



THIAGO PAIVA ALMEIDA

**METODOLOGIA PARA PROCESSAMENTO DO PHASE
SHIFT DIGITAL APLICADO À TÉCNICA DE
SHEAROGRAFIA**

LAVRAS – MG

2016

THIAGO PAIVA ALMEIDA

**METODOLOGIA PARA PROCESSAMENTO DO PHASE SHIFT DIGITAL
APLICADO À TÉCNICA DE SHEAROGRAFIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Engenharia de Sistemas e Automação, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dsc. Roberto Alves Braga Jr.

Orientador

Prof. Dsc. Rolando de J. González-Peña

Coorientador

Prof. Dsc. Ricardo R. Magalhães

Coorientador

LAVRAS – MG

2016

**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

Metodologia para Processamento do phase shift digital
aplicado à técnica de shearografia / Thiago Paiva Almeida. –
Lavras : UFLA, 2016.

81 p. : il.

Dissertação(Mestrado acadêmico)–Universidade Federal
de Lavras, 2016.

Orientador: Prof. Dsc. Roberto Alves Braga Jr..

Bibliografia.

1. Shearografia. 2. Holografia Digital. 3. Holografia
Speckle Digital. – Normas. I. Universidade Federal de Lavras.

THIAGO PAIVA ALMEIDA

**METODOLOGIA PARA PROCESSAMENTO DO PHASE SHIFT DIGITAL
APLICADO À TÉCNICA DE SHEAROGRAFIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Engenharia de Sistemas e Automação, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 26 de Agosto de 2016.

Prof. Dsc. Roberto Alves Braga Jr.	DEG - UFLA
Prof. DSc. Inácio Maria Dal Fabbro	DEG -Unicamp
Prof. Dsc. Antônio Carlos Loureiro Lino	DEG - IAC
Profa. Dsc. Angela Dayana Barrera de Brito	DFI - UFLA

Prof. Dsc. Roberto Alves Braga Jr.
Orientador

Prof. Dsc. Rolando de J. González-Peña
Coorientador

Prof. Dsc. Ricardo R. Magalhães
Coorientador

**LAVRAS – MG
2016**

*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 encher-me de alegrias nos momentos de desânimo, por ser meu porto seguro nos meus momentos de inseguranças e minha sogra Anita que lá do céu intercedeu por mim.

Agradeço à 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 Lamarquiana e meu cunhado Wagner, 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 a 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 de Sistemas e Automação, que me deu a oportunidade de realizar o Mestrado.

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

A adoção de *digital speckle pattern shearing interferometry*, ou *speckle shearography*, é bem conhecida em muitas áreas, quando é necessário medir micro-deslocamentos no plano e fora do plano em objetos biológicos e não biológicos; que se baseia no interferômetro de Michelson com a utilização de um transdutor piezoelétrico (PZT), a fim de fornecer o desvio de fase das franjas e, em seguida, melhorar a qualidade da imagem final. A criação das imagens usando um deslocamento PZT, apesar do seu uso generalizado, há algumas desvantagens ou limitações, tais como o custo do aparelho, as dificuldades na aplicação do mesmo deslocamento no espelho repetidas vezes, e quando a medição do deslocamento de fase não pode ser usada no objeto dinâmico. O objetivo com este trabalho foi criar digitalmente imagens de mudança de fase, evitando os ajustes mecânicos do PZT, testando-os com o método shearografia digital. A metodologia foi testada usando um objeto conhecido, uma viga cantilever ASTM A36 sob deformação. Os resultados documentam a capacidade para criar o mapa de deformação e curvas com fiabilidade e sensibilidade, reduzindo o custo, e melhorando a robustez e também a acessibilidade de *digital speckle pattern shearing interferometry*.

Palavras-chave: Holografia. Holografia Digital. Shearografia.

ABSTRACT

The adoption of the digital speckle pattern shearing interferometry, or speckle shearography, is well known in many fields, when it is necessary to measure microshifts in or out of the plane in biological and non-biological objects; based on the interferometer of Michelson, with the use of a piezoelectric transducer (PZT), in order to provide the phase shift of the fringes and, subsequently, improve the quality of the final image. The creation of images using a PZT shift, despite its generalized use, presents few disadvantages or limitations, such as cost of the device, difficulties in the application of the same shift in the mirror, repeatedly, and, when measuring the phase shift cannot be done in the dynamic object. The objective of this work was to digitally create images of phase shift, avoiding the mechanical adjustments of the PZT, testing them with the digital shearography method. The methodology was tested using a known object, an ASTM A36 cantilever beam under deformation. The results document the capacity of creating the deformation and curve map with reliability and sensitivity, reducing cost and improving sturdiness and accessibility of the digital speckle pattern shearing interferometry.

Keywords: Holography. Digital holography. Shearography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema do sistema de ESPI	16
Figura 2.2 – Configuração de um sistema de medição interferométrico	17
Figura 2.3 – Interferômetro de Michelson para medições de gradientes de deslocamento fora do plano (GERALDES, 2008)	18
Figura 2.4 – Interferência de duas ondas planas (SANTOS et al., 1981)	19
Figura 2.5 – Franjas de interferência	20
Figura 2.6 – Configuração para shearografia inspirada no Interferômetro de <i>Michelson</i> . .	21
Figura 2.7 – Configuração para shearografia inspirada no Interferômetro de <i>Michelson</i> . .	26
Figura 2.8 – 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°).	30
Figura 2.9 – 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. .	31
Figura 2.10 – 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 $\pm 90^\circ$	32
Figura 2.11 – Setup utilizado no trabalho	35
Figura 2.12 – Exemplo da modelagem utilizada no trabalho	36
Figura 2.13 – Curva teórica (FEM) comparada com a curva de deformação medida pelo robô, por meio do relógio comparador	36
Figura 3.1 – amostra da viga com e sem solda	37
Figura 3.2 – Setup <i>Digital Speckle Shearing Pattern Interferometry</i>	38
Figura 3.3 – Setup <i>Digital Speckle Shearing Pattern Interferometry</i>	38
Figura 3.4 – Diferentes vistas do interferômetro de Michelson	40
Figura 3.5 – Interface do software Real Time Deformation	41
Figura 3.6 – Imagem de franjas em uma viga cantilever (a) com o ruído e (b) o perfil de um linha longitudinal em escala de cinza; (C) a imagem após um filtro <i>Gaussian Blur</i> (sigma = 10) e (d) o perfil de uma linha longitudinal em escala de cinza.	42
Figura 3.7 – Parâmetros do algoritmo de <i>Phase-shift</i>	43
Figura 3.8 – perfis eixo de imagens após a mudança de fase digital, em que o primeiro perfil representa 0° deslocamento, o segundo deslocamento de 90° , a ter- ceira mudança de 180° e o quarto deslocamento 270°	44

Figura 3.9 – Modelagem efetuado no software Ansys 16, com o objetivo de obter a curva de deformação teórica - chapa sem solda	46
Figura 3.10 – Modelagem efetuado no software Ansys 16, com o objetivo de obter a curva de deformação teórica - chapa sem solda	46
Figura 3.11 – Modelagem efetuado no software Ansys 16, com o objetivo de obter a curva de deformação teórica - chapa sem solda	46
Figura 3.12 – Modelagem efetuado no software Ansys 16, com o objetivo de obter a curva de deformação teórica - chapa com solda	47
Figura 3.13 – Modelagem efetuado no software Ansys 16, com o objetivo de obter a curva de deformação teórica - chapa com solda	47
Figura 4.1 – Franjas em uma viga cantilever com uma carga de 45 g de (a) PZT phase-shift e (b) de deslocamento de fase digital.	49
Figura 4.2 – Comparação das curvas teóricas de deformação Chapa sem solda x chapa com solda	49
Figura 4.3 – Comparação do <i>Phase shift</i> digital utilizando valores obtidos no Cedia e processados pelo software Idea x Scilab na chapa sem solda	50
Figura 4.4 – Comparação do <i>Phase shift</i> digital utilizando valores obtidos no Cedia x Valores obtidos em Valencia e processados pelo software Idea na chapa sem solda	51
Figura 4.5 – Comparação do <i>Phase shift</i> digital utilizando valores obtidos no Cedia x Valores obtidos em Valencia e processados pelo software Idea na chapa com solda	51
Figura 4.6 – Comparação PZT x FEM (Sem Solda) 45 g	52
Figura 4.7 – Comparação do PZT x FEM, chapa sem solda, utilizando uma função Linear	52
Figura 4.8 – Comparação do PZT x FEM, chapa sem solda, utilizando uma função exponencial	53
Figura 4.9 – Comparação Digital x FEM (Sem Solda) 45 g	53
Figura 4.10 – Comparação do <i>Phase shift</i> digital x FEM, chapa sem solda, utilizando uma função Linear	54
Figura 4.11 – Comparação do <i>Phase shift</i> digital x FEM, chapa sem solda, utilizando uma função exponencial	54
Figura 4.12 – Comparação PZT x Digital (Sem Solda) 45 g.	55

Figura 4.13 – Comparação PZT x Digital x FEM (Sem Solda) 45 g	55
Figura 4.14 – Curvas de deformação de uma viga cantilever de aço A36, sem solda, deformada três vezes por uma carga de 45 g medida por <i>digital speckle shearing pattern interferometry</i> utilizando um PZT para fornecer a fase de deslocamento	56
Figura 4.15 – Curvas de deformação de uma viga cantilever de aço A36, sem solda, deformada três vezes por uma carga de 45 g medida por <i>digital speckle shearing pattern interferometry</i> utilizando a geração de mudança de fase digital . . .	57
Figura 4.16 – Comparação PZT x FEM (Com Solda) 45 g	57
Figura 4.17 – Comparação do PZT x FEM, chapa com solda, utilizando uma função Linear	58
Figura 4.18 – Comparação do PZT x FEM, chapa com solda, utilizando uma função exponencial	58
Figura 4.19 – Comparação Digital x FEM (Com Solda) 45 g	59
Figura 4.20 – Comparação do <i>Phase shift</i> digital x FEM, chapa com solda, utilizando uma função Linear	59
Figura 4.21 – Comparação do <i>Phase shift</i> digital x FEM, chapa sem solda, utilizando uma função exponencial	59
Figura 4.22 – Comparação PZT x Digital (Com Solda) 45 g	60
Figura 4.23 – Comparação PZT x Digital x FEM(Ajustado)(Com Solda) 45 g	61
Figura 4.24 – Curvas de deformação de uma viga cantilever de aço A36, com solda, deformada três vezes por uma carga de 45 g medida por <i>digital speckle shearing pattern interferometry</i> utilizando um PZT para fornecer a fase de deslocamento	61
Figura 4.25 – Curvas de deformação de uma viga cantilever de aço A36, com solda, deformada três vezes por uma carga de 45 g medida por <i>digital speckle shearing pattern interferometry</i> utilizando a geração de mudança de fase digital . . .	62
Figura 4.26 – Curvas de deformação (por diferença de fase) de uma viga <i>cantilever</i> exposta a uma sequência de cargas com a mudança de fase fornecida por um PZT.	63
Figura 4.27 – Curvas de deformação (por diferença de fase) de uma viga <i>cantilever</i> exposta a uma sequência de cargas com o deslocamento de fase digital com curvas sobrepostas em algumas cargas.	63

Figura 4.28 – Imagens das franjas obtidos pelo método proposto com uma linha mostrando onde as imagens foram cortadas.	64
Figura 4.29 – Curvas de deformação (por diferença de fase) de uma viga <i>cantilever</i> exposta a um seqüência de cargas com o deslocamento de fase digital após cortar as imagens de 60 g, 70 g e 90 g sem a curva relacionada a 19 g. . . .	65
Figura 4.30 – Diferença de fase para uma carga de 19 g com (a) linha tracejada grossa representa o proposto deslocamento digital, linha contínua que representa a mudança de fase PZT e linha pontilhada pequena representando o ajuste no software para identificar o franjas e, assim, gerar digitais phase-shifting, e (b) linha grossa tracejada representando a transferência digital de proposta, linha contínua representa o PZT mudança de fase, e a linha tracejada, representando a parte inferior da imagem de gerar digitais phase-shifting. . .	66
Figura 4.31 – Comparação das técnicas de FEM, PZT e <i>Phase shift Digital</i> utilizando várias cargas	67
Figura 4.32 – Vista da viga em balanço apresentada durante a simulação da análise de elementos finitos.	67

SUMÁRIO

1	Introdução	13
1.1	Objetivo	14
2	Referencial teórico	15
2.1	Técnicas de interferometria holográfica	15
2.2	Interferômetro de Michelson	17
2.3	Shearografia	19
2.3.1	Princípios da Shearografia	20
2.3.2	Formação de franjas no DSPI	21
2.3.3	Princípio básico da técnica de mudança de fase	23
2.3.4	Mudança de fase a partir do interferômetro de Michelson	26
2.4	Algoritmos de mudança de fase	26
2.5	Cálculo das diferenças de fase	28
2.6	Dificuldades em se utilizar o método de atuador PZT	33
2.6.1	Problemas de não linearidade do PZT	33
2.7	Utilização de sistemas microeletrônico para substituir o PZT	34
2.8	Comparação mecânica da técnica de FEM	35
3	Materiais e métodos	37
3.1	Amostra	37
3.2	Configuração experimental	37
3.2.1	Montagem e calibração	39
3.3	Ensaio experimental	39
3.3.1	Obtenção das imagens	39
3.3.2	Deteção de franjas	41
3.3.2.1	Geração de franjas com Phase-shift digital	43
3.3.3	Processamento digital	44
3.4	Análise e comparação adicional de elementos finitos	45
4	Resultados e Discuções	48
4.1	Análise de comparação utilizando a técnica de FEM comparando a curva teórica de deformação da chapa sem solda e da chapa com solda	49
4.2	Comparação dos resultados entre <i>Phase shift digital</i> obtido pelo Idea x Image J, com uma função Linear	50

4.3	Comparação dos resultados entre <i>Phase shift digital</i> obtido pelo Idea, utilizando dados obtidos em Valencia e no Cedia com uma função Linear . . .	50
4.4	Testes realizados em chapa sem solda	51
4.4.0.1	Análise de deformação utilizando a técnica de PZT x a técnica de FEM (Analítico)	51
4.4.0.2	Análise de deformação utilizando a técnica de <i>Phase shift digital</i> x a técnica de FEM (Analítico)	52
4.4.0.3	Análise de deformação utilizando a técnica de <i>Phase shift digital</i> x a técnica de PZT	54
4.4.1	Análise de deformação utilizando a técnica de <i>Phase shift digital</i> x a técnica de PZT x FEM (Analítico)	55
4.4.2	Análise de repetição utilizando a técnica PZT	56
4.4.3	Análise de repetição utilizando a técnica de <i>Phase shift digital</i>	56
4.5	Testes realizados em chapa com solda	57
4.5.1	Análise de deformação utilizando a técnica de PZT x a técnica de FEM (Analítico)	57
4.5.2	Análise de deformação utilizando a técnica de <i>Phase shift digital</i> x a técnica de FEM (Analítico)	58
4.5.3	Análise de deformação utilizando a técnica de <i>Phase shift digital</i> x a técnica de PZT	60
4.5.4	Análise de deformação utilizando a técnica de <i>Phase shift digital</i> x a técnica de PZT x FEM (Analítico)	60
4.5.5	Análise de repetição utilizando a técnica PZT	61
4.5.6	Análise de repetição utilizando a técnica de <i>Phase shift digital</i>	62
4.6	Teste de limites e desafios do Phase-shift Digital	62
5	Conclusão	68
	REFERÊNCIAS	69
6	Anexos	73
6.1	Códigos Image J	73
6.2	Códigos SCILAB	80

1 INTRODUÇÃO

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 muito 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.

