminho diferente percorrido pelo feixe refletido no espelho defasado, se recombinando na lente objetiva, sendo posteriormente capturado por um sensor de captura CCD no caso da shearografia digital. Esta recombinação e o deslocamento lateral entre os feixes gera interferência entre eles, tendo como produto o padrão speckle (HECHT, 2001).

4.6 Padrão de interferência

O padrão de interferência é um mapa que apresenta as franjas formadas pelo processo de interferência de ondas luminosas, que podem se apresentar desde interferências destrutivas, apresentando franjas totalmente escuras, até as construtivas, que se apresentam totalmente claras. Estas franjas se apresentam de forma similar a curvas de nível, permitindo fácil leitura e interpretação rápida dos resultados experimentais (ABDELSALAM; YAO, 2017). Para a shearografia, a obtenção do padrão de interferência se dá pela subtração dos padrões speckle de referência, obtido antes da aplicação da carga sobre a superfície estudada, e de deformação,

Figura 4.10 – Shearografia digital com interferômetro de Michelson modificado.



Fonte: Adaptado de Francis, Tatam e Groves (2010)

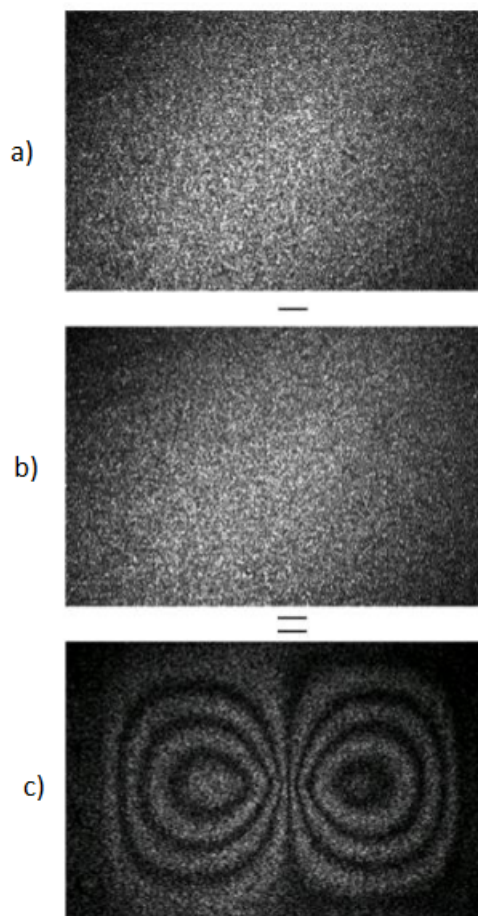
obtido após a aplicação da carga. No caso da shearografia digital, tal processo pode resultar em pixels de valores negativos, sendo necessário a obtenção do valor absoluto dos pixels. O procedimento de obtenção do padrão de interferência é exibido na Figura 4.11.

Na shearografia, o padrão de interferência carrega a informação de gradiente da deformação da superfície estudada, permitindo a fácil detecção de defeitos estruturais. Para análise e visualização da deformação em si, é necessária a realização da integração do mapa de fases desempacotados (YANG et al., 2004).

4.7 Mapa de fases

O procedimento experimental da shearografia gera como resultado o padrão de franjas de interferência, dado pelas operações de subtração e de valor absoluto dos padrões obtidos antes e após a aplicação de uma carga sobre uma superfície. A partir deste padrão é possível obter o mapa de fases, que apresenta maior resolução e sensibilidade, retratando com mais qualidade a presença de uniformidades na superfície estudada (HUANG; FORD; TATAM, 1996). Este mapa é denominado como mapa de fases empacotados pois apresenta regiões com saltos de 2π , tendo como valores mínimo e máximo de $-\pi$ e π . Após a obtenção deste mapa, é necessária a utilização de um algoritmo de desempacotamento que adicionará múltiplos de 2π nas regiões do mapa de fases empacotados e recuperará a informação final, apresentando assim o gradiente

Figura 4.11 – Procedimento de obtenção do padrão de interferência: a) Padrão de referência, b) Padrão de deformação, e c) Padrão de interferência.



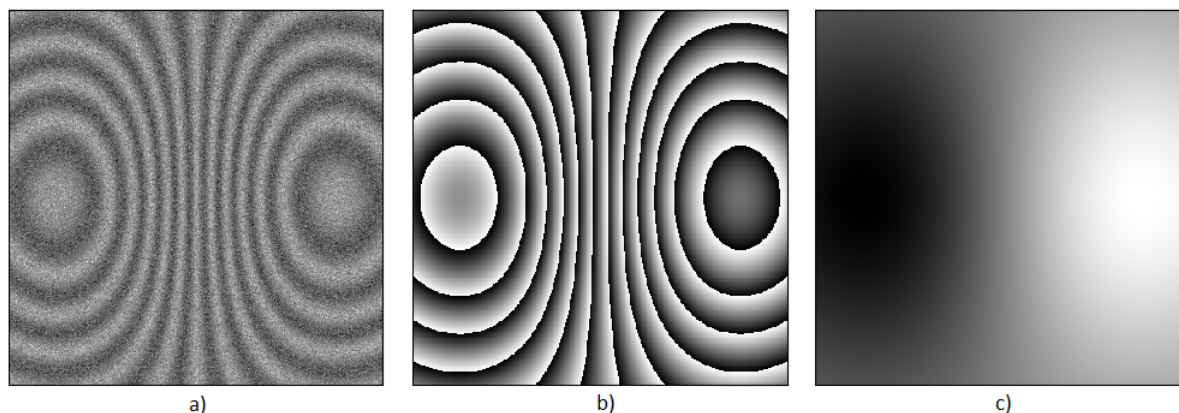
Fonte: Adaptado de Zhao et al. (2018)

da deformação e os respectivos defeitos na superfície. O processo de desempacotamento gera o mapa de fases desempacotadas. O mapa de fases empacotadas e desempacotadas a partir do padrão de interferência é exibido na Figura 4.12. Para obtenção do mapa de fases empacotadas, existem duas principais metodologias: o deslocamento de fase temporal e o deslocamento de fase espacial, que se diferem na quantidade de padrões obtidos e na complexidade dos algoritmos de obtenção do mapa.

4.7.1 Deslocamento de fase temporal

Este método consiste na obtenção de múltiplos padrões experimentais com diferenças de fase conhecidas entre os mesmos, sendo esta defasagem controlada em grande parte das aplicações por um transdutor piezoelétrico conectado a um dos espelhos do arranjo experimental do interferômetro. Este é dito temporal pois se obtém um novo padrão de tempo em tempo, a

Figura 4.12 – Mapas obtidos a partir do padrão de interferência: a) Padrão de interferência, b) Mapa de fases empacotadas, e c) Mapa de fases desempacotadas.



Fonte: Autor

cada modificação da fase no interferômetro pelo piezoelétrico. Este é um dos métodos mais aplicados devido à boa qualidade do mapa de fases obtido e operações simples entre os padrões obtidos para obtenção do mesmo. Neste tipo de deslocamento de fase, o monitoramento é possível em tempo estático ou parcialmente dinâmico. Dentre os métodos existentes, os mais aplicados são os algoritmos de $N+N$, $N+1$ e $N+2$ passos (ZHAO et al., 2018).

Os algoritmos de $N+N$ consistem na obtenção de N padrões antes e N padrões após a aplicação da deformação, obtendo N padrões de interferência com diferenças de fases pré definidas. A quantidade N de padrões mais obtidos são 3, 4 e 5. Em questão de qualidade do mapa obtido, esta aumenta conforme a quantidade de padrões utilizados. Já com relação às operações aritméticas com os padrões para obtenção do mapa, o mais simples é com 4 padrões, e geralmente é o mais aplicado. Este tipo de algoritmo, independente do número de padrões, não apresenta possibilidade de aplicação em tempo real.

Os algoritmos $N+1$ foram criados para adaptar o deslocamento de fase temporal à metodologia de tempo real. Neste algoritmo, é necessário obter inicialmente N padrões com deslocamento de fase temporal sem aplicação de deformação, sendo que o padrão com a deformação é obtido em tempo real e subtraído dos padrões pré-obtidos para extrair o mapa de fases. O mais aplicado é pela obtenção de 4 padrões. Este é um método que gera um mapa de fases de má qualidade, com uma pequena faixa de medição para uma aplicação de tempo real.

Os algoritmos $N+2$ têm como objetivo a melhoria da qualidade do mapa de fases com relação ao $N+1$, mas perde na velocidade de obtenção dos padrões dinâmicos, dado que é necessário, tal como no $N+1$, a obtenção de N padrões antes de deformação e mais dois padrões

com diferenças de fase entre si após, diminuindo o tempo de obtenção do mapa de fases. A configuração mais aplicada é a de obtenção de 4 padrões.

4.7.2 Deslocamento de fase espacial

Este é um método de deslocamento de fase que utiliza apenas um padrão de interferência na obtenção do mapa, sem deslocamentos de fase através de movimentos de um dos espelhos do arranjo experimental. Este é dito espacial pois o mapa de fases é obtido com base nas informações contidas nos pixels do padrão e suas relações entre si. Este é um método que pode tornar o arranjo experimental ou o algoritmo de obtenção mais complexo, se comparado com a metodologia temporal. Existem de três metodologias principais para obtenção do mapa de fases através deste procedimento: o método multicanal, o da inserção de portadora, e o baseado em algoritmos de extração do mapa (ACKEMANN; FIRTH; OPPO, 2009).

O método multicanal consiste na obtenção de todos os padrões com deslocamentos de fases de uma única vez, sem necessidade de modificações temporais no arranjo. Para isto existem duas maneiras principais: através do método de múltiplos detectores e de único detector. No método de múltiplos detectores, são colocadas três ou mais câmeras, cada uma responsável pela obtenção de um padrão com deslocamento de fase definido. Este método, apesar de permitir boa qualidade e processamento em tempo real, é complexo para calibrar, sensível a ruídos externos e possui alto custo (SMYTHE; MOORE, 1984). No método do detector único, utiliza-se uma câmera única, formando-se ao menos três padrões com deslocamento de fases definidos entre si em apenas um padrão final. É tal como uma metodologia de fase temporal, mas ao invés de obter cada padrão por vez, todos os padrões defasados são exibidos em um único padrão de interferência. Numa metodologia de 4 padrões por exemplo, o padrão obtido ficaria dividido em 4 regiões, com cada quadrante exibindo um padrão defasado de seus vizinhos. Esta configuração apresenta melhor robustez a ruídos, mas possui alto custo devido a modificações no arranjo experimental, calibração complexa, e menor qualidade devido à supressão dos padrões deslocados em apenas um padrão, tornando o padrão menos sensível a franjas de frequências mais altas, já que possui menor quantidade de pixels para representação (KRANZ et al., 1998).

O método da frequência portadora, tal como o nome diz, consiste na modificação do arranjo para inserção de uma frequência portadora no padrão de interferência. Esta frequência portadora é capaz de separar a informação de fase no domínio da frequência, possibilitando

a recuperação da mesma através de operações de transformação direta e inversa de Fourier, filtragem e translação. Os arranjos utilizados para a inserção da portadora são o de Mach-Zehnder (PEDRINI; ZOU; TIZIANI, 1996), o de dupla-fenda (BHADURI et al., 2006), e o de Michelson (XIE et al., 2013).

O método baseado em algoritmos de extração não trabalha com modificações no arranjo experimental, utilizando o arranjo padrão para a Shearografia, extraindo informações importantes dos padrões experimentais para gerar o mapa de fases. Estes consistem em análises e operações mais complexas com o padrão de franjas, tais como obtenção de medidas estatísticas, filtragens de informações e ruídos, transformações e operações em outros domínios, extração de mapas de qualidade dos pixels do padrão, extração de mapas de orientação e direção das franjas, uso de algoritmos de otimização, entre outros. Para padrões que apresentam curvas de interferência em forma de caminhos fechados, estes algoritmos se tornam mais complexos e podem exigir maior tempo de processamento, tendo a qualidade visual do mapa de fases processado grande dependência da complexidade do algoritmo utilizado. Dentre os principais algoritmos existentes, as operações mais utilizadas são a transformada janelada de Fourier (KEMAO, 2004), transformada de Wavelet (KROWORZ et al., 2018), análise dos componentes principais (DU et al., 2012), filtros de quadratura (ESTRADA; SERVIN; MARROQUÍN, 2007), transformada espiral (LARKIN; BONE; OLDFIELD, 2001), entre outros. Os estudos atuais na extração do mapa de fases de padrões únicos começam a explorar a utilização de técnicas de aprendizado de máquina, principalmente as redes neurais de aprendizagem profunda, devido à velocidade de processamento, redução na complexidade do algoritmo e qualidade dos resultados obtidos (KANDO et al., 2019).

4.8 Monitoramento estático e dinâmico

O monitoramento estático consiste na obtenção inicial dos padrões experimentais para obtenção futura dos padrões de interferência, de fase empacotada e desempacotada, através de algoritmos ou programas. Como é um tipo de aplicação que necessita um passo a passo, caso os resultados não sejam satisfatórios, é necessária a realização dos ajustes desejados e repetição das etapas anteriores para obtenção dos novos resultados. Dependendo da aplicação e dos ajustes, a obtenção dos resultados ideais pode exigir um grande tempo, devido às inúmeras repetições do ciclo experimental.