A Shearografia é uma técnica óptica que utiliza um sistema interferométrico do tipo Michelson, que consiste em iluminar o objeto a ser analisado por um feixe laser, o qual é dividido em dois feixes iguais por um cubo divisor de feixe. Os feixes seguem caminhos distintos, sendo que um deles é refletido pelo objeto em estudo causando uma figura de interferência que é observada por uma câmera. As franjas de interferência geradas indicam a deformação do objeto de forma micrométrica, sendo muito úteis para aplicações onde há a necessidade de monitoramento e detecção de movimentos que estão fora do alcance dos equipamentos convencionais.

As deformações não propositadas ocorridas em qualquer produto industrial, sejam provenientes de esforços externos (ex. fadiga) ou processos de fabricação (ex. tensões residuais), podem afetar a resistência e comprometer a vida útil deste produto. A medição das tensões residuais é complexa porque estas estão presentes até mesmo em materiais isentos de forças externas.

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.

A shearografia destina-se a detectar zonas de forte concentração de tensões originadas pela presença de fissuras ou quando sujeitas a esforços induzidos como o vácuo, os efeitos térmicos ou por meio de vibração. A deformação fora do plano na região em análise é detectada e processada digitalmente, sendo possível a obtenção de uma imagem virtual da área deformada.

1.1 Objetivo

O objetivo geral com este trabalho é propor uma metodologia para realizar o deslocamento de fase (Phase shift) de forma digital para aplicação em técnicas interferométricas. Tendo como objetivos específicos:

- Implementar o deslocamento de fase de forma digital na técnica de shearografia speckle;
- Comparar a técnica com a técnica usando um piezoelétrico e métodos simulados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Técnicas de interferometria holográfica

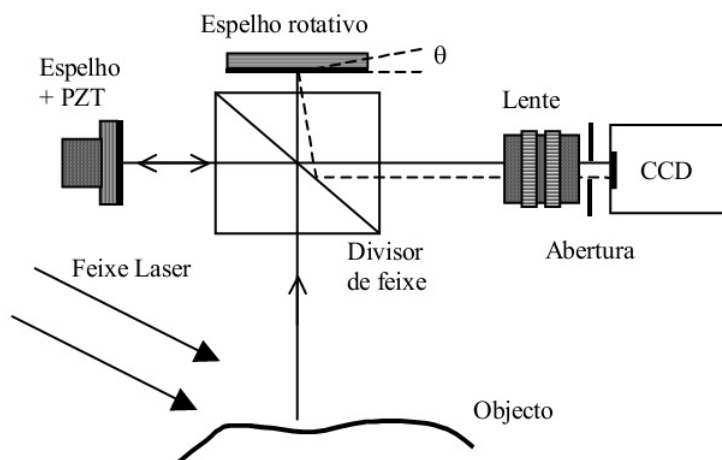
Os sistemas de interferometria utilizados neste trabalho baseiam-se no interferômetro de Michelson, onde duas frentes de onda coerentes são combinadas para obter registros holográficos com gravação simultânea de amplitude e fase. Neste aspecto as técnicas utilizadas, ESPI e shearografia, diferem apenas no fato de que na primeira uma das frentes de onda é especular, isto é, tem fase constante, enquanto na segunda ambas correspondem a padrões de *speckle*. Combinando dois destes registros, obtidos com o objeto em diferentes situações de carga, obtém-se padrões de interferência que se encontram relacionados com o comportamento dos objetos.

Nos sistemas de shearografia, o princípio para a obtenção de franjas de interferência é apenas a existência de correlação entre o padrão de franjas, granitado laser, antes e após a deformação. Este sistema não requer a realização de diferenciação numérica, visto que permite a diferenciação óptica (UDUPA et al., 2003). Lee et al. (2004) realizaram estudos em materiais compósitos com duas técnicas de shearografia, tendo concluído que as mesmas são adequadas para a detecção de defeitos e análise mecânica destes.

As técnicas de ESPI 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 iluminado por um feixe de luz e a referência obtida por meio de um feixe especular proveniente da mesma fonte, como se pode ver na Fig. 2.1.

O sistema de ESPI utilizado consiste num interferômetro onde um feixe de luz coerente é dividido para gerar os dois braços do interferômetro, feixe referência e feixe objeto. Um dos feixes é filtrado e utilizado como feixe de referência, enquanto o outro ilumina o objeto em análise. A luz difundida pela superfície do objeto é captada pelas lentes do sistema ótico e combinada com o feixe de referência. O padrão de granitado resultante da interferência dos dois feixes é captado por uma câmara CCD e armazenado num sistema de processamento de imagem. Este padrão contém a informação que codifica a superfície do objeto em análise. Após solicitação do objeto é gravado um segundo padrão de granitado que apresenta modificações correspondentes às eventuais alterações da superfície. Correlacionando os dois padrões de gra-

Figura 2.1 – Esquema do sistema de ESPI



Fonte: Adaptado de Amaro et al. (2006)

nitado é possível obter a distribuição espacial dos deslocamentos com uma resolução da ordem de metade do comprimento de onda da luz utilizada (MONTEIRO, 1998).

Outra configuração do interferómetro de Michelson pode também ser utilizado para detectar defeitos. Designada por shearografia Steinchen e Yang (2003), esta técnica permite a obtenção direta da derivada dos deslocamentos segundo a direção normal ao plano (STEINCHEN et al., 1998);(SANTOS; VAZ; MONTEIRO, 2004). Esta informação assume maior interesse quando se pretende detectar deslocamentos localizados. A Shearography foi inicialmente desenvolvida como técnica de detecção de tensões residuais em metais, tendo posteriormente derivado para a detecção de defeitos. Habib (2005) recorreu a esta técnica para a determinação de deslocamentos e tensões, em função do tempo e da temperatura, em diversos tipos de revestimentos.

As imagens atingem o alvo percorrendo dois caminhos diferentes após o divisor de feixe: um incide no espelho com o transdutor piezoelétrico (PZT) e outro é encaminhado pelo espelho que, para gerar o shear em duas direções, pode rodar em dois eixos no seu plano. Assim, duas imagens do objeto espacialmente deslocadas são obtidas e encaminhadas até ao detector de CCD.

A técnica de shearografia é vocacionada para a detecção de gradientes de deslocamentos Habib (2005);Groves, James e Tatam (2004) pois é praticamente insensível a deslocamentos de corpo rígido ou deformações globais, que afetam de igual modo ambos os braços do interferómetro. Os padrões de interferência obtidos desta forma permitem detectar mais facilmente

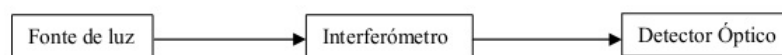
a presença de defeitos que provoquem alterações localizadas no campo de deslocamentos. O fato de se utilizar um interferômetro em que o trajeto dos feixes é comum na maior parte do seu caminho diminui também a sua sensibilidade a perturbações exteriores (MARINI; VAZ et al., 1999);(GOMES; MONTEIRO; VAZ,). Deve referir-se que os campos de deslocamento obtidos por ESPI podem ser diferenciados numericamente por métodos de processamento de imagem conduzindo a mapas de gradientes semelhantes aos obtidos diretamente por shearografia. Este processo é mais trabalhoso e sensível a ruído (KIM et al., 2003).

Ambas as montagens permitem a utilização de um modulador de fase num dos braços do interferômetro. Este dispositivo consiste num espelho montado num (PZT) e permite registar um conjunto de imagens em que ao mesmo padrão de franjas é adicionado uma fase constante e conhecida. Este conjunto de imagens permite calcular os mapas de fase dos interferogramas utilizando algoritmos de processamento de imagem. Os mapas obtidos aumentam a resolução da medida de aproximadamente uma ordem de grandeza.

2.2 Interferômetro de Michelson

Este interferômetro é basicamente um interferômetro ótico com registro dos padrões de interferência em vídeo. Um sistema de medição interferométrico consiste numa fonte de luz, num sistema ótico (interferômetro) e num detector que converte variações de intensidade luminosa num sinal mensurável (SANTOS et al., 1981).

Figura 2.2 – Configuração de um sistema de medição interferométrico



Fonte: Adaptado de Geraldles (2008)

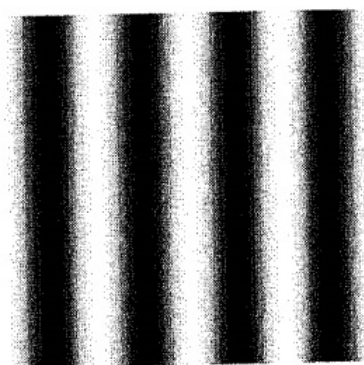
No entanto a frequência da radiação eletromagnética é muito elevada, cerca de 10^{14} [Hz] no visível e próximo do infravermelho, para poder ser observada. A técnica de processamento ótico que transforma a informação de fase em informação de intensidade é chamada interferometria.

Um interferômetro é um sistema ótico para observar interferência entre duas ou mais ondas. Por interferência ótica designa-se interação ou sobreposição de feixes de luz, da qual resulta uma intensidade que não é simplesmente igual à soma das intensidades componentes. No caso da interferência de duas ondas iguais, esta depende da interferência ser construtiva (em

distintos. Estes caminhos constituem os braços do interferômetro. No plano da imagem, as duas ondas parciais recombinadas dão origem a figuras de interferência, permitindo medir a diferença de fase entre ambos os braços.

A primeira aplicação deste interferômetro foi à medição de comprimentos de onda, especialmente da estrutura de linhas espectrais. Na figura 2.4 representa-se o padrão de interferência típico, ou interferograma, de duas ondas planas ligeiramente inclinadas segundo a horizontal.

Figura 2.4 – Interferência de duas ondas planas (SANTOS et al., 1981)



Fonte: Adaptado de Geraldles (2008)

O interferômetro de *Michelson* sensível a gradientes de deslocamento fora do plano é assim utilizado na técnica de interferometria *Shearography*, que se descreve de seguida.

2.3 Shearografia

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

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

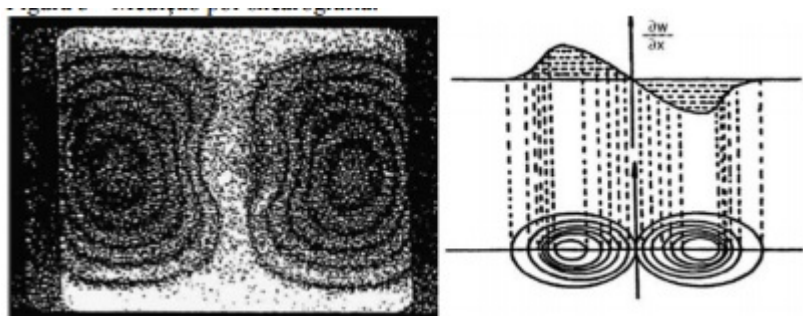
Se o campo de deslocamentos for constante em cada ponto do objeto, a primeira derivada do deslocamento será igual a zero, o que não produzirá franjas na medição com shearografia. Esta propriedade a torna praticamente insensível a movimentos de corpo rígido e permite sua aplicação fora de ambientes laboratoriais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

2.3.1 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 2.5 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 2.5 – Franjas de interferência



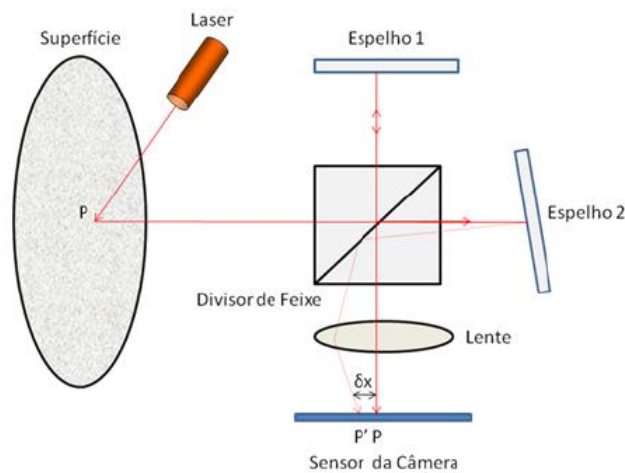
Fonte: Adaptado de Hung e Ho (2005)

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 2.6 é possível visualizar um exemplo de configuração dos componentes ópticos seguindo o modelo de *Michelson*.

Para entender o seu funcionamento é necessário caracterizar os conceitos de diferença de fase e deslocamento de fase (ALBERTAZZI et al.,) (WILLEMANN; ALBERTAZZI; MENICONI, 2007)

Figura 2.6 – Configuração para shearografia inspirada no Interferômetro de *Michelson*.



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

2.3.2 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:

$$I(x,y) = I_0[1 + \gamma \cos \phi(x,y)] \quad (2.1)$$

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:

$$I'(x,y) = I_0\{1 + \gamma \cos[\phi(x,y) + \Delta]\} \quad (2.2)$$

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:

$$\Delta = \phi'(x,y) - \phi(x,y) \quad (2.3)$$

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).

2.3.3 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):

$$\begin{aligned} I_1(x,y) &= I_0\{1 + \gamma\cos[\phi(x,y)]\} \\ I_2(x,y) &= I_0\{1 + \gamma\cos[\phi(x,y) + 120]\} \\ I_3(x,y) &= I_0\{1 + \gamma\cos[\phi(x,y) - 120]\} \end{aligned} \quad (2.4)$$

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

$$\phi = \arctan \frac{\sqrt{3(I_3 - I_2)}}{2I_1 - I_2 - I_3} \quad (2.5)$$

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 um 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).

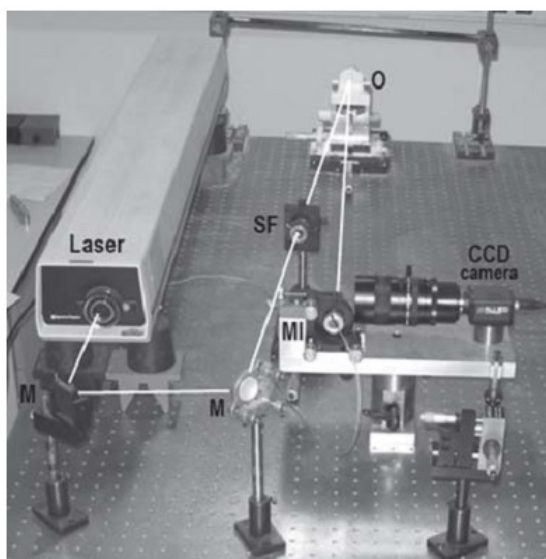
Mudança de fase pode ser aplicado a interferometria *speckle* para produzir amplificadores de fase para exposições duplas de superfícies difusas sem um passo de gravação intermediária. Os mapas de fase são calculados a partir de conjuntos de fase deslocado de dados de intensidade medida antes e após 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).

2.3.4 Mudança de fase a partir do interferômetro de Michelson

A Figura 2.7 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 2.7 – Configuração para shearografia inspirada no Interferômetro de *Michelson*.



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

2.4 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:

$$\Delta\Psi = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\delta w(x,y)}{\delta y} \right) \Delta y \quad (2.6)$$

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 (HIPPI et al., 2004a). Por exemplo, obter uma imagem como a referência antes da deformação de um objeto e outros quatro, após o 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 2.7 representa o processamento de uma das quatro imagens, depois das comparações (STEINCHEN; YANG, 2003).

$$\Psi(x,y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_4(x,y) - I_2(x,y)}{I_1(x,y) - 2I_3(x,y)} \right] \quad (2.7)$$

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. Cheng e Wyant (1985c) Veuster et al. (1996). O desafio da polarização do PZT cria alguns problemas de repetibilidade, o que pode comprometer os resultados.