O monitoramento dinâmico permite de maneira integrada a obtenção dos padrões experimentais e padrões resultantes em tempo real, permitindo a visualização, identificação de erros e realização de ajustes instantaneamente, além da integração de ferramentas de análise, reduzindo o tempo experimental drasticamente. Mas tal como explicado nas metodologias de obtenção do mapa de fases na seção 4.7, as metodologias que permitem o processamento em tempo real apresentam uma relação praticamente inversa entre o tempo de processamento e a qualidade final dos resultados, sendo os resultados obtidos de maneira estática os que apresentam a melhor qualidade visual.

4.9 Análise qualitativa aplicada à Shearografia em tempo real

A análise qualitativa tem como objetivo o estudo não numérico dos resultados obtidos da execução de um determinado procedimento. Estas análises são baseadas no estudo áudio e/ou visual dos resultados, através de gráficos e tabelas, e comparação com resultados esperados ou pré-estabelecidos, com base na experiência do operador. Diferentemente da análise quantitativa, esta não apresenta comparações numéricas, métricas de desempenho e avaliações estatísticas.

A análise qualitativa da shearografia aplicada em tempo real consiste basicamente na capacidade dos algoritmos utilizados nesta modalidade obterem os mesmos resultados da experimentação estática, gerando resultados condizentes com o que está sendo testado. Por exemplo, na experimentação estática a aplicação de mais ou menos deformação sobre uma superfície de teste gera maior ou menor densidade de franjas de interferência, e conseqüentemente diferentes níveis de deformação apresentados no mapa de fases final. Isto permite, através da análise qualitativa de diversos experimentos em diferentes configurações, a validação desta modalidade de aplicação.

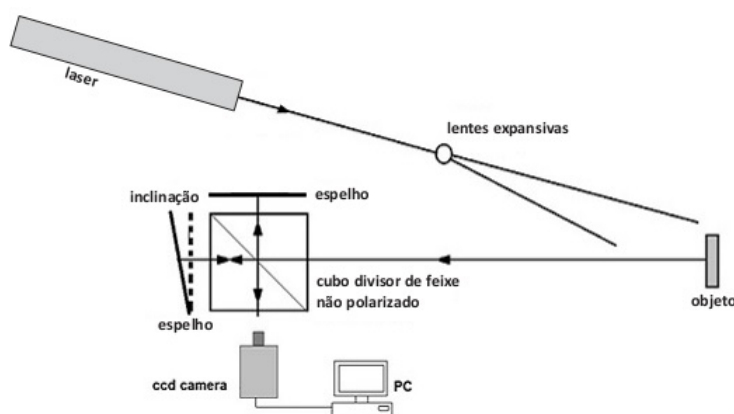
5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Ótica 4 do Centro de Desenvolvimento de Instrumentação Aplicada à Agropecuária - CEDIA, da Universidade Federal de Lavras.

5.1 Configuração experimental

A Figura 5.1 representa a instalação experimental utilizada para proporcionar a deformação das amostras e a aquisição de imagem. Um feixe de laser de He-Ne polarizado linearmente (632.8 nm, 30 mW) foi usado.

Figura 5.1 – Setup *Digital Speckle Shearing Pattern Interferometry*



Fonte: Adaptado de Braga et al. (2016)

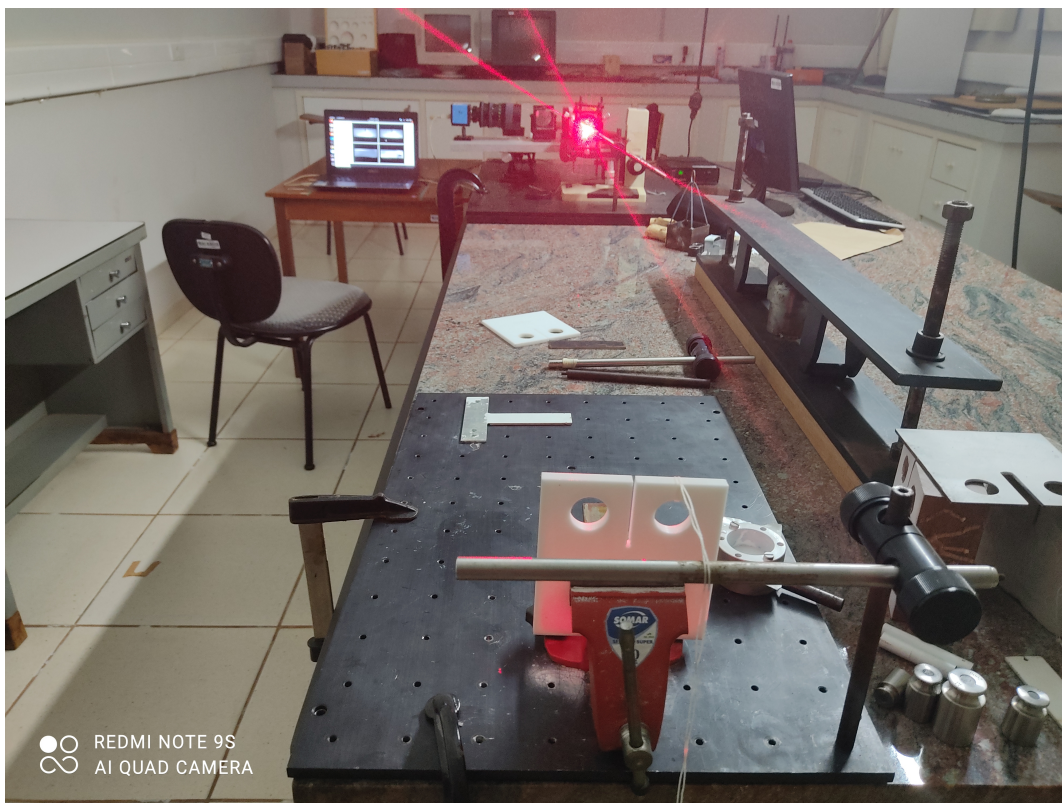
O tamanho do feixe da luz do laser expandido foi de 110 mm de diâmetro sobre a amostra. As imagens foram adquiridas por uma macro (SIGMA), com uma distância focal de 50 mm, abertura numérica de $f/16$, conectada a uma câmera Allied Vision Technologies CCD (AVT Marlin F-145B, o tamanho do pixel de $4,65\mu m$). O tamanho da imagem de speckle no plano foi $12,35\mu m$.

5.1.1 Montagem e calibração

Tendo em vista a grande sensibilidade às perturbações externas, a montagem correta do sistema foi bastante complexa, uma vez que na *shearografia* há diversos fatores que influenciam a sua correta calibração, conforme podemos observar na 5.2. Dentre eles:

- as distâncias entre o cubo e o objeto, entre o cubo e os espelhos, e também entre o objeto e o tubo de *laser*;

Figura 5.2 – Setup *Configuração usada no laboratório*



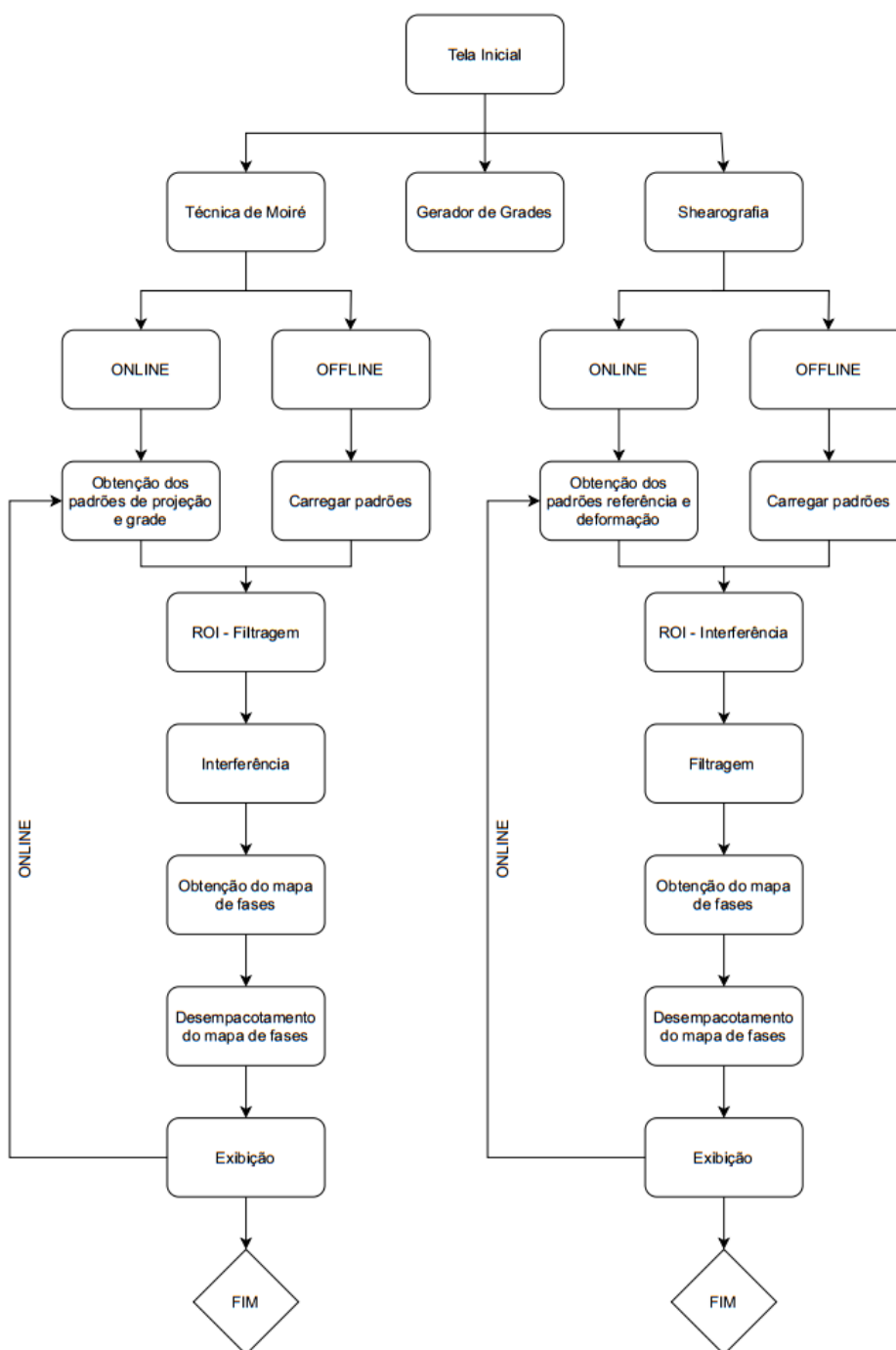
Fonte: Adaptado do autor

- o comprimento do tubo;
- o comprimento de onda do *laser*;
- a resolução da câmera;
- a iluminação, foco e nitidez do objeto;
- o tamanho e o brilho do *speckle*;
- a inclinação do espelho;
- a aplicação da carga, dentre outros.

5.2 Configurações da IHM

A apresenta o fluxograma sequencial de funcionamento da IHM e suas respectivas etapas. Para a realização das análises em tempo real de Shearografia, foi utilizada uma IHM desenvolvida no CEDIA, para fins de análise com luz estruturada e luz coerente, que é o caso deste trabalho.

Figura 5.3 – Setup Fluxograma de funcionamento da IHM



Fonte: Adaptado do autor

Para a realização dos testes em tempo real foi utilizado a opção de Shearografia, seguindo as seguintes etapas:

- Tela Inicial - Toda primeira execução da IHM apresentará uma tela inicial que permitirá ao usuário a escolha da técnica óptica que desejará utilizar, no caso a shearografia ou moiré;

- Tipo de processamento: dinâmico e estático - No processamento online, o padrão de referência é definido pelo usuário e este servirá para interferência com o padrão de deformação da superfície obtido pela câmera de forma contínua;
- Obtenção dos padrões de interferência - Os procedimentos para obtenção dos padrões de interferência de ambas técnicas em conjunto com as equações envolvidas são demonstrados no apêndice A;
- Adaptação dos padrões - A adaptação dos padrões consiste nas operações de definição da região de interesse (ROI), redimensionamento e filtragem da imagem/padrão de entrada;
- Obtenção do mapa de fases - consiste na aplicação dos algoritmos pesquisados e escolhidos para o processamento das franjas de interferência abertas, fechadas ou mistas, com base na velocidade de processamento e qualidade do mapa de fases. Na shearografia foi feita a implementação de algoritmos baseados no processamento de apenas um padrão de interferência, utilizando deslocamento de fase espacial, além da utilização da transformada de Hilbert para padrões que apresentem apenas franjas lineares unidirecionais, e a técnica da obtenção rápida de fase para franjas fechadas e mistas, ambos detalhados nos apêndices B e C;
- Desempacotamento do mapa de fases - Os mapas de fases obtidos em ambas técnicas ópticas são similares, o que permite a utilização de um único algoritmo de desempacotamento para ambas;
- Exibição - Os resultados das etapas descritas acima serão exibidos nas janelas das interfaces de ambas as técnicas ópticas. Serão exibidas quatro janelas na interface principal e suas respectivas exibições serão definidas da seguinte maneira;

5.2.1 Teste 1 - Chapa acrílica

Conforme figuras 5.4 e 5.5 é possível observar o *setup* utilizado no trabalho de Almeida et al. (2016) onde está posicionado a câmera, juntamente com o interferômetro de Mychelson e também o corpo de prova produzido em acrílico, onde foram verificados os testes de simulação de processo de fratura, utilizando o método de modo I utilizado para teste de fratura, conforme (MASTERS, 1987).