2.5 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.

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 (CARRÉ, 1966), (CHENG; WYANT, 1985b). 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:

$$\tan^2 \alpha = \frac{3I_2 - 3I_3 - I_1 + I_4}{I_1 + I_2 - I_3 - I_4} \quad (2.8)$$

$$\tan^2 \varphi = \frac{(3I_2 - 3I_3 - I_1 + I_4)(I_1 + I_2 - I_3 - I_4)}{(I_1 + I_2 - I_3 - I_4)^2} \quad (2.9)$$

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. (2.8) e (2.9) 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. (2.8) e (2.9) 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:

$$\begin{aligned} I_1 &= A + B + 2(AB)^{1/2} \cos(\varphi - 2\alpha) \\ I_2 &= A + B + 2(AB)^{1/2} \cos(\varphi - \alpha) \\ I_3 &= A + B + 2(AB)^{1/2} \cos \varphi \\ I_4 &= A + B + 2(AB)^{1/2} \cos(\varphi + \alpha) \\ I_5 &= A + B + 2(AB)^{1/2} \cos(\varphi + 2\alpha) \end{aligned} \quad (2.10)$$

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

$$\frac{I_2 - I_4}{(2I_3 - I_5 - I_1)} = \frac{\sin \alpha \sin \varphi}{(1 \cos 2\alpha) \cos \varphi} \quad (2.11)$$

Pode-se mostrar que a variação do lado direito da eq.(2.11) com α cai para zero quando $\alpha = 90^\circ$. A equação (2.11), em seguida reduzida para:

$$\tan \varphi = \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \quad (2.12)$$

Uma vez que não é possível para o numerador e denominador Eq. (2.12) 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. (2.13) para que um erro ε no passo de fase, o valor da diferença de fase inicial obtido a partir da Eq. (2.12) é fornecido a uma primeira aproximação pela relação

$$\tan \varphi' = [1 + (\varepsilon^2/2)] \tan \varphi \quad (2.13)$$

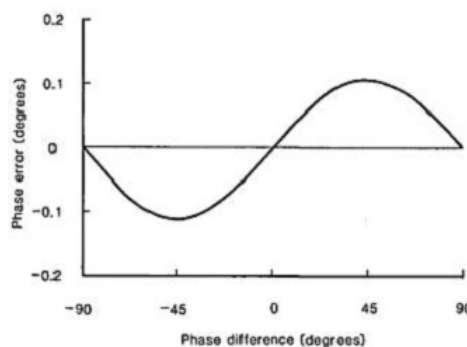
Por conseguinte, o erro no valor calculado de φ é:

$$\Delta\varphi = \varphi' - \varphi = (\varepsilon^2/4)\sin 2\varphi \quad (2.14)$$

Segue-se a partir da Eq. (2.14) um desvio em que o 2 ° 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. 2.8, 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).

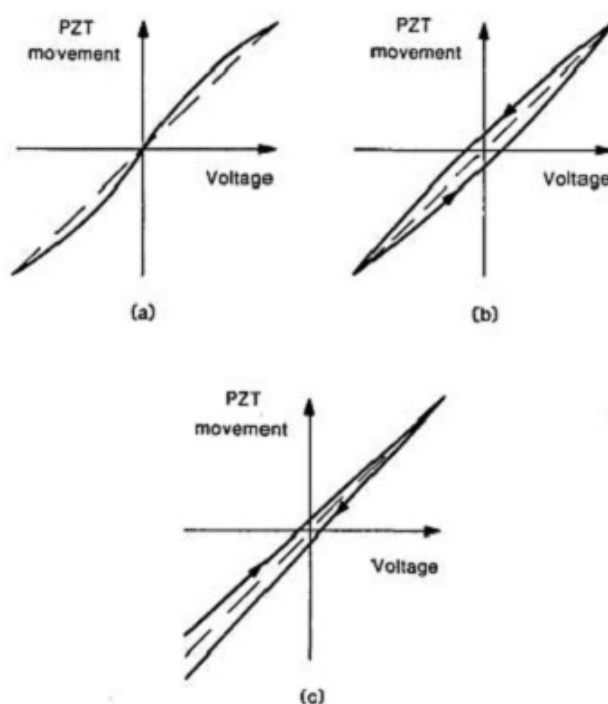
Figura 2.8 – Erro de fase plotados contra a diferença de fase por um erro no passo de fase de 5 ° (passo de fase de 95 ° em vez de 90 °).



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 2.9 a-c.

Figura 2.9 – 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.

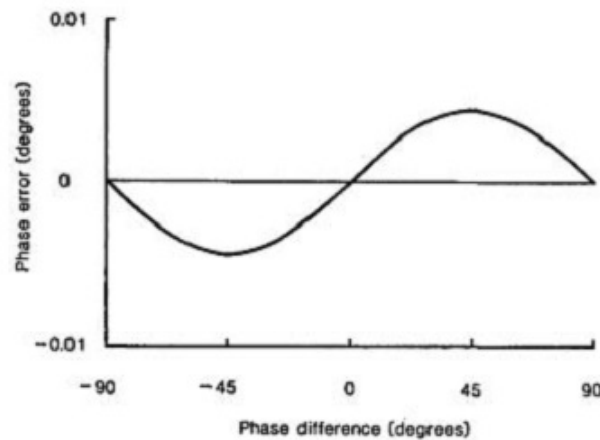


Fonte: Adaptado de Hariharan, Oreb e Eiju (1987)

No primeiro caso, mostrado na Fig. 2.9(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 2.10 mostra que o erro máximo no valor de ϕ neste caso, é inferior a $+ 0.005^\circ$. No segundo caso, mostrado na fig. 2.9 (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. 2.9 (c), é um desvio linear do PZT. Os efeitos de um tal desvio pode também ser eliminado, tendo um segundo

Figura 2.10 – 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:

$$\cos \alpha = \frac{I_5 - I_1}{2(I_4 - I_2)} \quad (2.15)$$

Para evitar erros que surgem quando tanto o numerador e o denominador da Eq. (2.15) 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. (2.9). A gama de

movimento necessário do PZT ($\pm 180^\circ$) também é muito semelhante à que é requerida quando a Eq. (2.9) é usada (HARIHARAN; OREB; EIJU, 1987).

2.6 Dificuldades em se utilizar o método de atuador PZT

A precisão e exatidão da técnica de mudança de fase ótica é crítica e afeta a precisão de medições óticas realizadas utilizando interferômetros de mudança de fase. A precisão de deslocamento de fase ótica é limitado pela características inerentes aos piezo-atuadores (ou PZT), como a não-linearidade, histerese, fluência e derivada térmica. (NYAKANG'O; RURIMO; KARIMI, 2013).

O método de interferometria de mudança de Fase (PSI) tem atraído muita atenção em muitas áreas de aplicações devido a sua alta precisão em medições óticas (HARIHARAN; OREB; EIJU, 1987), (BRUNING et al., 1974).

2.6.1 Problemas de não linearidade do PZT

Técnicas de interferometria por mudança de fase(PSI) têm sido amplamente utilizados em moderno instrumentos de medição de fase. A ideia base da técnica PSI é que, se a diferença de fase entre duas vigas em um interferômetro é feita variar de alguma forma conhecida. em seguida, a fase inicial pode ser derivada a partir de três ou mais medições de intensidade. A forma mais comum para variar a diferença de fase entre duas vigas em um interferômetro é aplicar uma tensão a um (PZT) transdutor piezoelétrico no qual o espelho de referência está montado. A tensão aplicada é um passo de tensão com igual período e igual incremento ou uma rampa de tensão. Em seguida, uma série de quadros interferogramas são amostrados e a distribuição de fases entre o interferograma é determinada. Quase todos os algoritmos de redução de dados atuais associados com esta técnica requer a mudança de fase, mesmo com espaçamento Wyant (1975), Bruning (1978), Koliopoulos (1981), Hayes (1984), Cheng e Wyant (1985a) entre dois quadros exceto uma (GREIVENKAMP, 1984).

A exigência de mudança de fase, mesmo com espaçamento pode ser alcançado, se o PZT é linear com a tensão aplicada. A maioria destes algoritmos tem uma restrição que requer uma mudança de fase igual a $2\pi / N$, em que N é um número inteiro (Wyant (1975), Bruning (1978), Koliopoulos (1981), Hayes (1984)). Se N não é igual a um número inteiro um chamado erro de calibração ocorrerá (Wyant (1975)). Esse erro pode ser diminuído utilizando o algoritmo

de Carré (Carré (1966), Cheng e Wyant (1985a)) ou uma média de duas medições em que a diferença de fase inicial entre as duas medidas é de aproximadamente 90° (WYANT, 1975).

No entanto, deslocamento PZT nem sempre é uma função linear da tensão aplicada. Daí a mudança de fase entre duas amostragens consecutivas não é constante $2\pi / N$. Além disso, a quantidade de deslocamento de fase irá variar para cada uma das N amostragens, isto é, mudança de fase não uniformemente espaçadas. Portanto, o erro na fase medição é introduzido ao usar esses algoritmos que requerem a mudança de fase, mesmo com espaçamento entre duas amostragens. Na prática, a não-linearidade PZT é tão pequena que uma função quadrática é suficiente para descrever o deslocamento PZT (WYANT, 1975).

2.7 Utilização de sistemas microeletrônico para substituir o PZT

Recentemente, houve um interesse crescente na aplicação de técnicas óticas a testes de microestrutura, porque eles são de alta resolução, sem contato, rápido e relativamente barato. Holografia digital também é bem adequada para MEMS caracterização: para imagens 3D e de medições de deslocamento de forma quantitativa (XU et al., 2001). No entanto não se tem conhecimento de qualquer publicação que relata o desenvolvimento do padrão de interferometria de cisalhamento *speckle* eletrônica (ESPSI) para testes de MEMS ou outras investigações em escala microscópica.

ESPSI permite medições diretas de deslocamento derivativos que podem ser feitas com sensibilidade variável (STEINCHEN; YANG, 2003), (SIROHI, 1993). A desvantagem deste simples interferômetro de corte é que o interferograma tem resultados que não podem ser aplicados a baixa visibilidade franja e técnicas de mudança de fase. *Phase-shifting* na shearografia é mais sensível do que a simples shearografia (OWNER-PETERSEN, 1991) e podem fornecer deslocamento de derivadas de parcelas 3D (STEINCHEN; YANG, 2003). O tempo médio das franjas pode ser obtido em shearografia na mesma forma que no padrão de interferometria de *speckle* eletrônico (ESPI) (JONES; WYKES, 1989). Uma vantagem da shearografia é que ela é menos sensível a objetos instáveis e com turbulência do que ESPI, porque duas imagens de cisalhamento lateral interferem umas com as outras, para o interferômetro é quase um caminho comum. Além disso, a sensibilidade do sistema de shearografia é fácil para ajustar, alterando a quantidade de cisalhamento introduzido entre as duas imagens.

2.8 Comparação mecânica da técnica de FEM

Com o propósito de confirmar os resultados obtidos em relação à curva analítica obtida pela técnica de FEM, buscamos embasamento teórico em um trabalho realizado na Ufla, com um propósito de comprovar mecanicamente os resultados obtidos. Como podemos observar em Dias et al. (2016), foi utilizado um sistema com relógio comparador para medir a deformação de uma chapa com as seguintes dimensões: 130 mm x 30 mm x 3,1 mm, sendo uma chapa em aço ASTM A36 de 200 GPa de módulo de Young e $I = 74,5 \text{ mm}^4$.

Na figura 2.11 podemos observar o setup utilizado no referido trabalho.

Figura 2.11 – Setup utilizado no trabalho



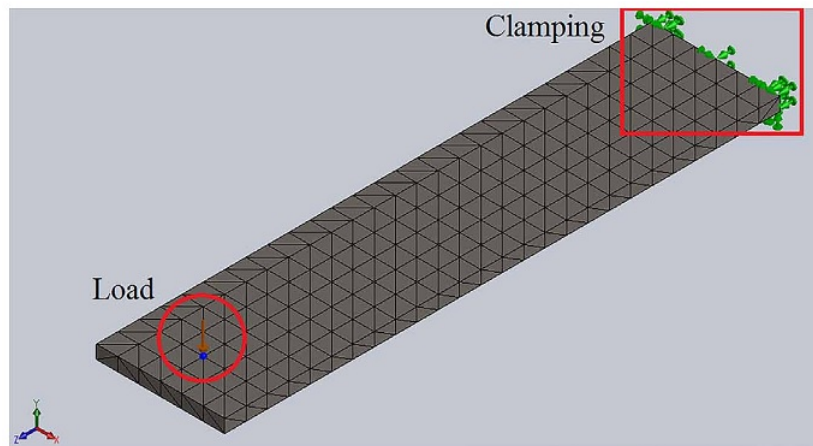
Fonte: Adaptado de Dias et al. (2016)

O modelo de elemento finito utilizado para as simulações foi configurado de acordo com as experiências estabelecidas acima. Foi modelado geometricamente por elementos tetraédricos com 5 mm de cada aresta. A geometria foi modelada e simulações foram realizadas por um software comercial (Solidworks). O modelo tinha um total de 1073 elementos e 2246 nós dispostos em posições pré-definidas, a fim de ter nós coincidentes com pontos de dados experimentais. A Figura 2.12 mostra a malha, incluindo as posições de aperto e de carga.

Como foi possível observar, a curva de deformação teórica, gerada sob uma deformação de 19,6 N foi relativamente igual à curva teórica obtida neste presente trabalho, fig. 2.13.

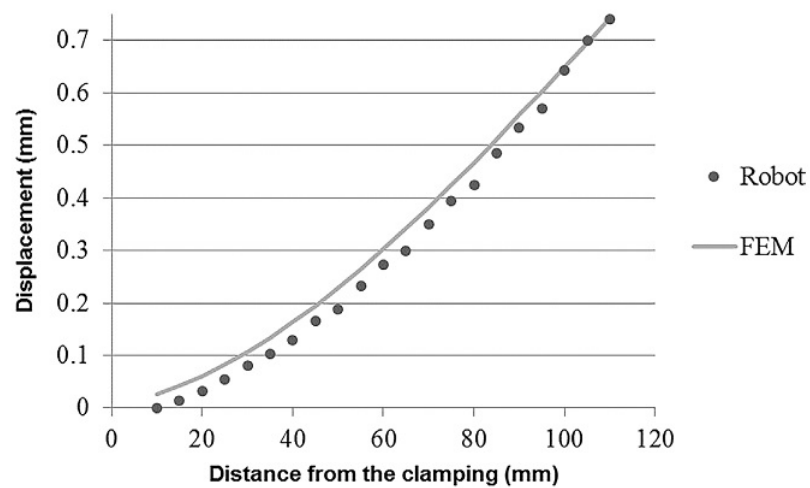
De acordo com Dias et al. (2016), comparando-se o resultados da técnica proposta com dados de Elementos Finitos, observou-se que quanto menor for o valor da carga, mais precisos serão os resultados. Esta sensibilidade demonstrada pela técnica de medição proposta quando

Figura 2.12 – Exemplo da modelagem utilizada no trabalho



Fonte: Adaptado de Dias et al. (2016)

Figura 2.13 – Curva teórica (FEM) comparada com a curva de deformação medida pelo robô, por meio do relógio comparador



Fonte: Adaptado de Dias et al. (2016)

comparada com os resultados de FEM, mostram a potencialidade da técnica, especialmente para cargas mais baixas.(??)

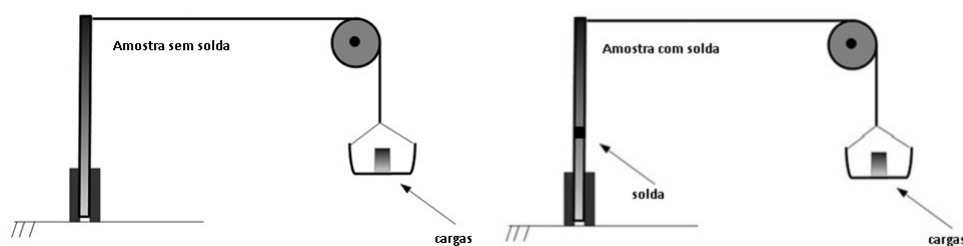
3 MATERIAIS E MÉTODOS

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

3.1 Amostra

A amostra utilizada para provar a hipótese de *phase-shifting* implementado de forma digital foi uma viga cantilever (Figura 3.1). A viga cantilever da imagem teve as dimensões de 30 x 100 mm, feita de aço estrutural A-36 e com módulo de Young de $E = 200GPa$, e um coeficiente de *Poisson* 0,32. Duas chapas foram utilizadas, uma chapa inteira, e outra chapa contendo um cordão de solda de espessura de 2,5 mm.

Figura 3.1 – amostra da viga com e sem solda



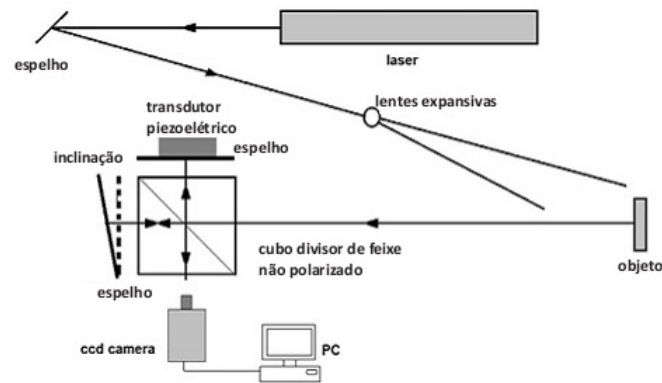
Fonte: Adaptado de Braga et al. (2016)

Basicamente dois experimentos foram realizados, a fim de comparar o método proposto para a abordagem ótica tradicional. O primeiro ensaio foi verificar a variabilidade dos métodos sob repetições e o segundo a sensibilidade sob uma gama de deformações, a partir de 19 g. a 90 g.

3.2 Configuração experimental

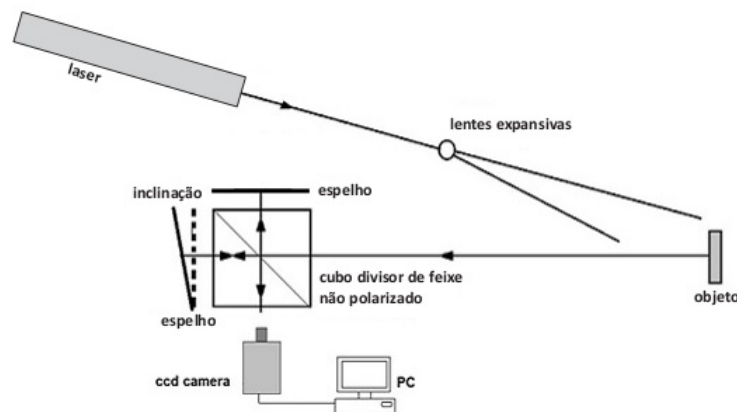
A Figura 3.2 representa a instalação experimental utilizada para proporcionar a deformação das amostras e a aquisição de imagem. Um feixe de laser de He-Ne polarizado linearmente (632.8 nm, 30 mW) foi usado.

O trabalho em seu propósito tentar comparar duas técnicas de Shearografia, para tal fim, a primeira parte do experimento foi realizada na *Universidad Valencia*, pelo Prof. Dsc. Rolando de J. González-Peña, utilizando a montagem a seguir:

Figura 3.2 – Setup *Digital Speckle Shearing Pattern Interferometry*

Fonte: Adaptado de Braga et al. (2016)

Para a segunda etapa do trabalho foi utilizado a montagem descrita na figura 3.3, sem a utilização do transdutor piezoelétrico, mas adotando as mesmas condições dos demais aparelhos:

Figura 3.3 – 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 $12,35\mu m$.

O phase-shift analógico foi realizado utilizando um PZT (modelo STR-25, Piezomechanik GMBH; Max 500V tensão e $3\mu m$). O ângulo de incidência do feixe de laser sobre o PZT / espelho (em frente da câmara CCD) foi perpendicular ao espelho (Fig 3.3). A mudança necessária para criar o deslocamento da franja de $\frac{\pi}{2}$ foi $0.0791\mu m$, o que significa que um fornecimento de voltagem de 13.1833 V no PZT.

3.2.1 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. 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*;
- 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.

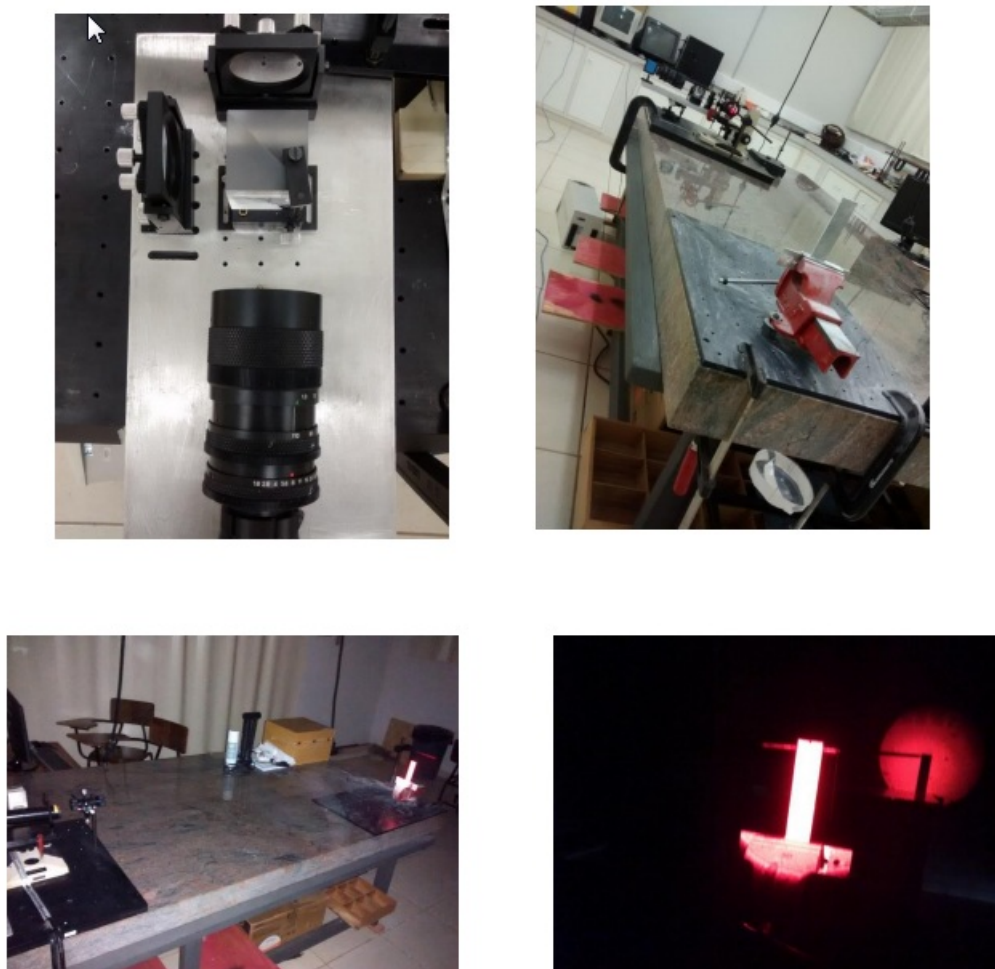
3.3 Ensaio experimental

3.3.1 Obtenção das imagens

Após a calibração do sistema, partimos para o primeiro ensaio experimental utilizando uma viga em aço estrutural A36. Para isso, engastou-se a viga na morsa e, através do software *Real Time Deformation (RTD)* desenvolvido no CEDIA especialmente para essa aplicação, verificou-se a ocorrência de franjas de interferência ao longo da viga quando a mesma era submetida à deformações por meio da aplicação dos pesos de laboratório. A interface do software é mostrada abaixo.

Para a obtenção das franjas, primeiramente definiu-se como imagem de referência aquela sem a aplicação de cargas (imagem no canto superior direito). Conforme mostrado na Figura 3.5, essa imagem é chamada de *Reference Image*. Logo após, posicionou-se o peso sobre o suporte em forma de cesta acoplado à viga por meio de uma linha amarrada em sua extremidade livre (vide Figura 3.4), gerando um deslocamento devido à aplicação da carga. A imagem no

Figura 3.4 – Diferentes vistas do interferômetro de Michelson



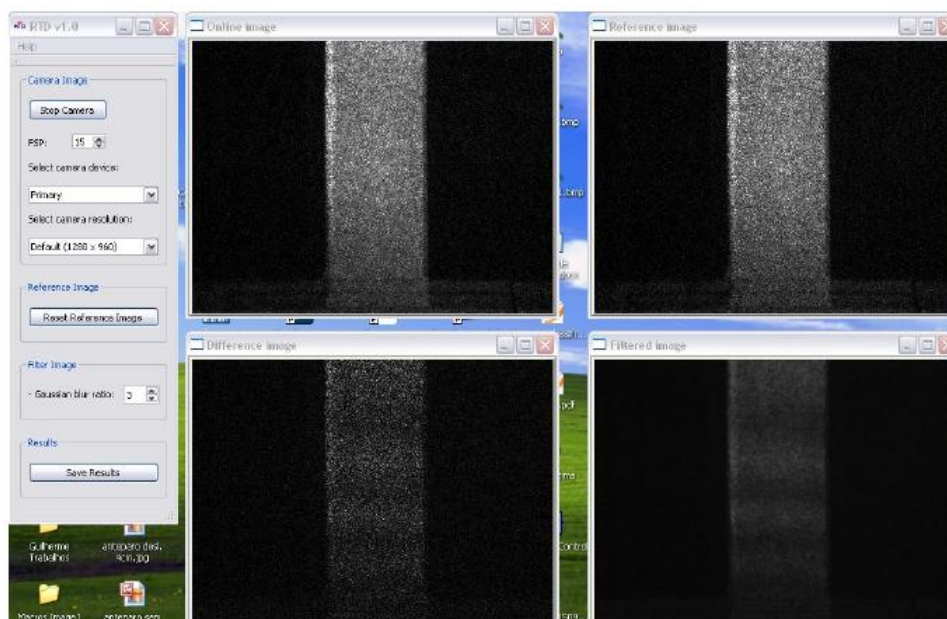
Fonte: Dados da pesquisa

canto superior esquerdo (Online Image) é a imagem em tempo real com a aplicação da carga. As duas imagens no canto inferior são a diferença entre a imagem online e a de referência, sendo que a no canto inferior direito ainda passa por um filtro gaussiano de raio especificado na janela de configurações no canto esquerdo da tela.

Nesta análise foram utilizados três testes com filtro de 10,12 e 17, com o propósito de verificar qual o melhor filtro. Os resultados serão comentados na seção "Resultados".

Efetuada a subtração das imagens, as franjas de interferência apresentadas ao longo da viga aparecem devido à correlação de *speckle* e representam a derivada dos campos de deslocamentos, ou seja, a variação da deformação superficial ocorrida na viga.

Figura 3.5 – Interface do software Real Time Deformation



Fonte: Dados da pesquisa

3.3.2 Detecção de franjas

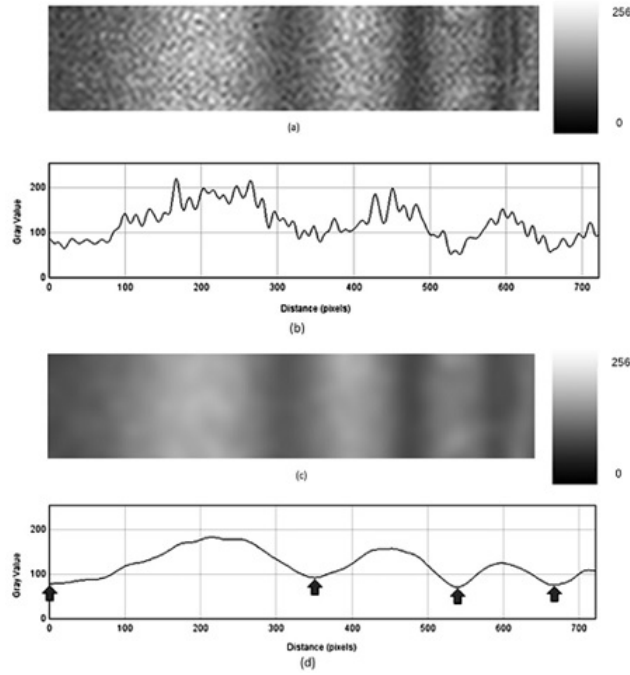
O primeiro passo antes de detecção de franjas foi o estágio de pré processamento que consiste em converter as imagens para 8 bits em tons de cinza (ou seja, 256 níveis de cinza) e executar um filtro Gaussian Blur para reduzir o ruído presente nas imagens de entrada na sua maioria causadas pelos grãos speckles.

A detecção de franjas foi extraída com base nas informações de imagem de entrada e a partir de uma franja foi considerado como uma parcela entre duas listras escuras. A linha de separação entre cada franja foi obtida encontrando o mínimo local. A Figura 3.6(a) mostra o ruído sobre as franjas e em Figura 3.6(b) é possível ver o perfil de uma linha de centro a partir da imagem da Figura 3.6(a).

Após a aplicação de um filtro *Gaussian Blur* (Figura 3.6(c)), é possível ver a imagem original depois do filtro e na Figura 3.6(d) o perfil de uma linha central com o mínimo local apontado por um flecha.

Após detecção, cada mínimo local foi considerado como ponto central de uma franja (F) e utilizada como parâmetro para a fase de deslocamento. O conceito de tamanho de franjas (FS) foi criada e definida como a distância entre duas franjas em pixels. A Equação 20 mostra como ele é calculado, considerando Fi como uma franja F de índice i .

Figura 3.6 – Imagem de franjas em uma viga cantilever (a) com o ruído e (b) o perfil de uma linha longitudinal em escala de cinza; (C) a imagem após um filtro *Gaussian Blur*(sigma = 10) e (d) o perfil de uma linha longitudinal em escala de cinza.