Figura 5.4 – Setup para o teste 1



Fonte: Dados do autor

Figura 5.5 – Setup iluminado para o teste 1

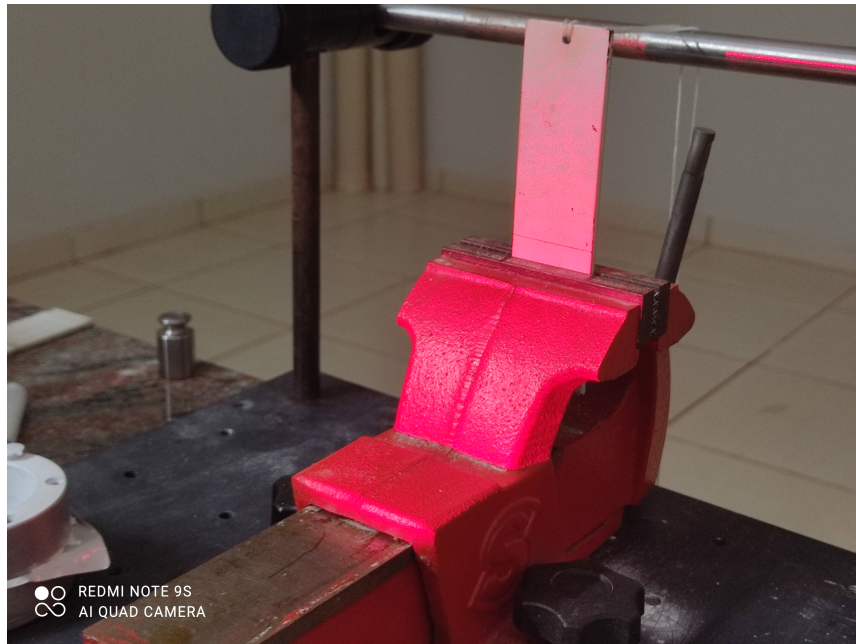


Fonte: Dados do autor

5.2.2 Teste 2 - Chapa de aço para teste de deformação

Conforme figuras 5.6 e 5.7 observa-se a montagem do equipamento com a finalidade de verificar o processo de deformação da chapa em aço, no sentido fora do plano.

Figura 5.6 – Setup para o teste 2



Fonte: Dados do autor

Figura 5.7 – Setup para o teste 2



Fonte: Dados do autor

5.3 Monitoramento em tempo real

Foram engastados os corpos de prova em aço, acrílico, nylon e madeira, conforme citado anteriormente nesta sessão e por meio da IHM desenvolvida no CEDIA para fins de análises utilizando luz coerente.

Para iniciar as análises foi necessário definir na IHM qual técnica será utilizada, Moiré ou shearografia, sendo no caso deste trabalho utilizado esta última. Após selecionarmos a técnica temos uma visão geral da IHM, conforme figura 5.8

Figura 5.8 – Interface da IHM utilizada para análise em tempo real



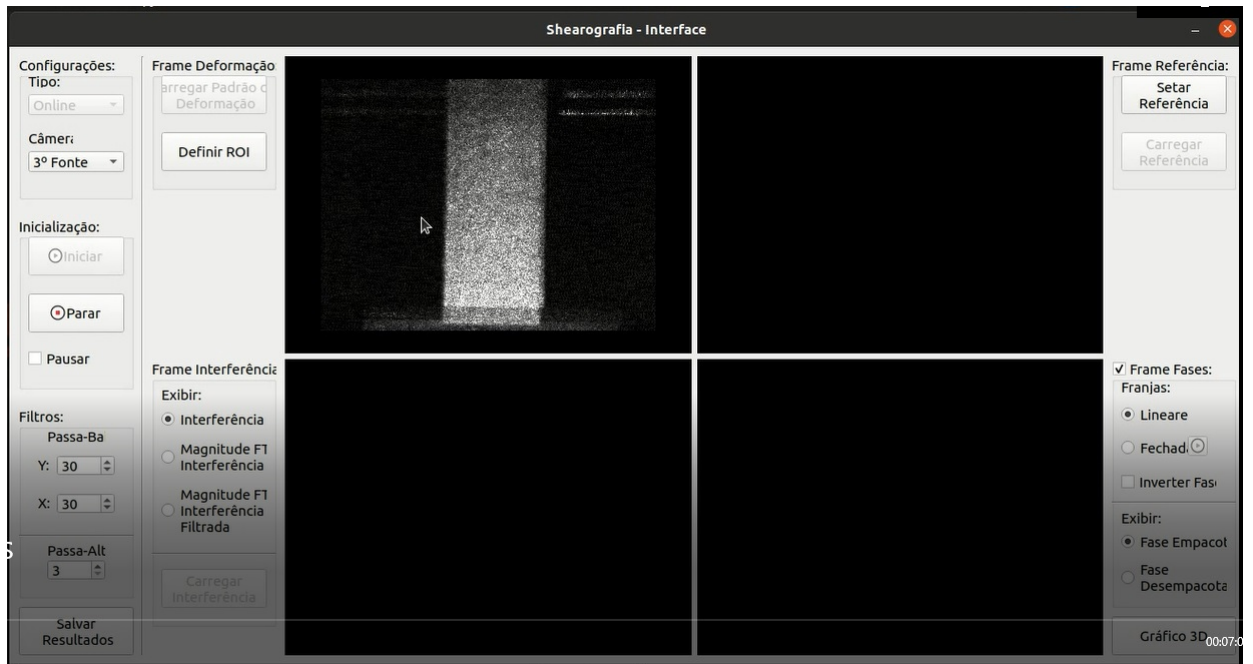
Fonte: Dados do autor

Após selecionada a fonte de imagem, pode-se observar a imagem de referência no canto superior esquerdo, fig.5.9 e logo em seguida selecionados a área de interesse (ROI), conforme observado na figura 5.10

O passo seguinte foi gerar uma imagem de referência (sem deformação) e a seguir foi possível observar a imagem em tempo real, observado na fig. 5.11 ainda sem as franjas de interferência, pois estas serão visíveis a partir da deformação aplicada nos corpos de prova.

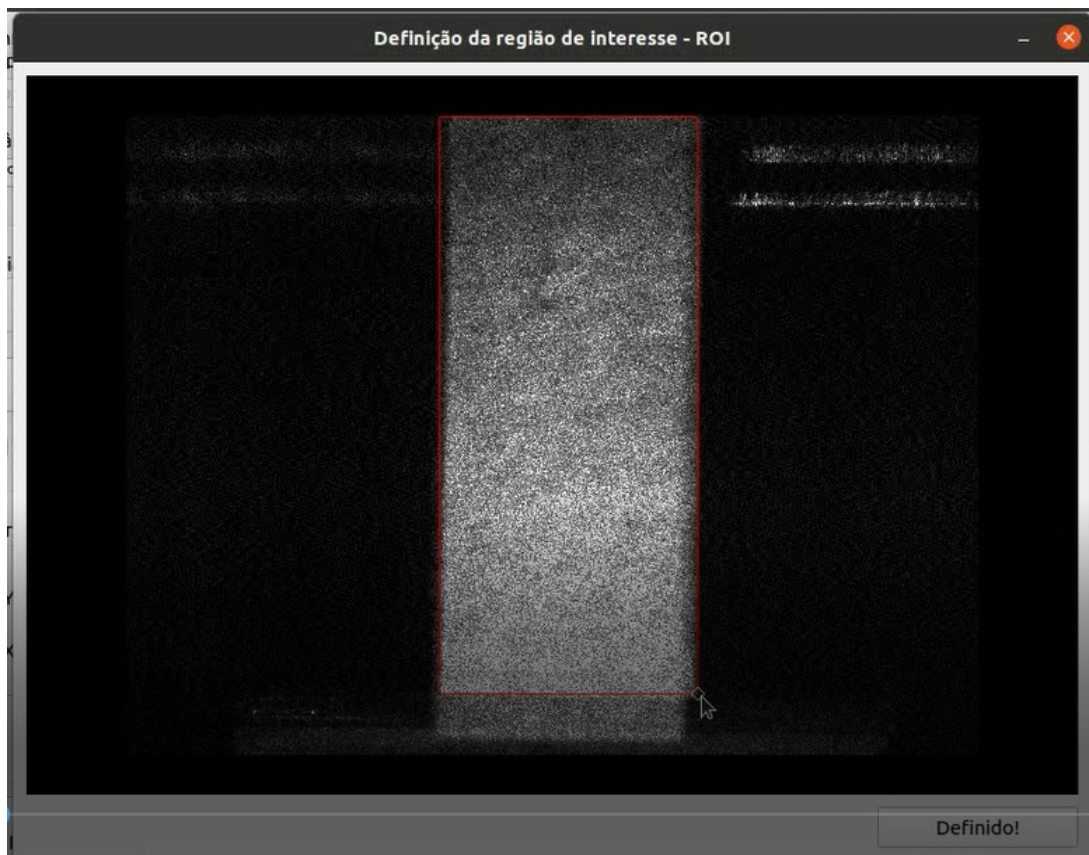
Para a obtenção das franjas, primeiramente se define como imagem de referência aquela sem a aplicação de cargas (imagem no canto superior direito). Essa imagem é chamada de *Reference Image*. Logo após, posiciona-se o peso sobre o suporte em forma de cesta acoplado à viga por meio de uma linha amarrada em sua extremidade livre, gerando um deslocamento devido à aplicação da carga. A imagem no canto superior esquerdo (Online Image) é a imagem em tempo real com a aplicação da carga. As duas imagens no canto inferior observadas na figura 5.11 é a diferença entre a imagem online e a de referência, sendo que a imagem no canto inferior direito da figura 5.11 ainda passa por um filtro gaussiano de raio especificado na janela de configurações no canto esquerdo da tela.