Fonte: Adaptado de Braga et al. (2016)

$$FS_i = F_{i+1} - F_i \quad (3.1)$$

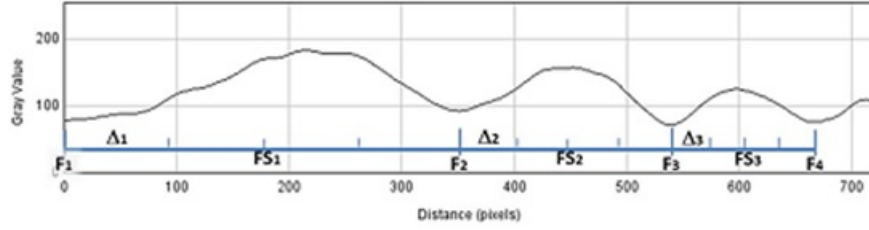
A mudança de uma fase (Δ) é $\frac{\pi}{2}$ e foi relacionado a cada mínimo local em pixels. Contudo, o comprimento do deslocamento é a diferença entre franjas, portanto, há uma mudança para cada franja, onde o índice i de Δi representa a distância da franja (FS_i) e que foi gerada na nova imagem deslocada (Eq. 21).

$$\Delta i = \frac{FS_i}{4} \quad (3.2)$$

Os parâmetros utilizados no cálculo de deslocamento de fase estão apresentados na Figura 3.7.

A eleição da maneira mais simples para detectar as franjas está de acordo com o objetivo do presente trabalho, que era simplificar o método de *phase-shifting* de correlação de franjas. A adoção de outros métodos avançados de identificação certamente melhoram nossa proposta, apesar da resposta fornecida nos resultados alcançados ser fiável.

Figura 3.7 – Parâmetros do algoritmo de *Phase-shift*.



Fonte: Adaptado de Braga et al. (2016)

3.3.2.1 Geração de franjas com Phase-shift digital

Todo o processo foi feito começando com uma imagem de entrada, que corresponde à imagem sem deslocamento. Após a detecção e cálculo dos parâmetros extraídos a partir desta imagem, o processo de mudança foi efetuado.

A geração de uma de uma mudança de ordem $j\frac{\pi}{2}$ (onde $j = 1, 2, 3$) é seguido pelo deslocamento e redimensionamento na nova imagem. Equação 22 mostra a nova posição da franja (NF_i) obtida depois de um deslocando com base no delta obtido anteriormente.

Como mencionado, cada fator de deslocamento de uma franja na nova imagem é diferente, e isto pode causar a perda de informação por franjas sobrepostas. Portanto, para evitar este problema, é necessário redimensionar cada franja antes do seu posicionamento na nova imagem. O processo de redimensionamento leva em conta o novo tamanho franja (NFS_i), calculado pela equação 23. O redimensionamento é produzido digitalmente por uma interpolação bilinear.

$$NF_i = F_i + J\Delta_i \quad (3.3)$$

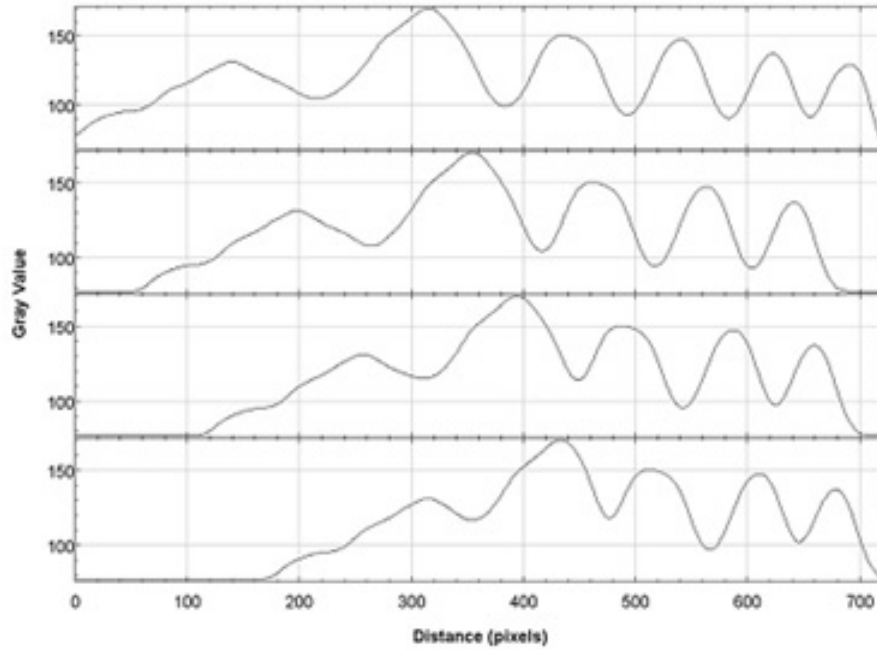
para $J = \{1, 2, 3\}$

$$NFS_i = \frac{FS_i - J\Delta_i + J\Delta_{i+1}}{FS_i} \quad (3.4)$$

para $J = \{1, 2, 3\}$

Cada valor de j gera uma ordem de mudança ($j\frac{\pi}{2}$), criando três novas imagens no final de o processo ($\frac{\pi}{2}$, π e $\frac{3\pi}{2}$ respectivamente). Todo o processo de *phase-shift digital* pode ser visualizado na Figura 3.8, a partir do padrão de franjas inicial, sem deslocar, o perfil do linha central. O outro deslocamento pode ser visto na Figura 3.8 representando a linha central de uma mudança digital de $\frac{\pi}{2}$, π e $\frac{3\pi}{2}$ respectivamente.

Figura 3.8 – perfis eixo de imagens após a mudança de fase digital, em que o primeiro perfil representa 0 ° deslocamento, o segundo deslocamento de 90 °, a terceira mudança de 180 ° e o quarto deslocamento 270 °.



Fonte: Adaptado de Braga et al. (2016)

3.3.3 Processamento digital

Após capturar a imagem com as franjas, é necessário toda uma série de processamentos digitais afim de analisarmos quantitativamente o campo de deformações.

O primeiro passo é calcular a fase da interferência entre as duas frentes de ondas a qual foi capturada pela câmera CCD em forma de intensidade I . Porém, para aumentar sua resolução espacial, é usada nessa medição a técnica temporal de fase com salto fixo de $\frac{\pi}{2}$;

Ou seja, serão necessárias 4 imagens com franjas de interferência defasadas de 90 para realizar o cálculo da fase segundo a fórmula:

$$\Phi_i(x, y) = \arctan \frac{\partial i, 4(x, y) - \partial i, 2(x, y)}{\partial i, 1(x, y) - \partial i, 3(x, y)} \text{ com } i = A, B \quad (3.5)$$

A forma mais utilizada de se obter essas 4 imagens é utilizando um piezoelétrico acoplado ao espelho, transladando-o de acordo com o nível de tensão gerado até se obter um salto de fase de 2π (ausência de movimento de franjas).

Porém, como não temos tal instrumento, tornou-se necessário a geração virtual das outras imagens com salto de fase de $\frac{\pi}{2}$ a partir de uma única imagem capturada (salto de fase 0). Para isso, foi utilizado o software Fiji, por meio de um código implementado especificamente

para tal aplicação. Dessa maneira, foi possível gerar as 4 imagens com a defasagem das franjas e, por meio delas, fazer o cálculo da fase.

Em sequência, com as 4 imagens geradas, o próximo passo foi plotar a imagem com o perfil da viga em função do seu campo de deformações. Nessa etapa, foi utilizado um código implementado no software SCILAB, por meio do *toolbox SIP (Scilab Image Processing)*, o qual nos permitiu a obtenção de um mapeamento do campo de deformações do material para futuras análises e comparações.

O processo de mudança de fase digitais consiste em duas partes, a primeira responsável pelo pré-processamento de imagens e detecção de franjas e a segunda relacionada com a geração de três imagens, correspondendo para $\frac{\pi}{2}$, π e $\frac{3\pi}{2}$ da mudança de fase.

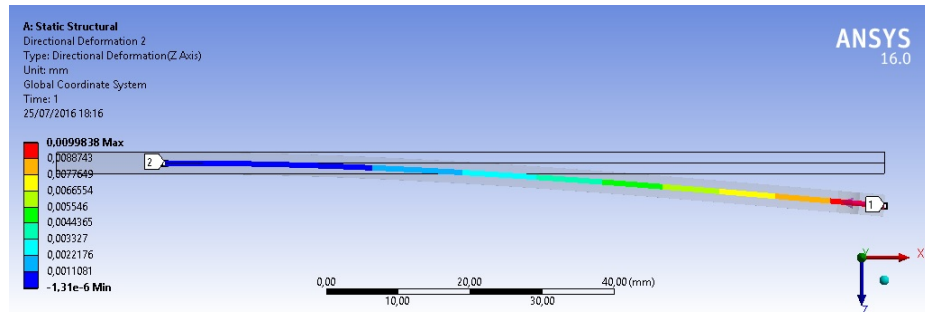
As imagens utilizadas no processo foram agrupadas de forma a considerar a porção que importa para o processo. As imagens da viga tinham as dimensões de 154 pixels de largura e 724 pixels de altura.

Todo o processo foi executado utilizando o software ImageJ e automatizado usando uma macro característica (ABRÀMOFF; MAGALHÃES; RAM, 2004). Equação 19 representa o processamento de uma das quatro imagens, depois das comparações (HIPPE et al., 2004b), (YOSHIZAWA, 2009).

3.4 Análise e comparação adicional de elementos finitos

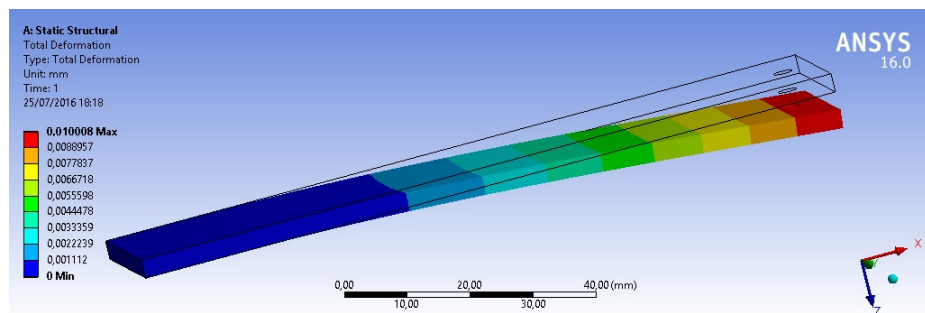
A deformação observada pelo interferômetro usando um PZT e a fase de deslocamento digitais proposto foi comparado com uma análise simulada de Elemento finitos(FEM). A viga cantilever foi modelada usando uma malha de hexaedro tridimensional de 128.600 elementos e 494.503 nós. As mesmas cargas foram aplicadas na simulação, e a informação foi obtida a partir do ponto neutro no eixo do modelo da viga cantilever, conforme podemos observar nas figuras abaixo.

Figura 3.9 – Modelagem efetuado no software Ansys 16, com o objetivo de obter a curva de deformação teórica - chapa sem solda



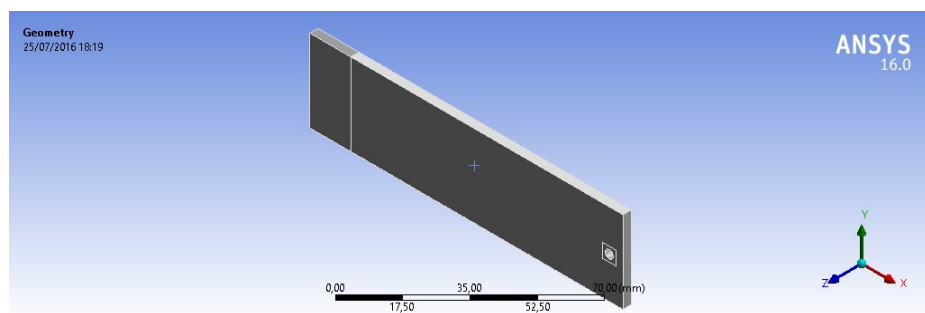
Fonte: Dados da pesquisa

Figura 3.10 – Modelagem efetuado no software Ansys 16, com o objetivo de obter a curva de deformação teórica - chapa sem solda



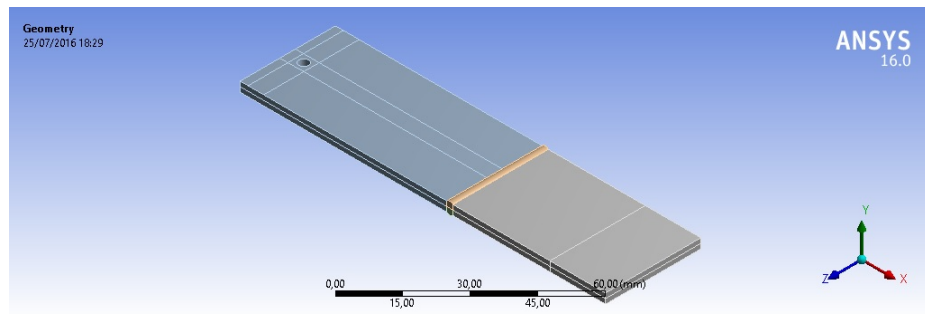
Fonte: Dados da pesquisa

Figura 3.11 – Modelagem efetuado no software Ansys 16, com o objetivo de obter a curva de deformação teórica - chapa sem solda



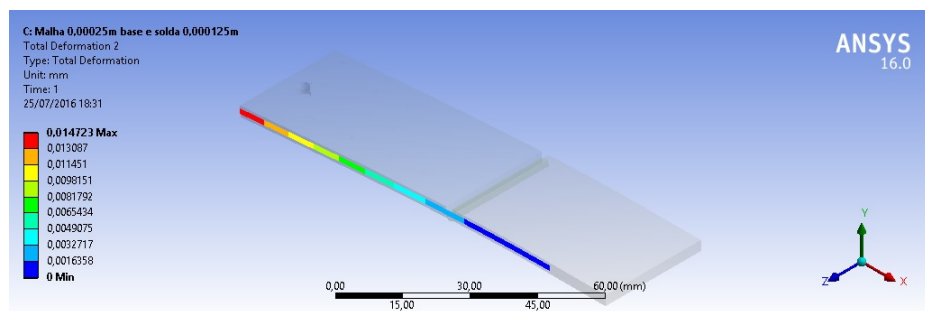
Fonte: Dados da pesquisa

Figura 3.12 – Modelagem efetuado no software Ansys 16, com o objetivo de obter a curva de deformação teórica - chapa com solda



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 3.13 – Modelagem efetuado no software Ansys 16, com o objetivo de obter a curva de deformação teórica - chapa com solda



Fonte: Dados da pesquisa

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A criação digital de Phase-shifting apresentou resultados confiáveis com a repetibilidade e a sensibilidade em comparação com o método tradicional usando o PZT ou dispositivos semelhantes. A principal limitação do uso desta metodologia proposta é a restrição para franjas paralelas, ou bastante paralelas, tal como em uma viga a ser testado o módulo de Young. A adoção de franjas irregulares exigirá o processamento em duas dimensões que é viável, se associada a uma metodologia tal como que aqui proposto. A suposição de que as franjas interpoladas variam linearmente não apresenta uma grande limitação, uma vez que as distâncias das franjas originais foram respeitadas. Além disso, os resultados mostraram que a qualidade final das curvas foi comparável ao uso de um PZT. Além disso, a adoção viável da interpolação mais simples aumenta o potencial do método proposto quando os mais sofisticados métodos de interpolação de uma opção de leitura.

Apesar do custo reduzido da técnica proposta, o qual torna acessível a um maior número de usuários, a sua adoção quando apenas uma franja pode ser adquirida, tal como no caso de aplicação do laser pulsado, ou quando é necessário monitorar um objeto sob o movimento, justifica a sua aplicação.

É possível observar a maior variação criada pelo análogo da *phase-shift* digital do que pelo PZT, o que pode ser explicado pelas dificuldades relacionadas com a configuração do PZT e atuação com repetibilidade nas três mudanças de $\frac{\pi}{2}$.