Figura 5.9 – Interface da IHM utilizada para análise em tempo real



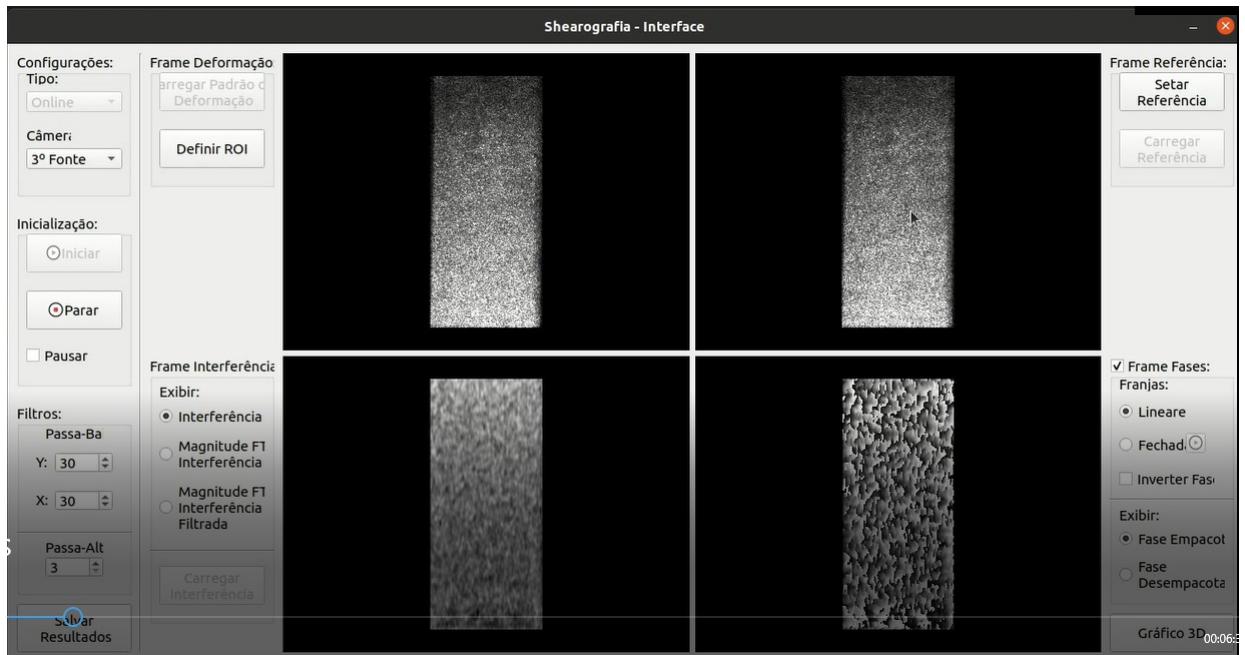
Fonte: Dados do autor

Figura 5.10 – Interface da IHM utilizada para análise em tempo real



Fonte: Dados do autor

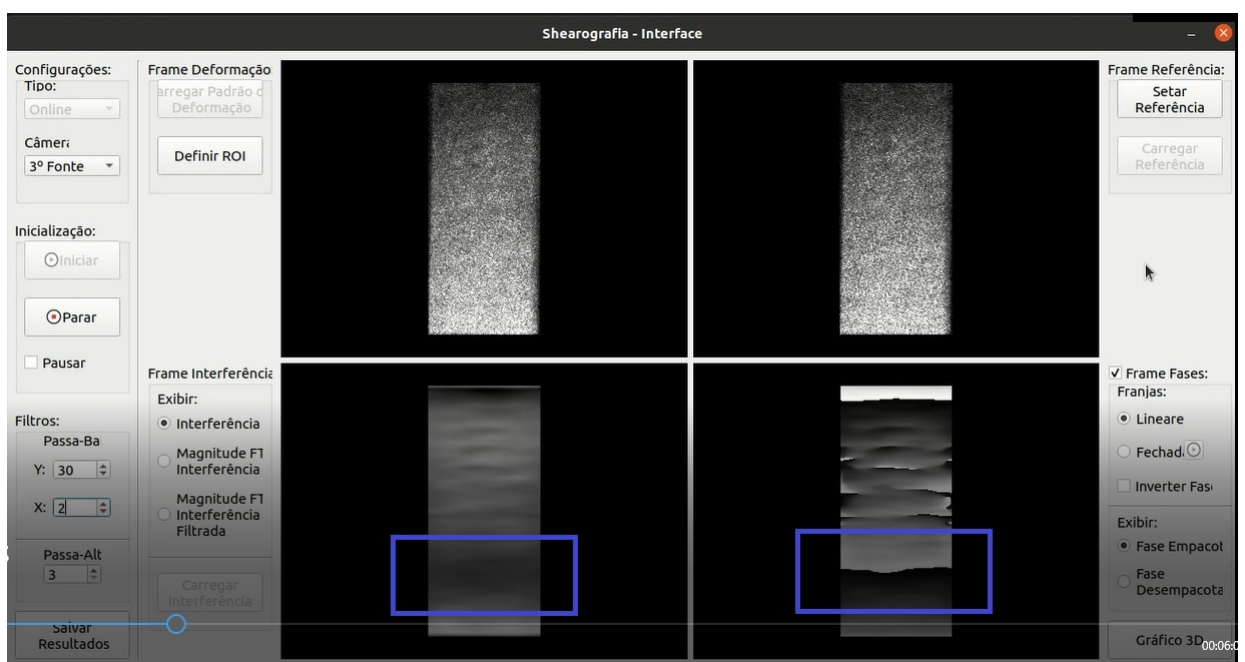
Figura 5.11 – Interface da IHM utilizada para análise em tempo real



Fonte: Dados do autor

Efetuada a subtração das imagens, as franjas de interferência apresentadas ao longo do corpo de prova aparecem devido à correlação de *speckle* e representam a derivada dos campos de deslocamentos, ou seja, a variação da deformação superficial ocorrida no corpo de prova, conforme pode-se observar na figura 5.12 dos testes preliminares realizados.

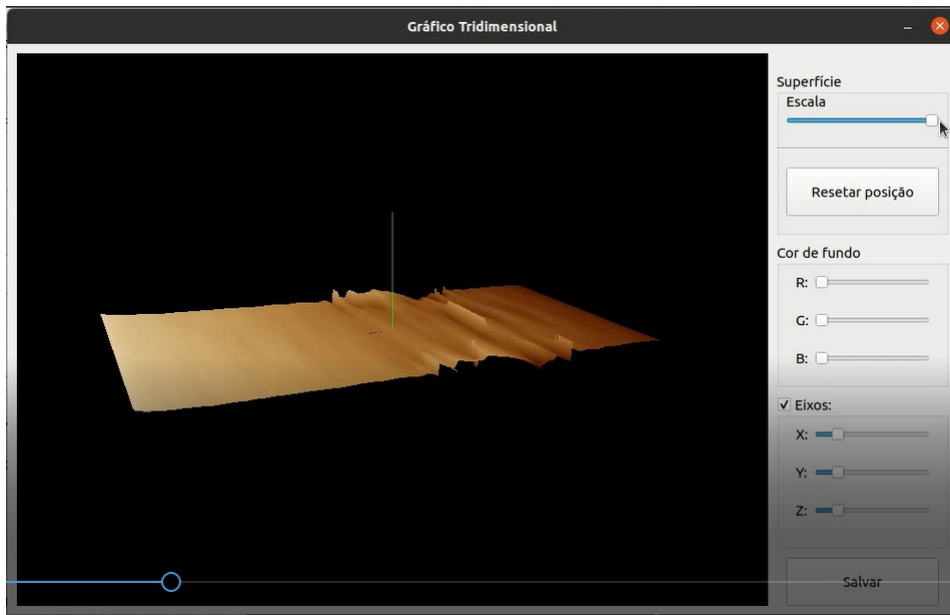
Figura 5.12 – Interface da IHM utilizada para análise em tempo real



Fonte: Dados do autor

Após a etapa inicial de configuração, seleção de imagem, definição de ROI e filtros, é possível gerar um mapa em 3D da deformação e ir acompanhar em tempo real (motivo deste trabalho) a deformação, como é possível observar na figura 5.13.

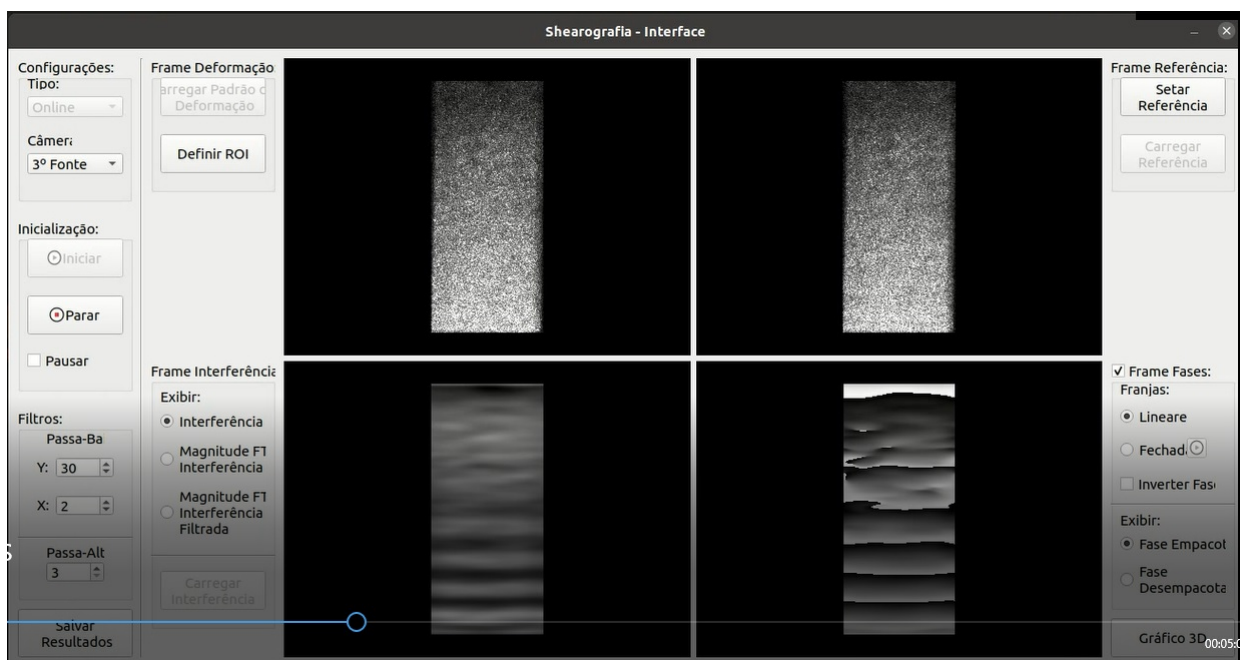
Figura 5.13 – Interface da IHM utilizada para análise em tempo real



Fonte: Dados do autor

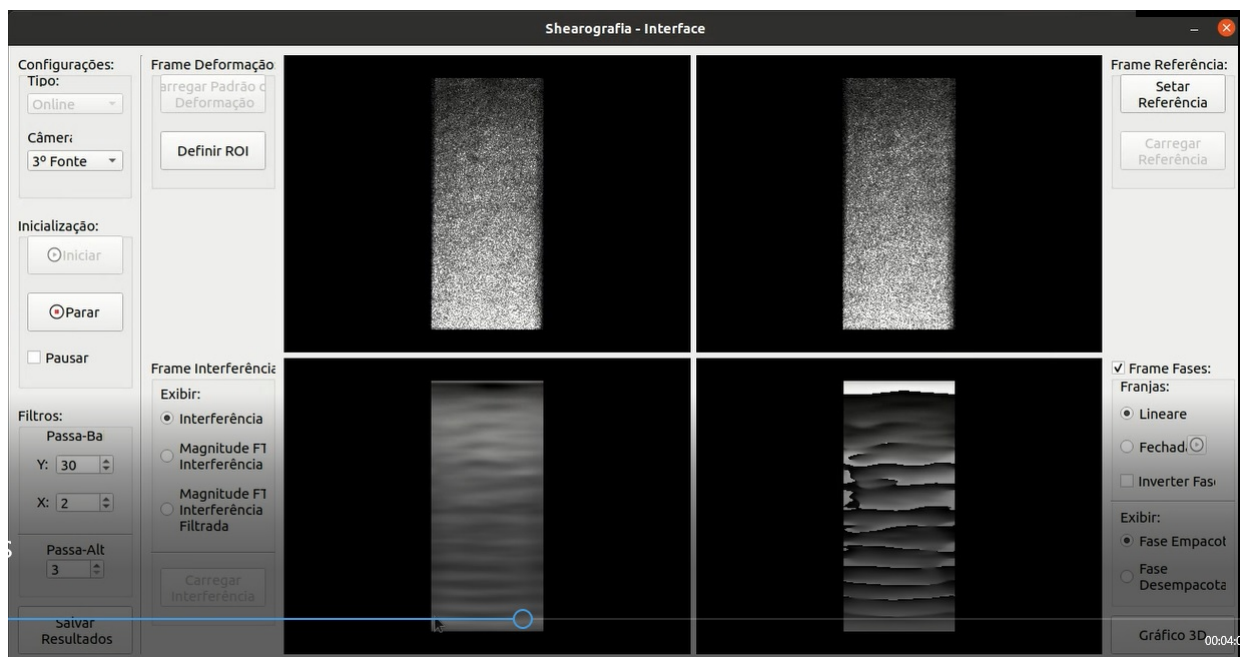
A medida em que a deformação aumenta, é possível observar uma quantidade maior de franjas de interferência e uma modificação no mapa em 3D, conforme figuras 5.14 e 5.15.

Figura 5.14 – Interface da IHM utilizada para análise em tempo real



Fonte: Dados do autor

Figura 5.15 – Interface da IHM utilizada para análise em tempo real



Fonte: Dados do autor

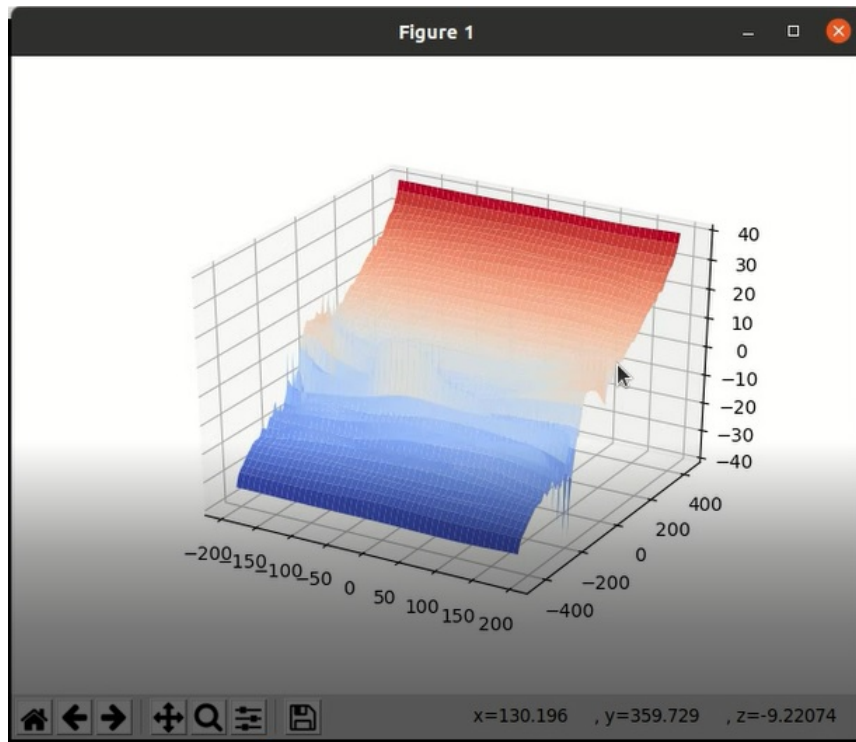
Ao fim desta última etapa foi possível ainda gerar um gráfico de deformação em 3D, indicando onde houve maior e menor deformação ao longo do corpo de prova, como se observa nas figuras 5.16 e 5.17. Este gráfico de deformação 3D gerado pela interface não permite a edição dos valores e texto dos eixos, apenas a modificação da proximidade e posição da superfície. Na posição apresentada nos gráficos exibidos neste trabalho, os eixos x e y da base da superfície representam a altura e largura da imagem em pixels do mapa de deformação, e o eixo z o valor dos pixels em escala de cinza da imagem, sendo os valores maiores mais avermelhados e os valores menores mais azulados. Além disto, a interface centraliza a superfície, fazendo com que apareçam valores negativos nos eixos. Por exemplo, na figura 5.16 o mapa possui valores de altura e largura de 800 por 400 pixels, e são apresentados de -400 a 400 e -200 a 200, respectivamente.

Todo este processo se repete à medida que troca-se os corpos de prova, conforme apresentado na seção dos resultados e discussões.

Para alcançar os resultados esperados, foram definidas as seguintes atividades:

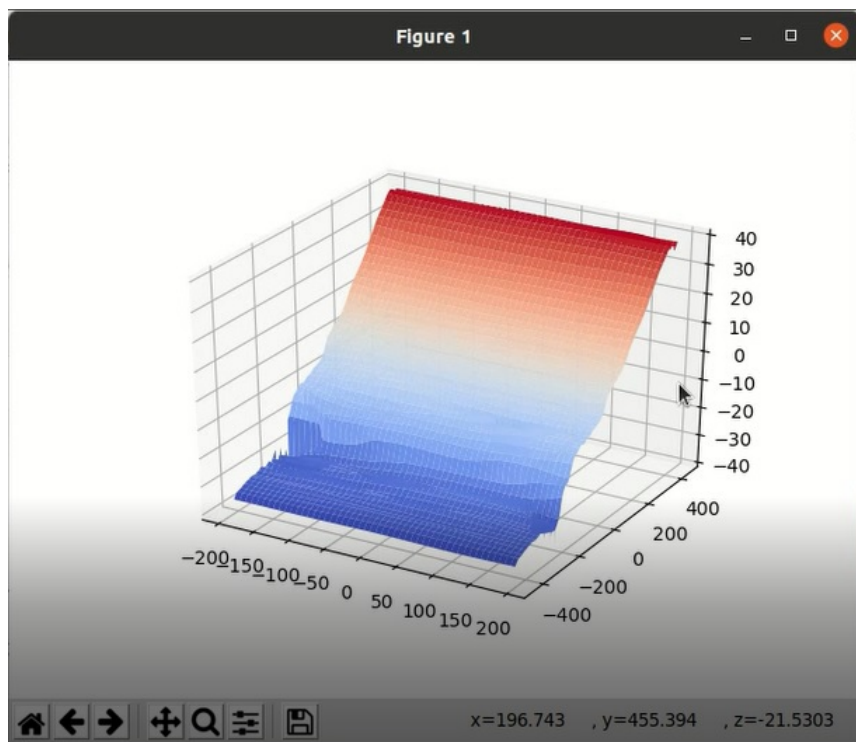
1. Validação da técnica por meio de comparações estáticas;
2. Teste comparativo ao trabalho realizado por Almeida et al. (2016) utilizando chapa em aço com flexão no sentido fora do plano;

Figura 5.16 – Gráfico 3D da deformação do corpo de prova



Fonte: Dados do autor

Figura 5.17 – Gráfico 3D da deformação do corpo de prova



Fonte: Dados do autor

3. Análise comparativa com a curva de deformação por meio de saída em tons de cinza obtidas pela IHM;

4. Teste de deformação em chapa de acrílico no sentido fora do plano;
5. Teste de deformação em chapa de madeira no sentido fora do plano;
6. Teste de aplicabilidade dentro do campo de atuação da Engenharia Agrícola, utilizando varetas de colheitadeiras mecanizada;
7. Teste de aplicabilidade utilizando borracha da haste puxavante;

6 RESULTADOS

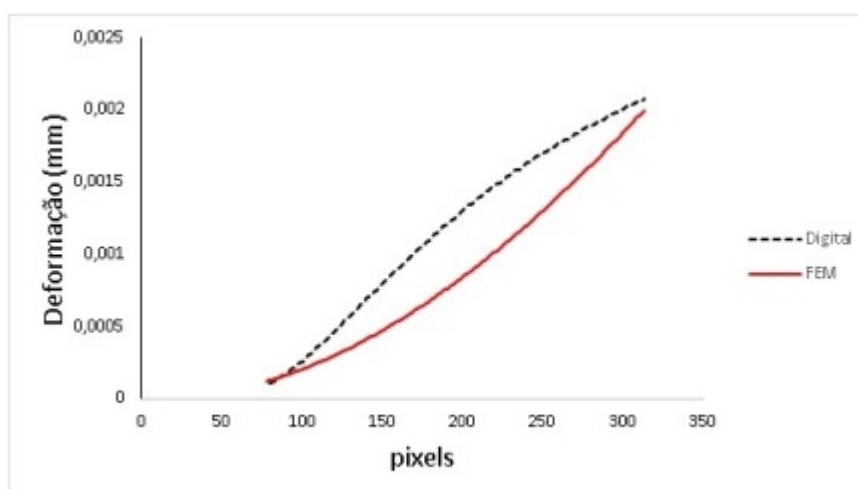
6.1 Validação da técnica por meio de comparações estáticas

Este trabalho teve o intuito de mostrar a possibilidade de se fazer análise qualitativa, em tempo real, da deformação de sólidos, utilizando a técnica de Shearografia.

O primeiro passo na seção de resultados foi validar os dados obtidos como saída da IHM desenvolvida para análise em tempo real, com os dados obtidos no trabalho de Almeida et al. (2016). Este trabalho citado em questão, utilizou-se de várias comparações como método de validação.

Para esta parte da análise foi feita uma comparação entre os dados obtidos com a técnica de *digital speckle shearing pattern interferometry* utilizando um *Phase Shift Digital* para fornecer a fase de deslocamento, quando uma carga de 45 g foi utilizada em uma viga em balanço com dimensões de 30 x 100 mm, feita de aço estrutural A-36 e com módulo de Young de $E = 200\text{GPa}$, e um coeficiente de Poisson 0,32 (a mesma chapa utilizada neste presente trabalho) e uma modelagem feita por meio do método de FEM (Elementos Finitos), conforme fig. 6.1

Figura 6.1 – Comparação Digital x FEM 45g

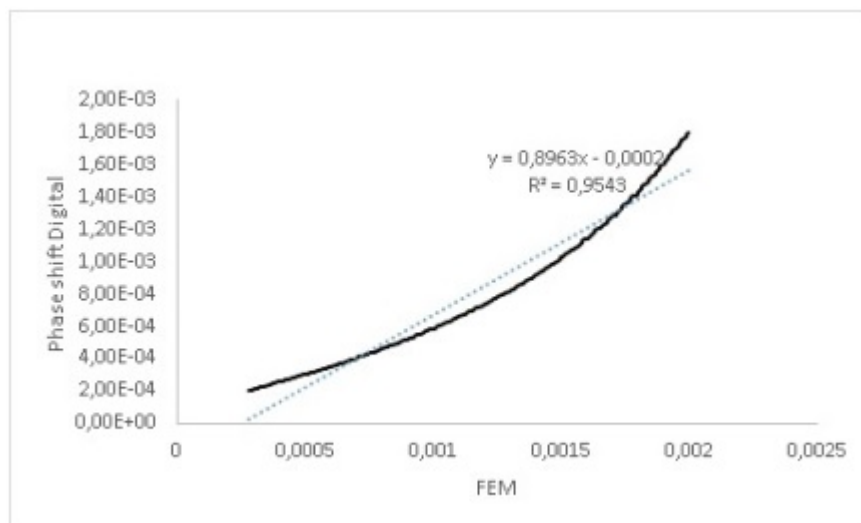


Fonte: (ALMEIDA et al., 2016)

Com base nesta comparação notou-se uma proximidade relativamente grande entre as curvas, o que sugere que a técnica de *phase shift digital* pode ser utilizada como método proposto pelo trabalho. Na figura 6.2 pode-se analisar os resultados confrontando-os com uma função Linear, obtendo um valor para $R^2 = 0,954$, conforme fig. 6.2

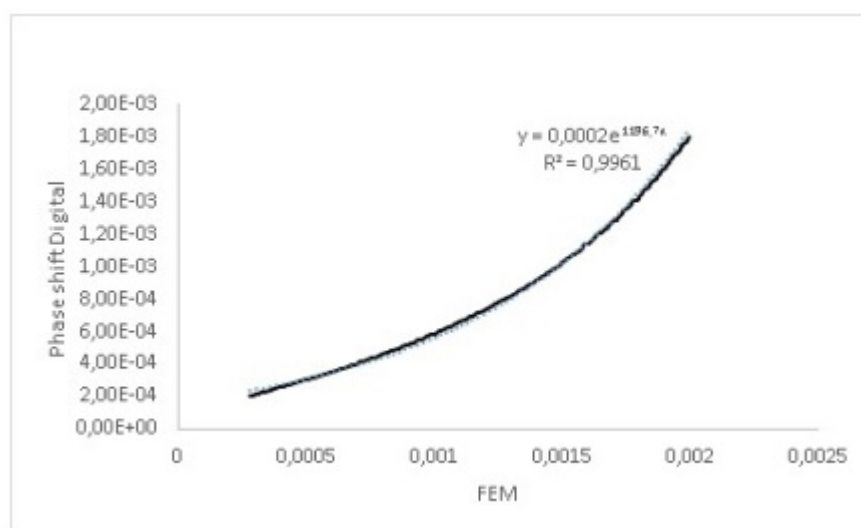
Já na figura 6.3 pode-se analisar os resultados confrontando-os com uma função Exponencial, obtendo um valor para $R^2 = 0,996$.

Figura 6.2 – Comparação do Phase shift digital x FEM, utilizando uma função Linear



Fonte: (ALMEIDA et al., 2016)

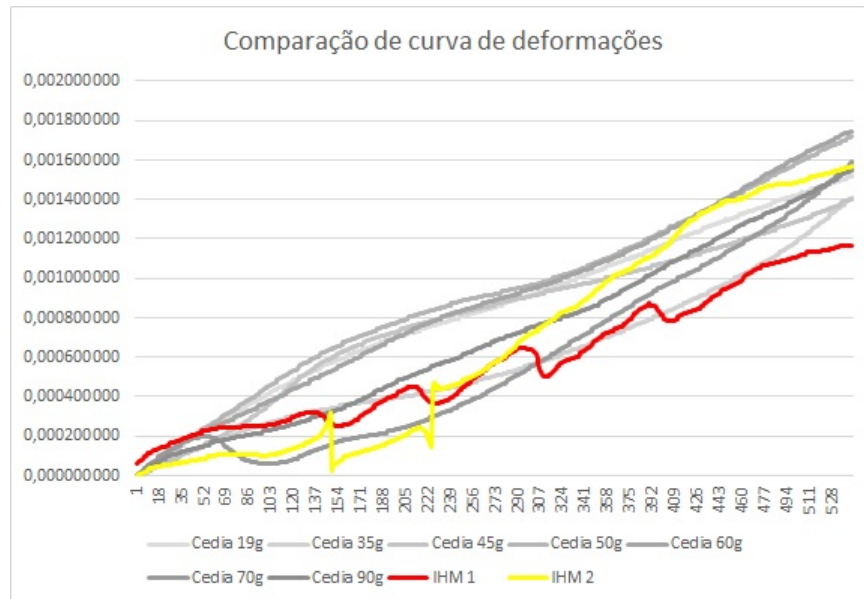
Figura 6.3 – Comparação do Phase shift digital x FEM, utilizando uma função exponencial



Fonte: (ALMEIDA et al., 2016)

A última etapa desta validação é a comparação direta entre os valores obtidos por Almeida et al. (2016), citados anteriormente, com os valores obtidos pela IHM nos testes realizados no laboratório 4 do CEDIA. Como podemos-se observar, foram utilizados pesos entre 15g à 90g, gerando assim vários momentos de deformação, que colocados em mesma escala, ficaram próximos, deixando claro assim que a técnica utilizada neste trabalho, por meio de uma IHM de monitoramento em tempo real, pode ser utilizada para este tipo de análise, fig. 6.4.