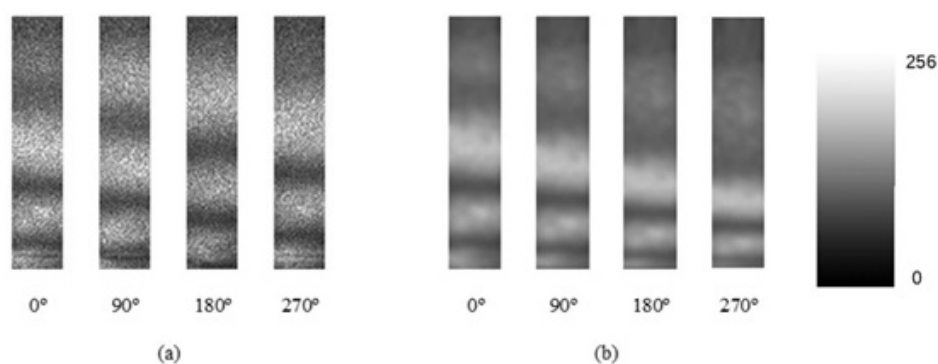
A adoção de PZT, a fim de se criar quatro imagens deslocadas no processo de *phase-shifting*, pode comprometer os resultados esperados na teoria. E há muitos fatores que podem ser isolado ou em conjunto que influenciam um posicionamento errado do espelho. Um dos erros pode ser atribuído ao tamanho do espelho relacionado com a força de PZT e a sua capacidade para restaurar a posição inicial. Este é conhecido como deslocamento residual, e deve ser evitado. Outro fator chave ligado ao trabalho PZT está relacionada com a sua calibração, ou por outras palavras, o ajustamento do seu movimento em relação à tensão aplicada. Uma vez que é necessária uma tensão de magnitude 13.1833 V para inclinar o espelho e mudar as franjas em 90 °, os valores obtidos pela fonte variaram de ± 0.031 V ($\pm 23\%$) relacionada com uma resolução de 14 bits.

Caso contrário, a adoção do *phase-shifting* digital apresenta melhores resultados do que usando PZT, uma vez que o deslocamento é criado usando o centro das franjas na imagem privilegiada, com o deslocamento limitado apenas pelos pixels da câmara.

Além, a configuração adotada para realizar as experiências foram com base no procedimento de PZT, o que significa que, quando apenas o *phase-shifting* digital é adotado, a instalação pode ser melhorada a fim de permitir que as franjas estejam bem posicionadas na imagem. Assim, evitando alguns erros principalmente nas extremidades da viga cantilever aumentando ainda mais o deslocamento digital da proposta.

Na Fig. 4.1, as franjas na viga cantilever são causadas por uma carga de 45 g apresentando visualmente o mesmo comportamento para ambos os procedimentos.

Figura 4.1 – Franjas em uma viga cantilever com uma carga de 45 g de (a) PZT phase-shift e (b) de deslocamento de fase digital.

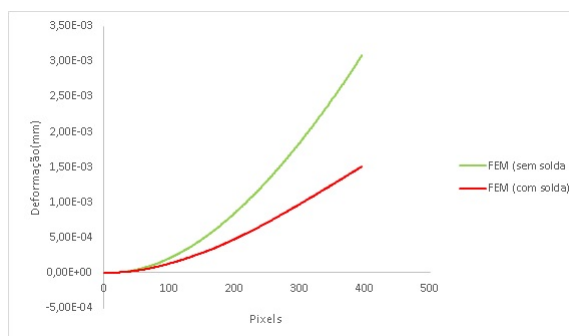


Fonte: Dados da pesquisa

4.1 Análise de comparação utilizando a técnica de FEM comparando a curva teórica de deformação da chapa sem solda e da chapa com solda

Nesta análise foram comparadas as curvas analíticas utilizadas neste trabalho, com o objetivo de mostrar as suas variações.

Figura 4.2 – Comparação das curvas teóricas de deformação Chapa sem solda x chapa com solda



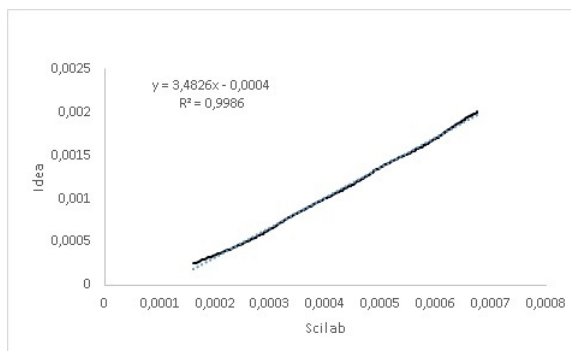
Fonte: Dados da pesquisa

Por esta análise podemos comparar as duas curvas de deformação, e verificar que a deformação da chapa sem solda gera uma curva mais acentuada, e a chapa com solda, gera uma curva menos acentuada, o que nos leva a constatar que a rigidez causada pela solda, torna a deformação um pouco menor na chapa com solda.

4.2 Comparação dos resultados entre *Phase shift digital* obtido pelo Idea x Image J, com uma função Linear

Na figura 4.3 podemos analisar os resultados confrontando-os com uma função Linear, obtendo um valor para $R^2 = 0,998$.

Figura 4.3 – Comparação do *Phase shift digital* utilizando valores obtidos no Cedia e processados pelo software Idea x Scilab na chapa sem solda



Fonte: Dados da pesquisa

Com base neste valores podemos afirmar neste ponto do trabalho que a utilização da técnica de *Phase shift Digital* pode ser aplicada tanto utilizando o software IDEA, quanto utilizando a macro do software Image J.

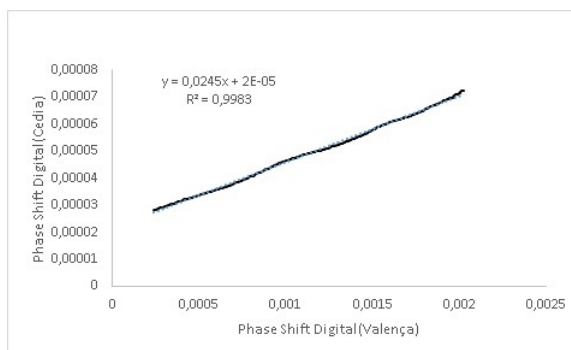
4.3 Comparação dos resultados entre *Phase shift digital* obtido pelo Idea, utilizando dados obtidos em Valencia e no Cedia com uma função Linear

Na figura 4.4 podemos analisar os resultados confrontando-os com uma função Linear, obtendo um valor para $R^2 = 0,998$.

E na figura 4.5 podemos analisar os resultados confrontando-os com uma função Linear, obtendo um valor para $R^2 = 0,944$.

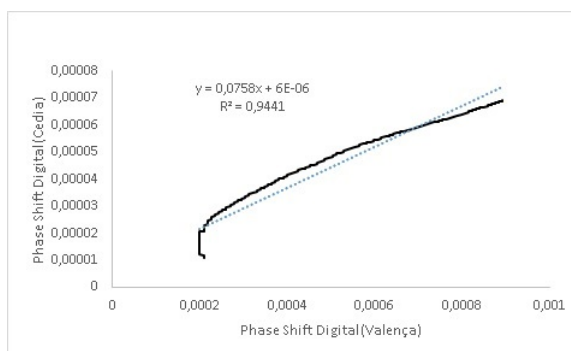
Com base neste valores podemos afirmar neste ponto do trabalho que a utilização da técnica de *Phase shift Digital* pode ser aplicada em vários locais diferentes, obtendo praticamente os mesmos valores.

Figura 4.4 – Comparação do *Phase shift* digital utilizando valores obtidos no Cedia x Valores obtidos em Valencia e processados pelo software Idea na chapa sem solda



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 4.5 – Comparação do *Phase shift* digital utilizando valores obtidos no Cedia x Valores obtidos em Valencia e processados pelo software Idea na chapa com solda



Fonte: Dados da pesquisa

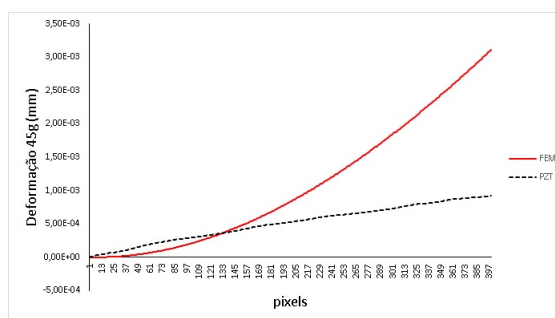
4.4 Testes realizados em chapa sem solda

4.4.0.1 Análise de deformação utilizando a técnica de PZT x a técnica de FEM (Analítico)

Nesta parte da análise foi utilizada uma chapa em aço A36, conforme descrito na seção "Materiais e métodos", fig. 3.1. Os testes foram realizados no laboratório da Universidad Valencia, pelo professor Dsc. Rolando de J. González-Peña, co-orientador deste trabalho, pelo motivo da falta do atuador Piezoelétrico nos Laboratórios do CEDIA-Ufla, motivo também ao qual se justifica boa parte deste trabalho.

Na Fig. 4.6 é possível ver os valores de deformação numa viga de aço medido pela *digital speckle shearing pattern interferometry* utilizando um PZT para fornecer a fase de deslocamento, e usando a geração de mudança de fase digital quando uma carga de 45 g foi aplicada, em conformidade com Fig. 3.2. Também na Fig. 4.6, é possível ver a curva teórica da viga deformada como uma comparação.

Figura 4.6 – Comparação PZT x FEM (Sem Solda) 45 g

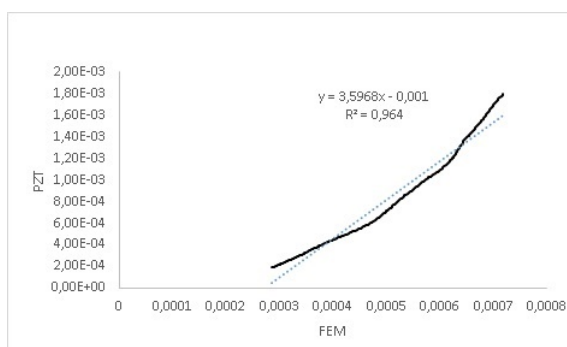


Fonte: Dados da pesquisa

Com base nesta comparação notou-se uma certa diferença entre as curvas de valores de deformação obtidos por meio da técnica de mudança de fase pelo PZT se comparada à curva teórica, obtida por meio de análise de elementos finitos.

Na figura 4.7 podemos analisar os resultados confrontando-os com uma função Linear, obtendo um valor para $R^2 = 0,964$.

Figura 4.7 – Comparação do PZT x FEM, chapa sem solda, utilizando uma função Linear



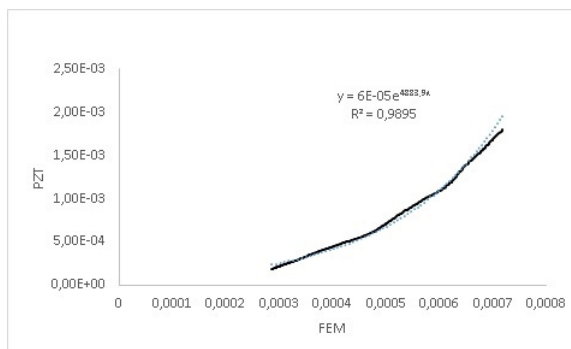
Fonte: Dados da pesquisa

Já na figura 4.8 podemos analisar os resultados confrontando-os com uma função Exponencial, obtendo um valor para $R^2 = 0,989$.

4.4.0.2 Análise de deformação utilizando a técnica de *Phase shift digital* x a técnica de FEM (Analítico)

Nesta parte da análise foi utilizada uma chapa em aço A36, conforme descrito na seção "Materiais e métodos", fig. 3.1. Os testes foram realizados no laboratório 4 do CEDIA - UFLA (DEG) utilizando uma configuração um pouco diferente da utilizada nos testes utilizando o PZT, deixando de utilizar o atuador piezoelétrico.

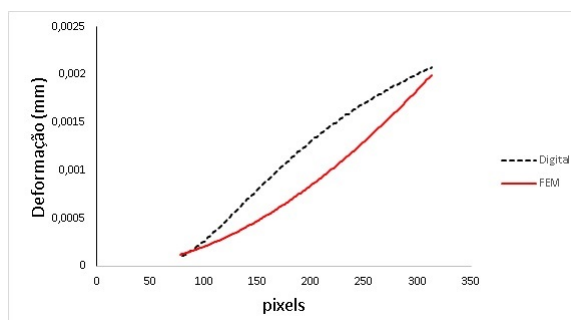
Figura 4.8 – Comparação do PZT x FEM, chapa sem solda, utilizando uma função exponencial



Fonte: Dados da pesquisa

Na Fig. 4.9 é possível ver os valores de deformação numa viga de aço medido pela *digital speckle shearing pattern interferometry* utilizando um *Phase Shift Digital* para fornecer a fase de deslocamento, quando uma carga de 45 g foi aplicada, em conformidade com Fig. 3.3. Também na Fig. 4.9, é possível ver a curva teórica da viga deformada como uma comparação.

Figura 4.9 – Comparação Digital x FEM (Sem Solda) 45 g



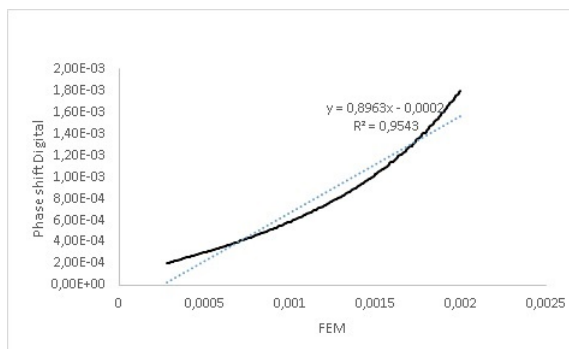
Fonte: Dados da pesquisa

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 4.10 podemos analisar os resultados confrontando-os com uma função Linear, obtendo um valor para $R^2 = 0,954$.

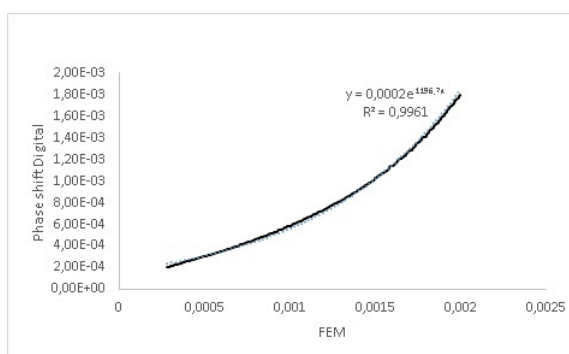
Já na figura 4.11 podemos analisar os resultados confrontando-os com uma função Exponencial, obtendo um valor para $R^2 = 0,996$.