Figura 6.4 – Comparação dos valores obtidos por Almeida et al. (2016) e os valores obtidos pela IHM utilizada neste trabalho

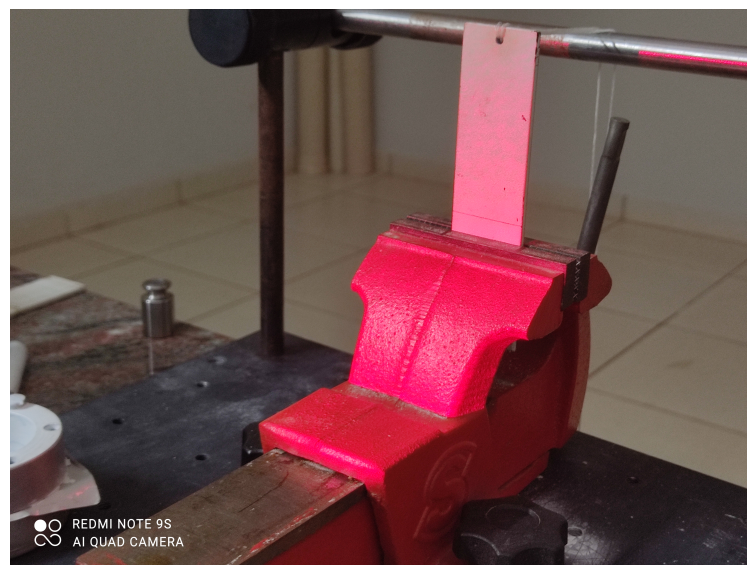


Fonte: Dados do autor

6.2 Teste comparativo ao trabalho realizado por Almeida et al. (2016) utilizando chapa em aço com flexão no sentido fora do plano

Conforme mencionado na metodologia, foram realizados testes em chapas de aço com o intuito de observar em tempo real a deformação da mesma.

Figura 6.5 – Teste 1 - Chapa em aço



Fonte: Dados da pesquisa

Conforme é possível observar na figura 6.5 o objeto fixado em uma de suas extremidades e sendo feita flexões através dos pesos de 35g e 45g, inseridos em uma cesta na sua outra extremidade gerando assim deformações variadas, figura 6.6

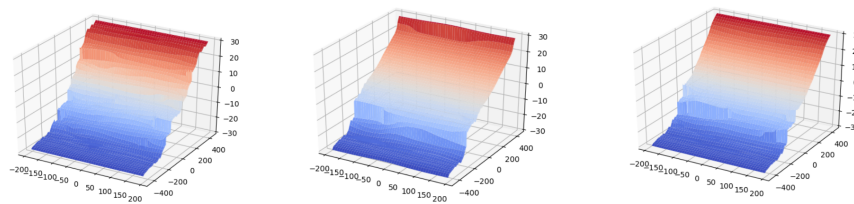
Figura 6.6 – Teste 1 - Chapa em aço



Fonte: Dados da pesquisa

Todo processo de geração das imagens estão descritos na metodologia, sendo resultado deste processamento as imagens de deformação em tempo real, conforme figura 6.7.

Figura 6.7 – Teste 1 - Chapa em aço

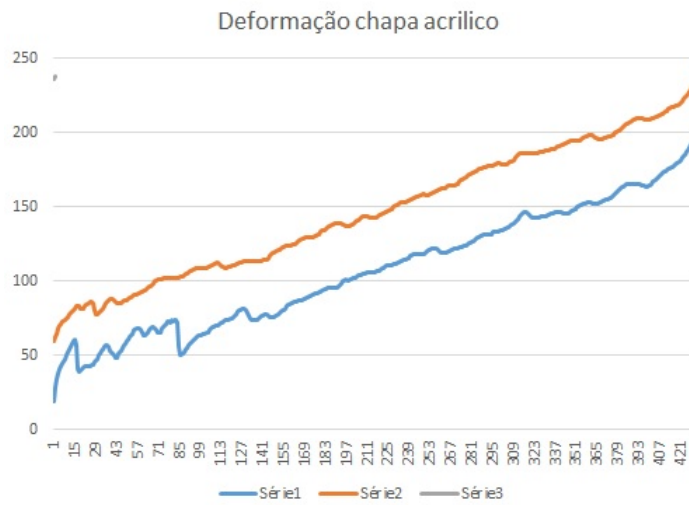


Fonte: Dados da pesquisa

6.3 Análise comparativa com a curva de deformação por meio de saída em tons de cinza obtidas pela IHM

A primeira parte dos resultados obtidos consta em apresentar um gráfico obtido em tons de cinza, contendo valores de 0 à 254, onde é possível observar a curva de deformação, em 2D do objeto em questão.

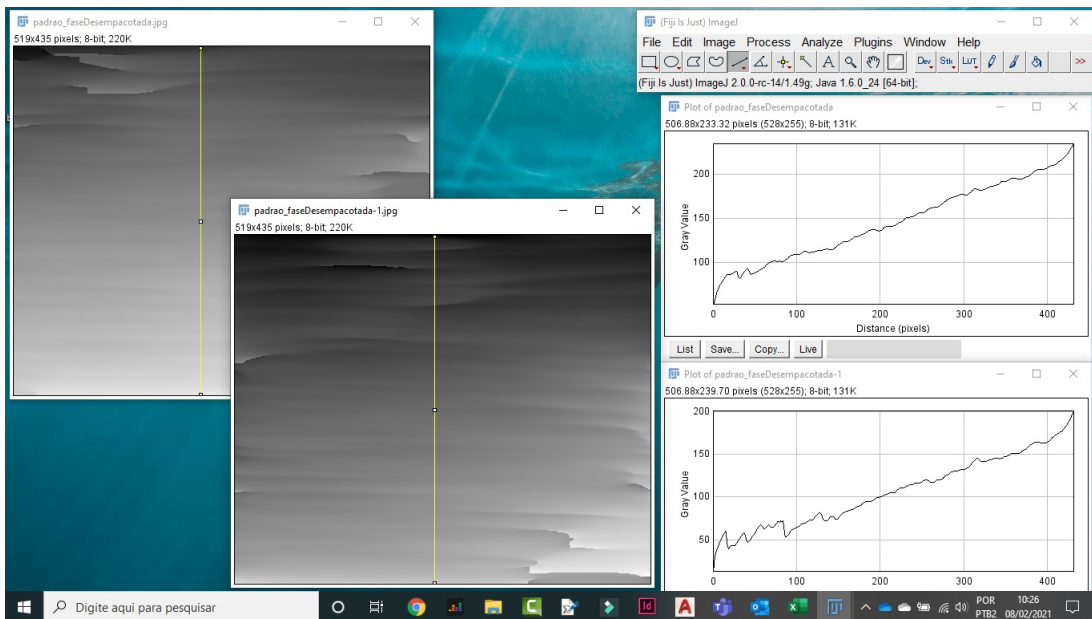
Figura 6.8 – Gráfico em tons de cinza mostrando a curva de deformação da chapa em acrílico



Fonte: Dados da pesquisa

Por meio da figura 6.8, fica perceptível que a IHM consegue obter a deformação em vários momentos da análise online. Esta imagem foi obtida a partir da imagem gerada pela própria IHM, conforme mostra a figura 6.9 e utilizando-se do software FIJI (imageJ) para quantificação dos tons de cinza da deformação.

Figura 6.9 – Extração dos valores em tons de cinza e geração do gráfico em 2D

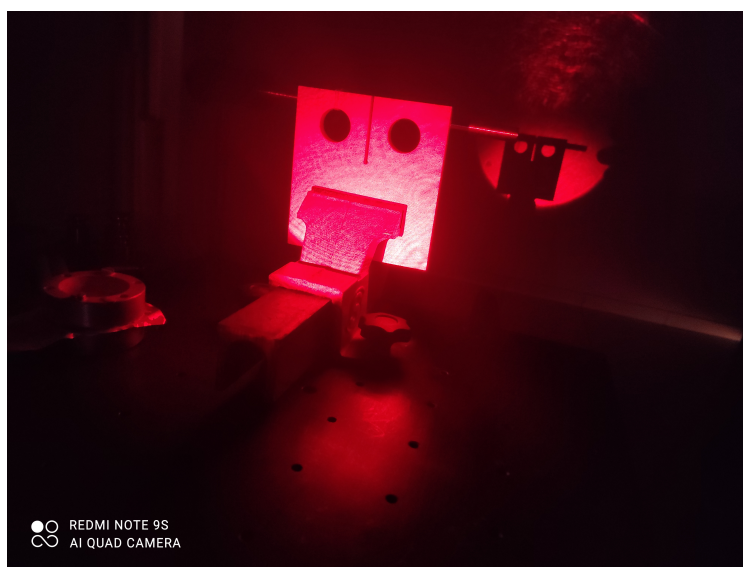


Fonte: Dados da pesquisa

6.4 Teste de deformação em chapa de acrílico no sentido fora do plano

O segundo teste realizado foi o de flexão na chapa de acrílico. A técnica de shearografia possui limitações de perda de correlação das franjas de interferência a partir de determinada deformação, o que nos fez realizar os testes mostrando a deformação no sentido fora do plano até determinado ponto.

Figura 6.10 – Teste 2 - Chapa em acrílico



Fonte: Dados da pesquisa

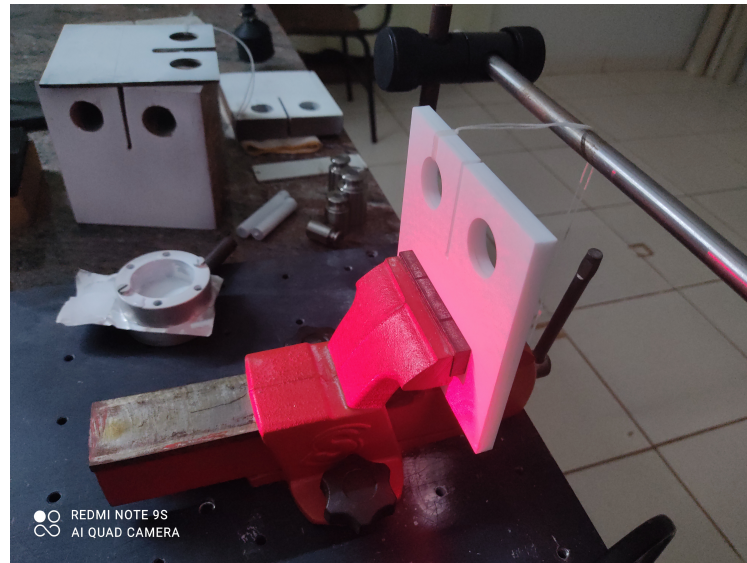
Conforme é possível observar na figura 6.10 o objeto fixado em uma de suas extremidades e sendo feita flexões através dos pesos 15g e 35g inseridos em uma cesta na sua outra extremidade gerando assim deformações variadas, figura 6.11

Todo processo de geração das imagens está descritos na metodologia, sendo resultado deste processamento as imagens de deformação em tempo real, conforme apresentado na figura 6.12.

6.5 Teste de deformação em chapa de madeira no sentido fora do plano

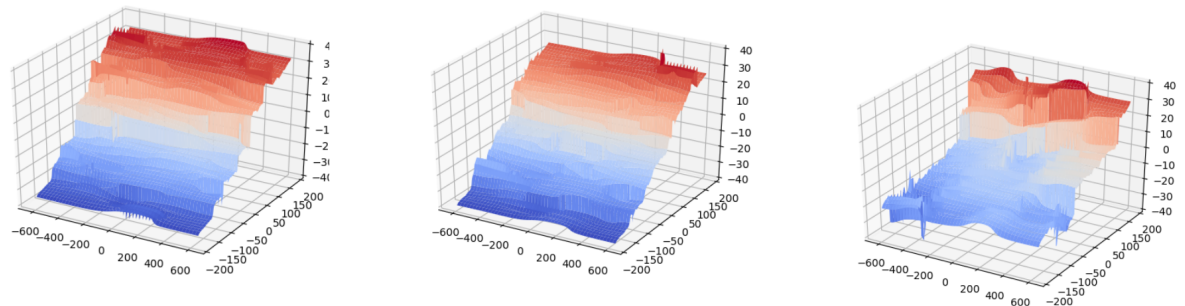
O terceiro teste realizado foi o de flexão na chapa de madeira. A técnica de shearografia possui limitações de perda de correlação das franjas de interferência a partir de determinada deformação, o que nos fez realizar os testes mostrando a deformação no sentido fora do plano até determinado ponto, conforme figura 6.13.