Figura 4.10 – Comparação do *Phase shift* digital x FEM, chapa sem solda, utilizando uma função Linear



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 4.11 – Comparação do *Phase shift* digital x FEM, chapa sem solda, utilizando uma função exponencial



Fonte: Dados da pesquisa

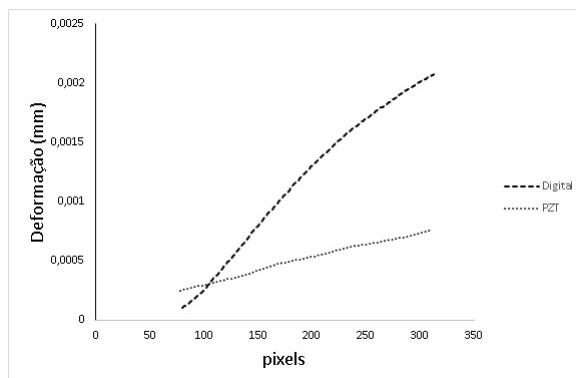
4.4.0.3 Análise de deformação utilizando a técnica de *Phase shift digital* x a técnica de PZT

Nesta parte da análise chegamos no momento de comparar diretamente os resultados das duas técnicas, PZT x *Phase shift digital*, utilizando o mesmo material, chapa em aço A36 conforme seção "Materiais e métodos", e mesmas condições de iluminação e ruídos.

Na Fig. 4.12 é possível ver os valores de deformação numa viga de aço medido pela *digital speckle shearing pattern interferometry* utilizando um PZT para fornecer a fase de deslocamento, e usando a geração de mudança de fase digital quando uma carga de 45 g foi aplicada, em conformidade com Fig. 3.2 e 3.3. Também na Fig. 4.12, é possível ver os valores de deformação da viga utilizando o *phase shift digital* como uma comparação.

Por meio desta comparação notou-se uma certa diferença entre as curvas de valores de deformação obtidos através da técnica de mudança de fase pelo PZT se comparada à técnica de *phase shift digital*.

Figura 4.12 – Comparação PZT x Digital (Sem Solda) 45 g.



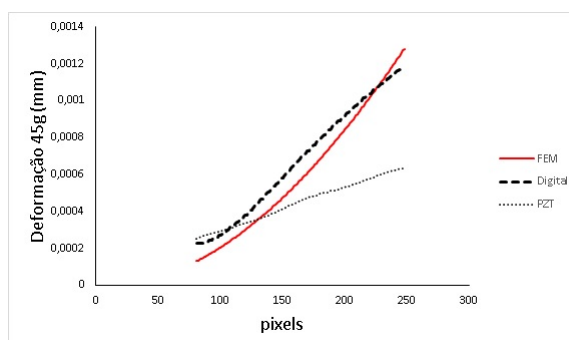
Fonte: Dados da pesquisa

4.4.1 Análise de deformação utilizando a técnica de *Phase shift digital* x a técnica de PZT x FEM (Analítico)

Nesta parte da análise foram comparados os resultados obtidos anteriormente, utilizando as técnicas de PZT e *Phase shift digital* com os resultados obtidos através da análise de elementos finitos (FEM) que foram considerados como parâmetro analítico deste trabalho.

Na Fig. 4.13 é possível ver os valores de deformação numa viga de aço medido pela *digital speckle shearing pattern interferometry* utilizando um PZT para fornecer a fase de deslocamento, e usando a geração de mudança de fase digital quando uma carga de 45 g foi aplicada, em conformidade com Fig. 3.2 e 3.3. Também na Fig. 4.13, é possível ver os valores de deformação da viga utilizando o *phase shift digital*, além dos valores da curva teórica de deformação obtida por meio do FEM.

Figura 4.13 – Comparação PZT x Digital x FEM (Sem Solda) 45 g



Fonte: Dados da pesquisa

Com base nesta comparação notou-se uma maior proximidade da curva de valores obtidos por meio da técnica de *phase shift digital* em relação à curva teórica, o que sugere maior eficácia da técnica de *Phase shift digital* em relação à técnica de PZT.

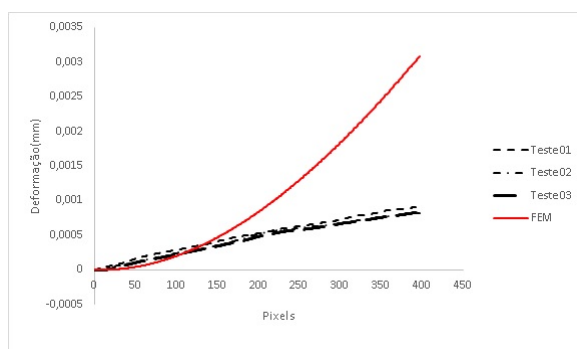
4.4.2 Análise de repetição utilizando a técnica PZT

Por ser uma técnica altamente sensível, umas das grandes preocupações foi justamente a verificabilidade da possibilidade de se repetir a técnica obtendo-se resultados semelhantes.

Para se constatar tal resultado, tanto nos testes realizados no laboratório da Universidad Valencia, quanto nos testes realizados no laboratório 4 do CEDIA - UFLA, foram adquiridas tres análises utilizando os pesos mencionados, conforme segue abaixo

Na Fig. 4.14 é possível ver os valores de deformação de uma viga de aço A36 medida pela *digital speckle shearing pattern interferometry* utilizando um PZT para fornecer a fase de deslocamento com a chapa sem solda.

Figura 4.14 – Curvas de deformação de uma viga cantilever de aço A36, sem solda, deformada três vezes por uma carga de 45 g medida por *digital speckle shearing pattern interferometry* utilizando um PZT para fornecer a fase de deslocamento



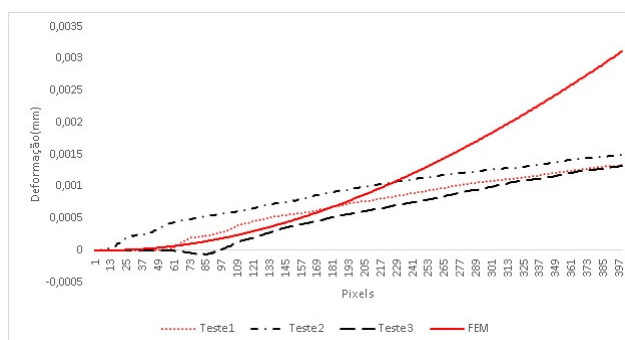
Fonte: Dados da pesquisa

4.4.3 Análise de repetição utilizando a técnica de *Phase shift digital*

Nesta parte dos resultados são comparados os resultados por meio de repetições. Os testes foram realizados utilizando-se pesos de 45 g nas três análises. Cada teste foi realizado com uma configuração diferente de filtro gaussiano, com o objetivo de verificar qual a melhor configuração. As análises utilizaram filtro 10, 12 e 17 respectivamente. Ao final foi possível constatar que o filtro 10 obteve melhor resultado, sendo este escolhido como parâmetro neste trabalho.

Na Fig. 4.15 é possível ver os valores de deformação de uma viga de aço A36 medida pela *digital speckle shearing pattern interferometry* utilizando um *Phase Shift Digital* para fornecer a fase de deslocamento com a chapa sem solda.

Figura 4.15 – Curvas de deformação de uma viga cantilever de aço A36, sem solda, deformada três vezes por uma carga de 45 g medida por *digital speckle shearing pattern interferometry* utilizando a geração de mudança de fase digital



Fonte: Dados da pesquisa

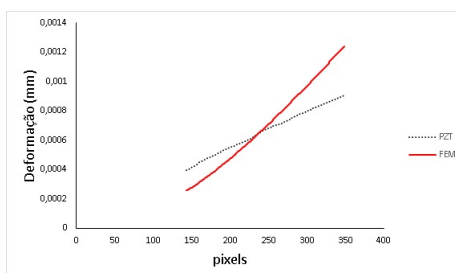
4.5 Testes realizados em chapa com solda

4.5.1 Análise de deformação utilizando a técnica de PZT x a técnica de FEM (Analítico)

Nesta parte da análise foi utilizada uma chapa em aço A36, conforme descrito na seção "Materiais e métodos", fig. 3.1. Os testes foram realizados no laboratório da Universidad Valencia, pelo professor Dsc. Rolando de J. González-Peña, co-orientador deste trabalho, pelo motivo da falta do atuador Piezoelétrico nos Laboratórios do CEDIA-Ufla, motivo também ao qual se justifica boa parte deste trabalho.

Na Fig. 4.16 é possível ver os valores de deformação numa viga de aço medido pela *digital speckle shearing pattern interferometry* utilizando um PZT para fornecer a fase de deslocamento, e usando a geração de mudança de fase digital quando uma carga de 45 g foi aplicada, em conformidade com Fig. 3.2. Também na Fig. 4.16, é possível ver a curva teórica da viga deformada como uma comparação.

Figura 4.16 – Comparação PZT x FEM (Com Solda) 45 g

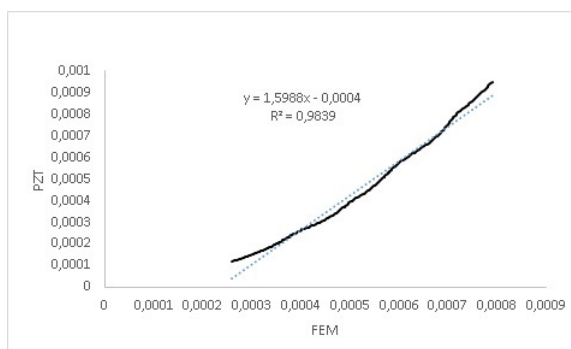


Fonte: Dados da pesquisa

Como foi possível notar, o teste utilizando uma chapa com solda, se mostrou mais próximo do resultado da curva analítica, indicando neste caso, melhor resultado da chapa com solda, utilizando a técnica do PZT.

Na figura 4.17 podemos analisar os resultados confrontando-os com uma função Linear, obtendo um valor para $R^2 = 0,983$.

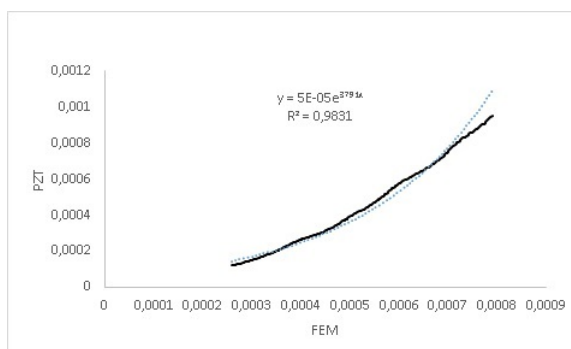
Figura 4.17 – Comparação do PZT x FEM, chapa com solda, utilizando uma função Linear



Fonte: Dados da pesquisa

Já na figura 4.18 podemos analisar os resultados confrontando-os com uma função Exponencial, obtendo um valor para $R^2 = 0,983$.

Figura 4.18 – Comparação do PZT x FEM, chapa com solda, utilizando uma função exponencial

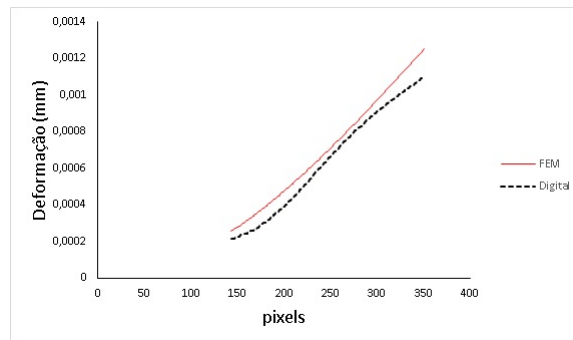


Fonte: Dados da pesquisa

4.5.2 Análise de deformação utilizando a técnica de *Phase shift digital* x a técnica de FEM (Analítico)

Na Fig. 4.19 é possível ver os valores de deformação numa viga de aço medido pela *digital speckle shearing pattern interferometry* utilizando um *Phase Shift Digital* para fornecer a fase de deslocamento, quando uma carga de 45 g foi aplicada, em conformidade com Fig. 3.3. Também na Fig. 4.19, é possível ver a curva teórica da viga deformada como uma comparação.

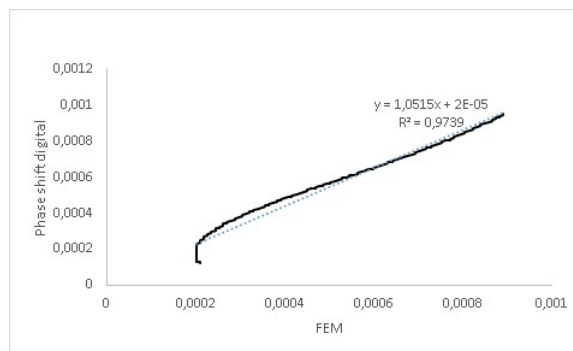
Figura 4.19 – Comparação Digital x FEM (Com Solda) 45 g



Fonte: Dados da pesquisa

Na figura 4.20 podemos analisar os resultados confrontando-os com uma função Linear, obtendo um valor para $R^2 = 0,973$.

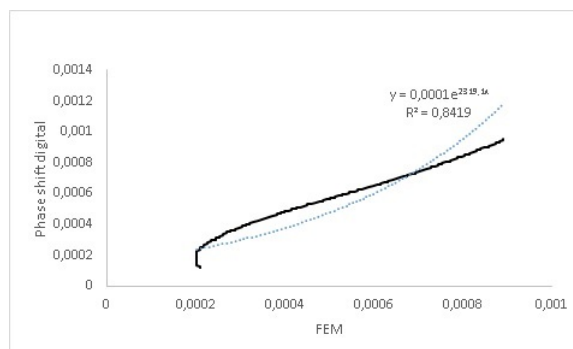
Figura 4.20 – Comparação do *Phase shift* digital x FEM, chapa com solda, utilizando uma função Linear



Fonte: Dados da pesquisa

Já na figura 4.21 podemos analisar os resultados confrontando-os com uma função Exponencial, obtendo um valor para $R^2 = 0,841$.

Figura 4.21 – Comparação do *Phase shift* digital x FEM, chapa sem solda, utilizando uma função exponencial



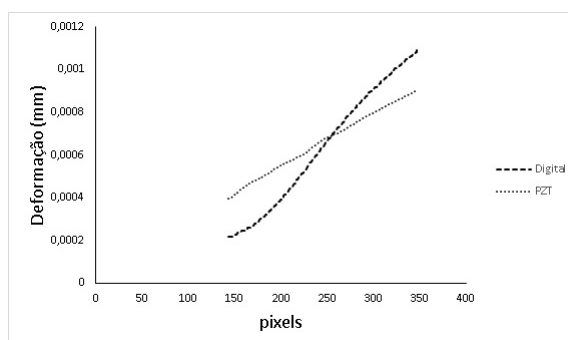
Fonte: Dados da pesquisa

4.5.3 Análise de deformação utilizando a técnica de *Phase shift digital* x a técnica de PZT

Nesta parte da análise chegamos no momento de comparar diretamente os resultados das duas técnicas, PZT x *Phase shift digital*, utilizando o mesmo material, chapa em aço A36 conforme seção "Materiais e métodos", e mesmas condições de iluminação e ruídos.

Na Fig. 4.22 é possível ver os valores de deformação numa viga de aço medido pela *digital speckle shearing pattern interferometry* utilizando um PZT para fornecer a fase de deslocamento, e usando a geração de mudança de fase digital quando uma carga de 45 g foi aplicada, em conformidade com Fig. 3.2 e 3.3. Também na Fig. 4.22, é possível ver os valores de deformação da viga utilizando o *phase shift digital* como uma comparação.