Figura 6.11 – Teste 2 - Chapa em acrílico



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 6.12 – Teste 2 - Chapa em acrílico



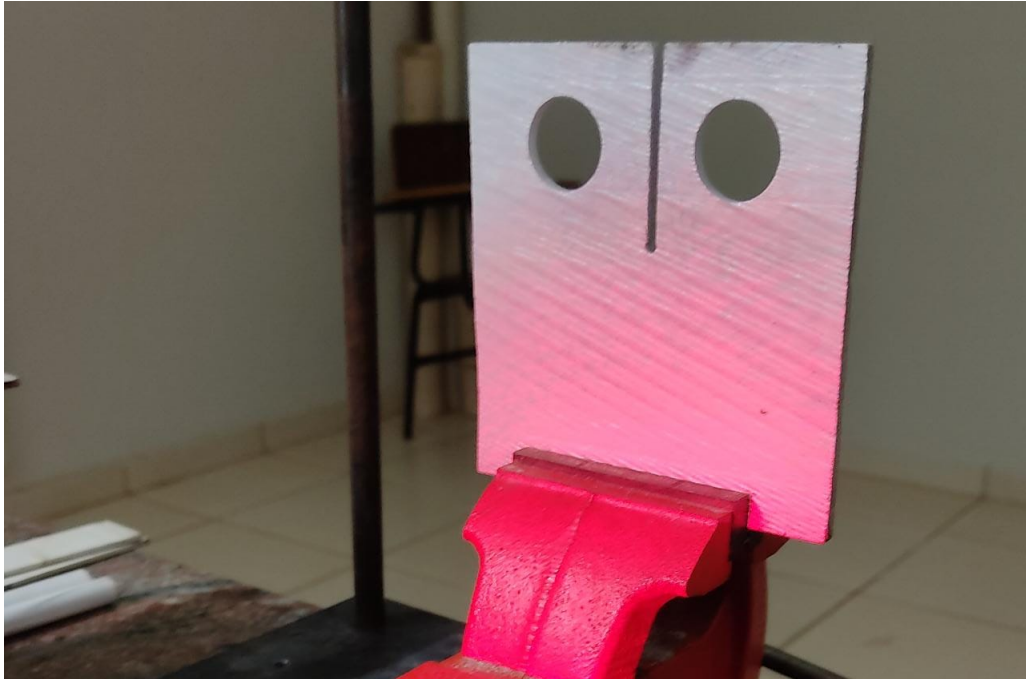
Fonte: Dados da pesquisa

Todo processo de geração das imagens está descritos na metodologia, sendo resultado deste processamento as imagens de deformação em tempo real, conforme apresentado na figura 6.14.

6.6 Teste de aplicabilidade dentro do campo de atuação da Engenharia Agrícola, utilizando varetas de colhedoras mecânicas.

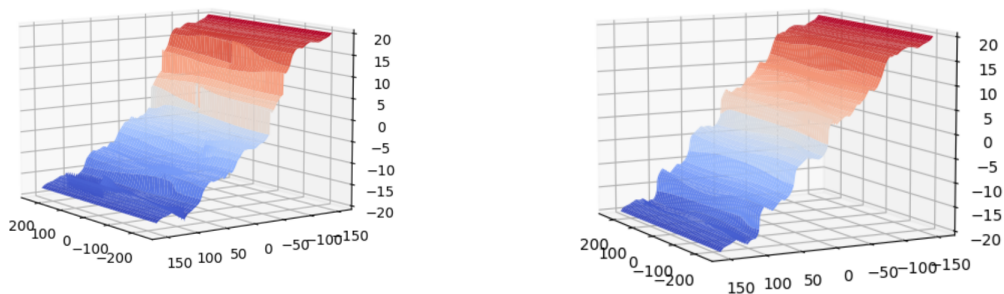
O terceiro teste realizado teve o intuito de mostrar dentro do campo de atuação da Engenharia Agrícola a aplicação de análise online. Com a técnica e a IHM desenvolvidas foi possível ver a deformação em tempo real de uma vareta de derrigadeira, sendo esta uma haste derrigadora que faz parte do sistema de derriga das colhedoras de café, contendo uma mistura

Figura 6.13 – Teste 3 - Chapa em madeira



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 6.14 – Teste 3 - Chapa em madeira



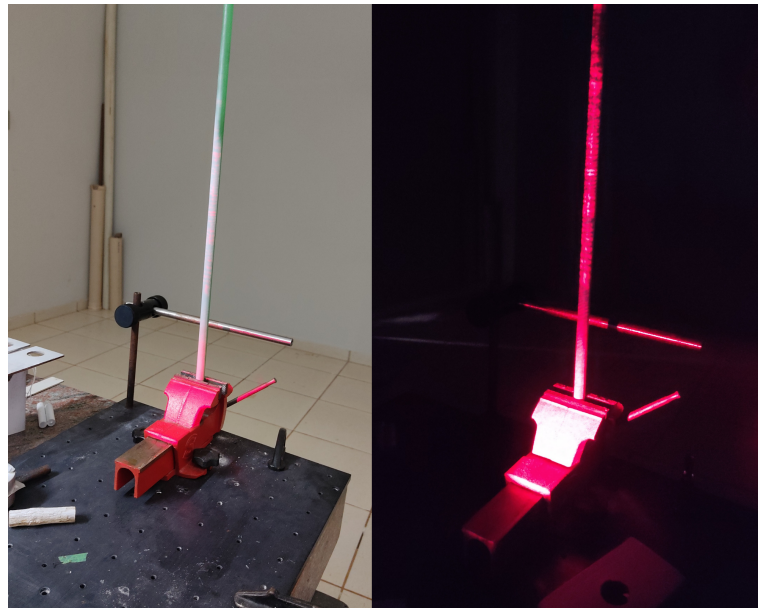
Fonte: Dados da pesquisa

de compósito que trabalha com vibração forçada, sendo engastada em uma ponta e o restante sobre flexão causada pela vibração. Conforme figura 6.15

Como resultado desta análise pode-se observar os diferentes estágios de deformação da vareta, simulando o deslocamento da mesma em sua aplicação real, conforme figura 6.16

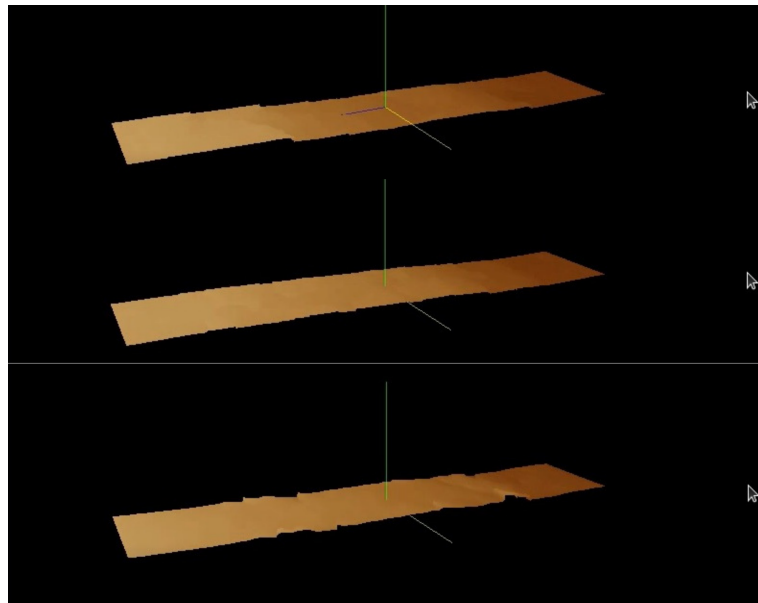
Por fim observamos também a saída em gráfico de deformação em 3D da vareta, permitindo assim observar os pontos onde há maior concentração de tensão, e conseqüentemente deformação, conforme figura 6.17

Figura 6.15 – Teste 3 - Vareta de derriçadeira



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 6.16 – Teste 3 - Vareta de derriçadeira

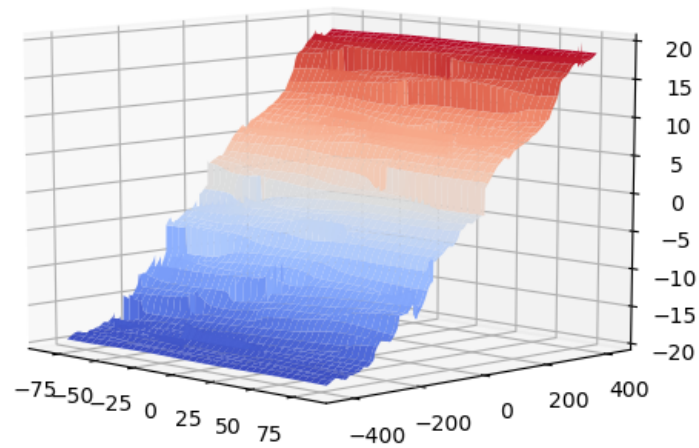


Fonte: Dados da pesquisa

6.7 Teste de aplicabilidade utilizando borracha da haste puxavante

O quarto teste realizado teve o intuito também de mostrar dentro do campo de atuação da Engenharia Agrícola a aplicação de análise online. Com a técnica e a IHM desenvolvida foi possível ver a deformação em tempo real de uma borracha fixada na junção da haste puxavante com eixo excêntrico em máquinas vibratórias estacionárias, como exemplo a bica de jogo (máquina que separa impurezas como pedra, madeira e folha dos frutos de café), sendo esta um

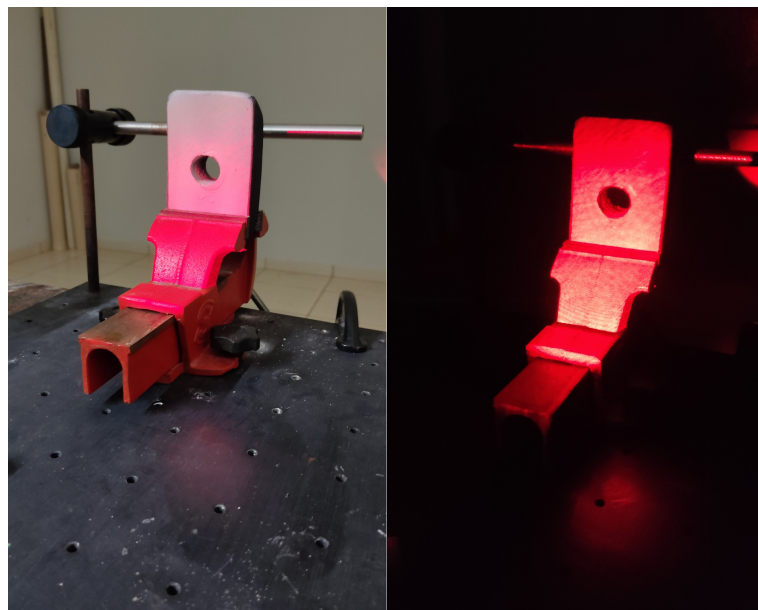
Figura 6.17 – Teste 3 - Vareta de derrigadeira



Fonte: Dados da pesquisa

polímero, trabalha com tração, compressão e um pouco de flexão no meio. É usada p amortecer a força do puxavante ao eixo, conforme figura 6.18

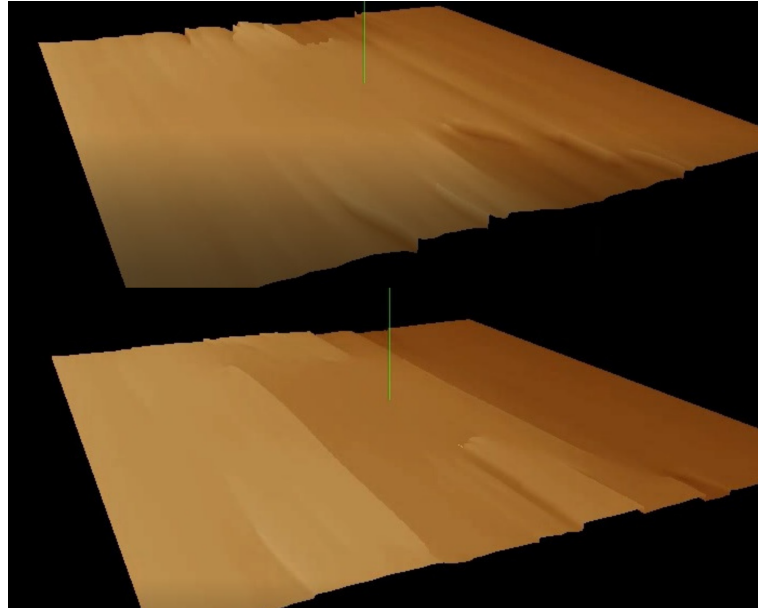
Figura 6.18 – Teste 4 - Borracha da haste do puxavante



Fonte: Dados da pesquisa

Como resultado desta análise podemos observar os diferentes estágios de deformação da vareta, simulando o deslocamento da mesma em sua aplicação real, conforme figura 6.19

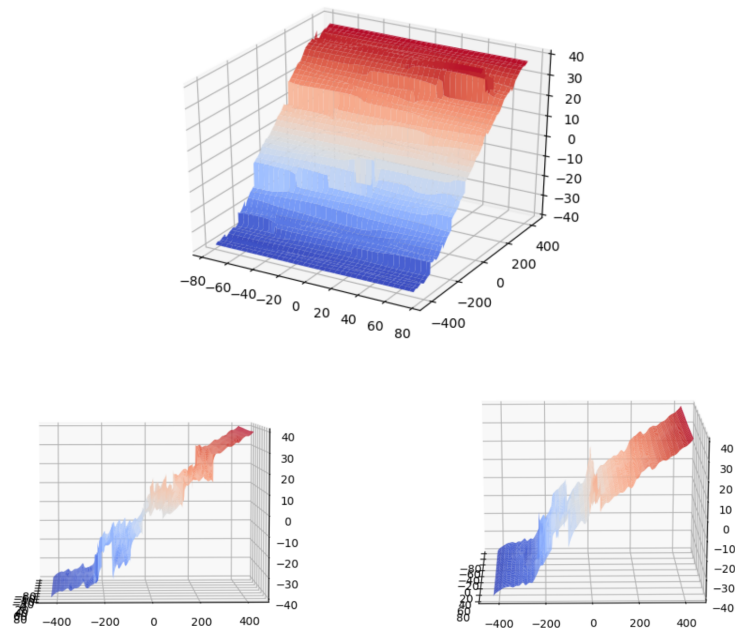
Figura 6.19 – Teste 4 - Borracha da haste do puxavante



Fonte: Dados da pesquisa

E por fim observamos também a saída em gráfico de deformação em 3D dos diferentes estágios da borracha, permitindo assim observar os pontos onde há maior concentração de tensão, e conseqüentemente deformação, conforme figura 6.20

Figura 6.20 – Teste 4 - Borracha da haste do puxavante



Fonte: Dados da pesquisa

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando em consideração a hipótese do trabalho, conclui-se que:

- Foi possível aplicar o método interferométrico de forma satisfatória para análise qualitativa em tempo real de corpo de provas de aço, acrílico, borracha e nylon, em ambiente controlado;
- A validação da técnica utilizada pela IHM foi realizada comparando-a com outros trabalhos realizados, tendo sua eficácia comprovada em gerar um mapa de fases da deformação, em tons de cinza;
- Também foi possível verificar qualitativamente a deformação em corpos de prova conhecidos, como o chapa em aço A36 e o acrílico;
- E por fim dentro do campo de atuação da engenharia agrícola foi possível observar qualitativamente a deformação em peças de nylon e borracha utilizadas em derrigadeiras mecânicas;

Para trabalhos futuros, sugere-se uma implementação na IHM para extração de dados numéricos, com o intuito de realizar após as análises qualitativas, uma análise quantitativa que permita com maior precisão verificar imperfeições em superfícies e suas possíveis reparações.

REFERÊNCIAS

- ABDELSALAM, D. G.; YAO, B. Interferometry and its applications in surface metrology. **Optical interferometry**, BoD–Books on Demand, p. 81, 2017.
- ACKEMANN, T.; FIRTH, W.; OPPO, G. Chapter 6 fundamentals and applications of spatial dissipative solitons in photonic devices. In: **Advances in Atomic Molecular and Optical Physics**. Academic Press, 2009, (Advances In Atomic, Molecular, and Optical Physics, v. 57). p. 323 – 421. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1049250X09570061>>.
- ALBERTAZZI, A. et al. Umdetecção de falhas de adesão entre mantas poliméricas e dutos usando interferometria de deslocamento lateral. **XXIV CONAEND, São Paulo–SP, Brasil**, Anais... São Paulo: ABENDI, 2006.
- ALMEIDA, T. P. et al. Metodologia para processamento do phase shift digital aplicado à técnica de shearografia. Universidade Federal de Lavras, 2016.
- ANGELIS, G. D. e. a. A new technique to detect defect size and depth in composite structure using digital shearography and unconstrained optimization. **NDT & E International**, London, v. 45, n. 1, p. 91–96, Jan 2001.
- BEPPLER, R. V. et al. Detecção por métodos ópticos de falhas de adesão de revestimentos de materiais compostos usados na indústria do petróleo. Florianópolis, SC, 2006.
- BHADURI, B. et al. Use of spatial phase shifting technique in digital speckle pattern interferometry (dspi) and digital shearography (ds). **Optics express**, Optical Society of America, v. 14, n. 24, p. 11598–11607, 2006.
- BRAGA, R. A. et al. Phase-shifting of correlation fringes created by image processing as an alternative to improve digital shearography. **Optics Communications**, Amsterdam, v. 380, p. 114–123, Mai 2016.
- BRUNING, J. H. et al. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses. **Applied optics**, Easton, v. 13, n. 11, p. 2693–2703, Nov 1974.
- CARRÉ, P. Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du bureau international des poids et mesures. **Metrologia**, Bristol, v. 2, n. 1, p. 13, 1966.
- CHENG, Y.-Y.; WYANT, J. C. Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry. **Applied Optics**, Easton, v. 24, n. 18, p. 3049–3052, 1985.
- CHENG, Y.-Y.; WYANT, J. C. Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry. *Appl. Opt.* 24 (1985) 3049-305, 1985.
- CREATH, K. Phase shifting speckle interferometry. **Applied optics**, Easton, v. 24, n. 18, p. 3053–3058, 1985.
- DU, Y. et al. Spatial carrier phase-shifting algorithm based on principal component analysis method. **Optics Express**, Optical Society of America, v. 20, n. 15, p. 16471–16479, 2012.
- ESTRADA, J.; SERVIN, M.; MARROQUÍN, J. Local adaptable quadrature filters to demodulate single fringe patterns with closed fringes. **Optics express**, Optical Society of America, v. 15, n. 5, p. 2288–2298, 2007.

FERNANDES, L. F. R. M. et al. Utilização da técnica de moiré para detectar alterações posturais. **Fisioterapia e Pesquisa**, v. 10, n. 1, p. 16–23, 2003.

FRANCIS, D.; TATAM, R.; GROVES, R. Shearography technology and applications: a review. **Measurement science and technology**, IOP Publishing, v. 21, n. 10, p. 102001, 2010.

GOODMAN, J. W. **Speckle phenomena in optics: theory and applications**. [S.l.]: Cambridge: Roberts and Company Publishers, 2007. 387 p.

GU, G. Q.; WANG, K. F. Study of phase shifting techniques in digital speckle pattern interferometry for deformation measurement. **AIP CONFERENCE**, Ascona. Proceedings... Ascona: American Institute of Physics, v. 57, 2010.

HARIHARAN, P.; OREB, B.; EIJU, T. Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm. **Applied optics**, Easton, v. 26, n. 13, p. 2504–2506, 1987.

HECHT, E. **Optics 4th edition by Eugene Hecht Reading (MA)**. [S.l.]: Addison-Wesley Publishing Company, 2001.

HIPP, M. et al. Digital evaluation of interferograms. **Measurement**, Amsterdam, v. 36, n. 1, p. 53–66, Jul 2004.

HOANG, T. et al. Generic gamma correction for accuracy enhancement in fringe-projection profilometry. **Optics letters**, New York, v. 35, n. 12, p. 1992–1994, Jun 2010.

HUANG, J.-R.; FORD, H.; TATAM, R. Phase-stepped speckle shearing interferometer by source wavelength modulation. **Optics letters**, Optical Society of America, v. 21, n. 18, p. 1421–1423, 1996.

HUNG, Y.; HO, H. Shearography: An optical measurement technique and applications. **Materials science and engineering: R: Reports**, Lausanne, v. 49, n. 3, p. 61–87, Abr 2005.

HUNG, Y. Y. A speckle-shearing interferometer: a tool for measuring derivatives of surface displacements. **Optics Communications**, Elsevier, v. 11, n. 2, p. 132–135, 1974.

IBRAHIM, M. 7 - nondestructive testing and structural health monitoring of marine composite structures. In: GRAHAM-JONES, J.; SUMMERSCALES, J. (Ed.). **Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites**. Woodhead Publishing, 2016, (Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering). p. 147–183. ISBN 978-1-78242-250-1. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782422501000077>>.

KANDO, D. et al. Phase extraction from single interferogram including closed-fringe using deep learning. **Applied Sciences**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 17, p. 3529, 2019.

KEMAO, Q. Windowed fourier transform for fringe pattern analysis. **Applied Optics**, Optical Society of America, v. 43, n. 13, p. 2695–2702, 2004.

KRANZ, J. et al. Fiber optical single-frame speckle interferometer for measuring industrial surfaces. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **International Conference on Applied Optical Metrology**. [S.l.], 1998. v. 3407, p. 328–331.

- KROWORZ, A. et al. Efficiency assessment of wavelet transforms and wavelets for damage localization in beams using shearography. **Diagnostyka**, v. 19, 2018.
- LARKIN, K. G.; BONE, D. J.; OLDFIELD, M. A. Natural demodulation of two-dimensional fringe patterns. i. general background of the spiral phase quadrature transform. **JOSA A**, Optical Society of America, v. 18, n. 8, p. 1862–1870, 2001.
- LIU, K. et al. Gamma model and its analysis for phase measuring profilometry. **Journal the Optical Society of America**, Oxford, v. 27, n. 3, p. 553–562, 2010.
- LØKBERG, O. J. Electronic speckle pattern interferometry. In: **Optical metrology**. [S.l.]: Springer, 1987. p. 542–572.
- LOPES, H. M. R. et al. Desenvolvimento de técnicas interferométricas, contínuas e pulsadas, aplicadas à análise do dano em estruturas compósitas. 2012.
- MARTÍNEZ-CELORIO, R. et al. Young's modulus measurement of the radius bone using a shearing interferometer with carrier fringes. **Optics and Lasers in Engineering**, London, v. 48, n. 7, p. 727–731, Jul/Ago 2010.
- MASTERS, J. E. Basic failure modes of continuous fiber composites. **ASM International, Engineered Materials Handbook**, v. 1, p. 781–785, 1987.
- MIRANDA, M. **Comparação entre métodos de inspeção não-destrutiva aplicados a peças compósitas laminadas sólidas estruturais aeronáuticas**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.
- PEDRINI, G.; ZOU, Y.; TIZIANI, H. Quantitative evaluation of digital shearing interferogram using the spatial carrier method. **Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A**, IOP Publishing, v. 5, n. 3, p. 313, 1996.
- PICART, P.; MONTRESOR, S. Chapter 5 - digital holography. In: BLANCHE, P.-A. (Ed.). **Optical Holography**. Elsevier, 2020. p. 83–120. ISBN 978-0-12-815467-0. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128154670000050>>.
- QUINTEROS, A. J. D. Ensaio de shearografia aplicado a materiais compósitos utilizados na indústria aeronáutica. 2015.
- REBOUÇAS, E. C. et al. Estudo da mecânica da danificação aplicada ao concreto contendo cinza de casca de arroz residual com auxílio da técnica de correlação digital de imagens. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2019.
- RIBEIRO, J. et al. Técnicas de medição de deslocamentos no plano. In: **Actas do 6º Congresso Nacional de Mecânica Experimental**. [S.l.: s.n.], 2005.
- SALVADOR-PALMER, R. et al. Protocol for determining apparent young's modulus of human teeth using laser speckle interferometry. In: PROCEEDINGS... NEW YORK: [S.N.]. **INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPECKLE METROLOGY**. [S.l.], 2012. v. 5, p. 84131.
- SCHÖNTAG, J. M. et al. Caracterização da profundidade de defeitos em materiais compósitos utilizando shearografia com carregamento vibracional. 2012.

SCHWIDER, J. et al. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources. **Applied optics**, Easton, v. 22, n. 21, p. 3421–3432, 1983.

SCHÖNTAG, J. M. **Caracterização da profundidade de defeitos em materiais compostos utilizando shearografia com carregamento vibracional**. 122 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

SMYTHE, R.; MOORE, R. Instantaneous phase measuring interferometry. **Optical Engineering**, International Society for Optics and Photonics, v. 23, n. 4, p. 234361, 1984.

STEINCHEN, W.; YANG, L. Digital shearography: Theory and application of digital speckle pattern shearing interferometry. New York: CRC Press, p. 330, 2003.

SURREL, Y. Design of algorithms for phase measurements by the use of phase stepping. **Applied optics**, Easton, v. 35, n. 1, p. 51–60, 1996.

VEUSTER, C. D. et al. In-line phase-shifter calibration and drift measurement and compensation for digital speckle pattern interferometry (dsp). In: **THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, 2951., Berlim**. [S.l.]: Proceedings... Berlin: [s.l.], 1996. p. 117–124.

WILLEMANN, D.; ALBERTAZZI, A.; MENICONI, L. Um sistema prático para identificação e localização de defeitos em revestimentos de materiais compósitos utilizando shearografia. **CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 9**, Anais... Salvador: Abendi, 2007.

XIE, X. et al. Michelson interferometer based spatial phase shift shearography. **Applied optics**, Optical Society of America, v. 52, n. 17, p. 4063–4071, 2013.

YANG, L. et al. Digital shearography for nondestructive testing: potentials, limitations, and applications. **Journal of Holography and Speckle**, American Scientific Publishers, v. 1, n. 2, p. 69–79, 2004.

YANG, L. et al. Precision measurement and nondestructive testing by means of digital phase shifting speckle pattern and speckle pattern shearing interferometry. **Measurement**, Amsterdam, v. 16, n. 3, p. 149–160, Nov 1995.

ZHANG, C. et al. Full-field phase error detection and compensation method for digital phase-shifting fringe projection profilometry. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v. 26, n. 3, p. 35201, Fev 2015.

ZHAO, Q. et al. Digital shearography for ndt: phase measurement technique and recent developments. **Applied Sciences**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 12, p. 2662, 2018.