Figura 4.22 – Comparação PZT x Digital (Com Solda) 45 g



Fonte: Dados da pesquisa

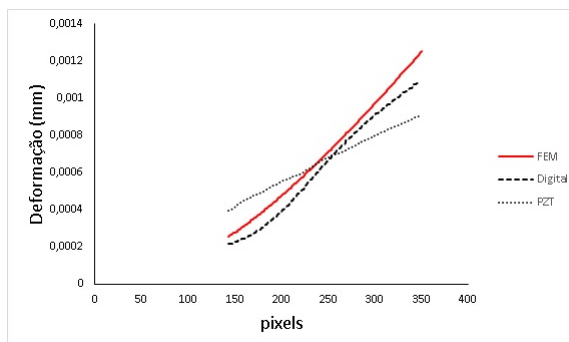
4.5.4 Análise de deformação utilizando a técnica de *Phase shift digital* x a técnica de PZT x FEM (Analítico)

Nesta parte da análise foram comparados os resultados obtidos anteriormente, utilizando as técnicas de PZT e *Phase shift digital* com os resultados obtidos através da análise de elementos finitos (FEM) que foram considerados como parâmetro analítico deste trabalho.

Com o intuito de mostrar os resultados das técnicas de PZT em comparação com a técnica de *Phase shift digital* e também a curva de deformação teórica (FEM), segue abaixo o gráfico.

A partir deste gráfico podemos constatar uma aproximação entre as duas técnicas e em comparação com a curva de deformação teórica (FEM) elas se correlacionam até determinada área da chapa.

Figura 4.23 – Comparação PZT x Digital x FEM(Ajustado)(Com Solda) 45 g



Fonte: Dados da pesquisa

Assim como no resultado anterior, podemos concluir que a técnica de Phase shift digital e mostrou mais eficiente tanto na análise utilizando a chapa sem solda, e também com a chapa com solda.

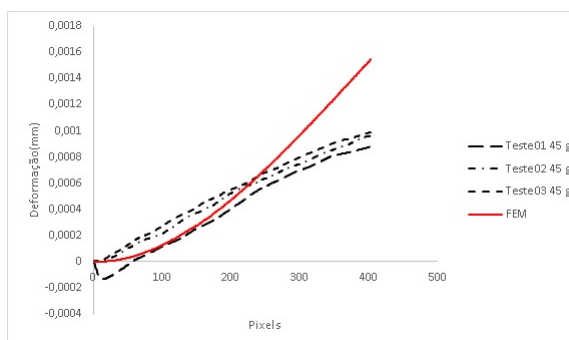
4.5.5 Análise de repetição utilizando a técnica PZT

Por ser uma técnica altamente sensível, umas das grandes preocupações foi justamente a verificabilidade da possibilidade de se repetir a técnica obtendo-se resultados semelhantes.

Para se constatar tal resultado, tanto nos testes realizados no laboratório da Universidad Valencia, quanto nos testes realizados no laboratório 4 do CEDIA - UFLA, foram adquiridas tres análises utilizando os pesos mencionados, conforme segue abaixo

Na Fig. 4.24 é possível ver os valores de deformação de uma viga de aço A36 medida pela *digital speckle shearing pattern interferometry* utilizando um PZT para fornecer a fase de deslocamento com a chapa com solda.

Figura 4.24 – Curvas de deformação de uma viga cantilever de aço A36, com solda, deformada três vezes por uma carga de 45 g medida por *digital speckle shearing pattern interferometry* utilizando um PZT para fornecer a fase de deslocamento



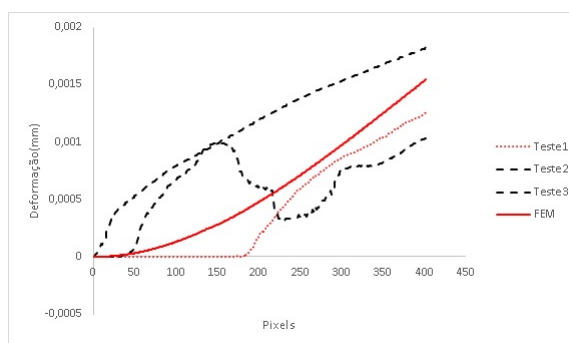
Fonte: Dados da pesquisa

4.5.6 Análise de repetição utilizando a técnica de *Phase shift digital*

Nesta parte dos resultados são comparados os resultados por meio de repetições. Os testes foram realizados utilizando-se pesos de 45 g nas três análises. Cada teste foi realizado com uma configuração diferente de filtro gaussiano, com o objetivo de verificar qual a melhor configuração. As análises utilizaram filtro 10, 12 e 17 respectivamente. Ao final foi possível constatar que o filtro 10 obteve melhor resultado, sendo este escolhido como parâmetro neste trabalho.

Na Fig. 4.25 é possível ver os valores de deformação de uma viga de aço A36 medida pela *digital speckle shearing pattern interferometry* utilizando um *Phase Shift Digital* para fornecer a fase de deslocamento com a chapa com solda.

Figura 4.25 – Curvas de deformação de uma viga cantilever de aço A36, com solda, deformada três vezes por uma carga de 45 g medida por *digital speckle shearing pattern interferometry* utilizando a geração de mudança de fase digital



Fonte: Dados da pesquisa

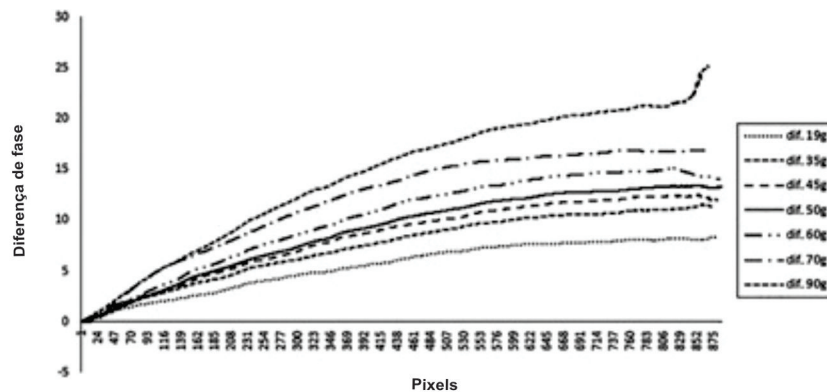
4.6 Teste de limites e desafios do Phase-shift Digital

Os resultados de ensaio do método proposto para criar digitalmente o deslocamento de fase, também foram analisados sobre os desafios da análise de imagem, explorando assim os limites da sua sensibilidade quando a viga recebeu uma gama de deformações com base nas cargas a partir de 19 g a 90 g.

Na fig. 4.26, é possível observar a curva de deformação (isto é, por diferença de fase) de uma viga cantilever exposta a uma sequência de cargas com a mudança de fase fornecida por um PZT. É claro que a sequência da área das curvas está diretamente relacionada com a sequência de cargas, o que era esperado.

Contudo, na figura 4.27, a mesma experiência, por sua vez usando *phase-shifting* digital apresenta as curvas entrelaçadas em algumas cargas; por conseguinte, este é claramente um

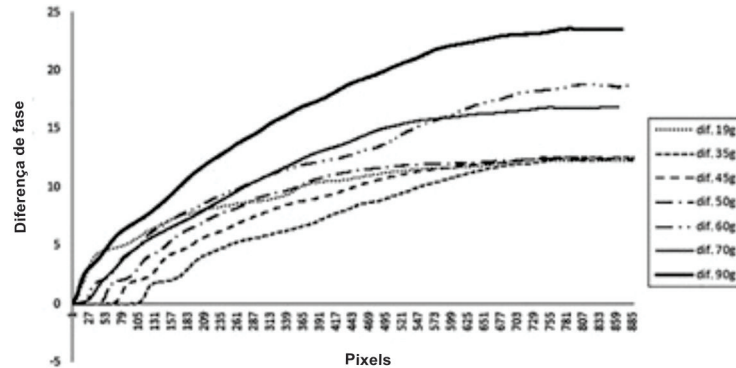
Figura 4.26 – Curvas de deformação (por diferença de fase) de uma viga *cantilever* exposta a uma sequência de cargas com a mudança de fase fornecida por um PZT.



Fonte: Dados da pesquisa

desafio a respeito do uso do método proposto principalmente relacionada com processamento de imagem.

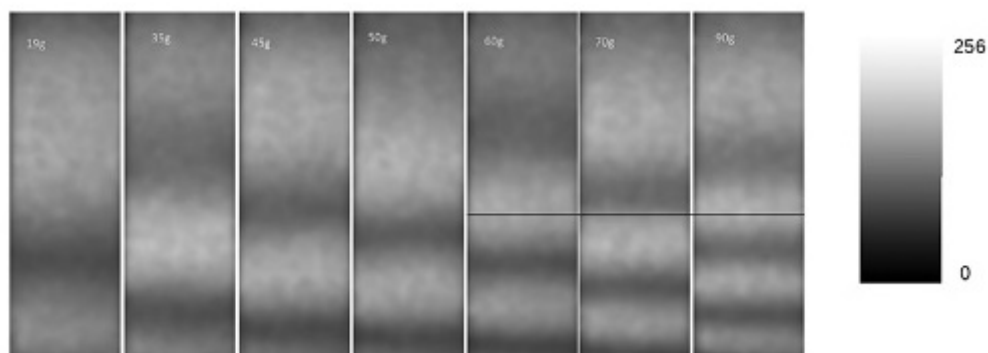
Figura 4.27 – Curvas de deformação (por diferença de fase) de uma viga *cantilever* exposta a uma sequência de cargas com o deslocamento de fase digital com curvas sobrepostas em algumas cargas.



Fonte: Dados da pesquisa

Na figura 4.28, as imagens das franjas obtidas pela proposta do método são apresentadas, e quando foram comparadas com o método PZT, nas cargas de 60 – 90 g, as franjas superiores foram colocadas numa posição diferente. Isto está relacionado principalmente à dificuldade do método digital para identificar corretamente as franjas superiores quando foram espalhadas e desfocadas, tais como as observadas na carga de 50 g, deslocando-se assim para a parte inferior da imagem.

Figura 4.28 – Imagens das franjas obtidos pelo método proposto com uma linha mostrando onde as imagens foram cortadas.



Fonte: Dados da pesquisa

A solução para este problema foi encontrada por cortar a principal parte da imagem antes de iniciar o deslocamento digital, eliminando a parte superior da imagem, como apontado na Fig. 4.28.

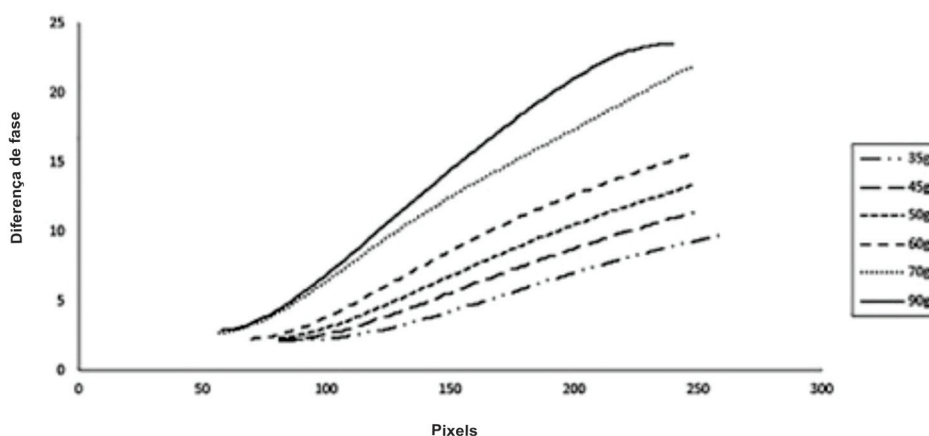
Na fig.4.29, é possível ver o resultado após o corte, e em seguida, para identificar uma solução do problema causado por franjas superiores indefinidas. O corte não comprometeu a análise da viga em relação as suas características de deformação, considerando que ela é homogeneia. No entanto, se há informações sobre o limite do corte, em seguida, a análise deve ser adaptada para colocar as franjas, a fim de permitir que o método proposto, reconheça aquelas que são relevantes na análise.

Portanto, as curvas foram colocadas na ordem esperada de deformação, exceto para a curva ligada ao carregamento de 19 g, desde o pós-processamento das imagens não forneceu o mesmo resultado neste caso. A deformação criada pela carga 19 g, o menor limite do nosso teste de sensibilidade, mostrou que a atenção adicional deve ser tomada em consideração com a porção mais baixa da imagem, onde uma franja indefinida aparece.

Algumas alterações na análise da imagem de 19 g foram realizadas, e os resultados foram apresentados na Fig. 4.30. Os resultados esperados provenientes da correção das imagens geradas pela carga 19 g. foram conduzidos usando uma abordagem diferente para a outras cargas a partir de 60 g a 90 g. Isto, pode-se ver que a criação de phase-shifting digital é confiável; no entanto, especial atenção deve ser tomada para definir os limites de sensibilidade, e, em seguida, as correções necessárias e pós-processamento.

A fim de superar a subjetividade do corte manual, o usuário deve definir as melhores posições das franjas particularmente preocupadas com as bordas (inferior e superior) e com

Figura 4.29 – Curvas de deformação (por diferença de fase) de uma viga *cantilever* exposta a um seqüência de cargas com o deslocamento de fase digital após cortar as imagens de 60 g, 70 g e 90 g sem a curva relacionada a 19 g.



Fonte: Dados da pesquisa

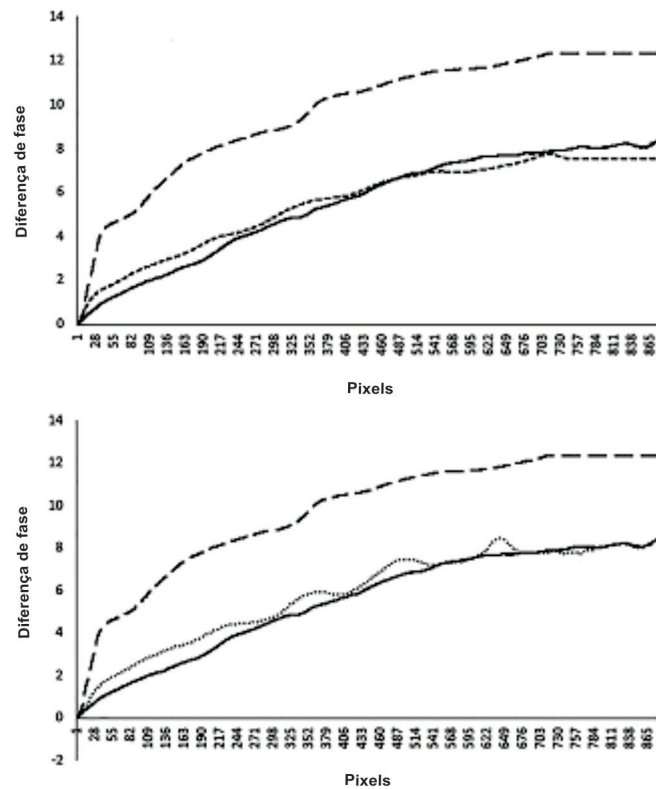
as cargas. O objetivo com o presente trabalho foi também testar a sensibilidade do método proposto, que tinha por manter a mesma configuração para obter a deformação causada pela carga de 19 g a 90 g. Nós não poderíamos ajustar a melhor posição das franjas. Isto poderia ser afetado durante a configuração do sistema, evitando o corte.

As comparações com a curva teórica apresentaram a capacidade do método proposto para produzir o fenômeno esperado. A adoção de métodos que utilizam diferentes cargas com repetições pode ser considerado como confirmação do potencial esperado do método proposto. Além disso, o outro ensaio usando sete diferentes cargas de 19 g para 90 g apresenta mais repetições do método proposto, mostrando a sua fiabilidade.

Os resultados do PZT e do deslocamento de fase digital proposto também foram comparados com uma simulação FEM (Fig. 4.32); os resultados podem ser vistos na Fig. 4.31.

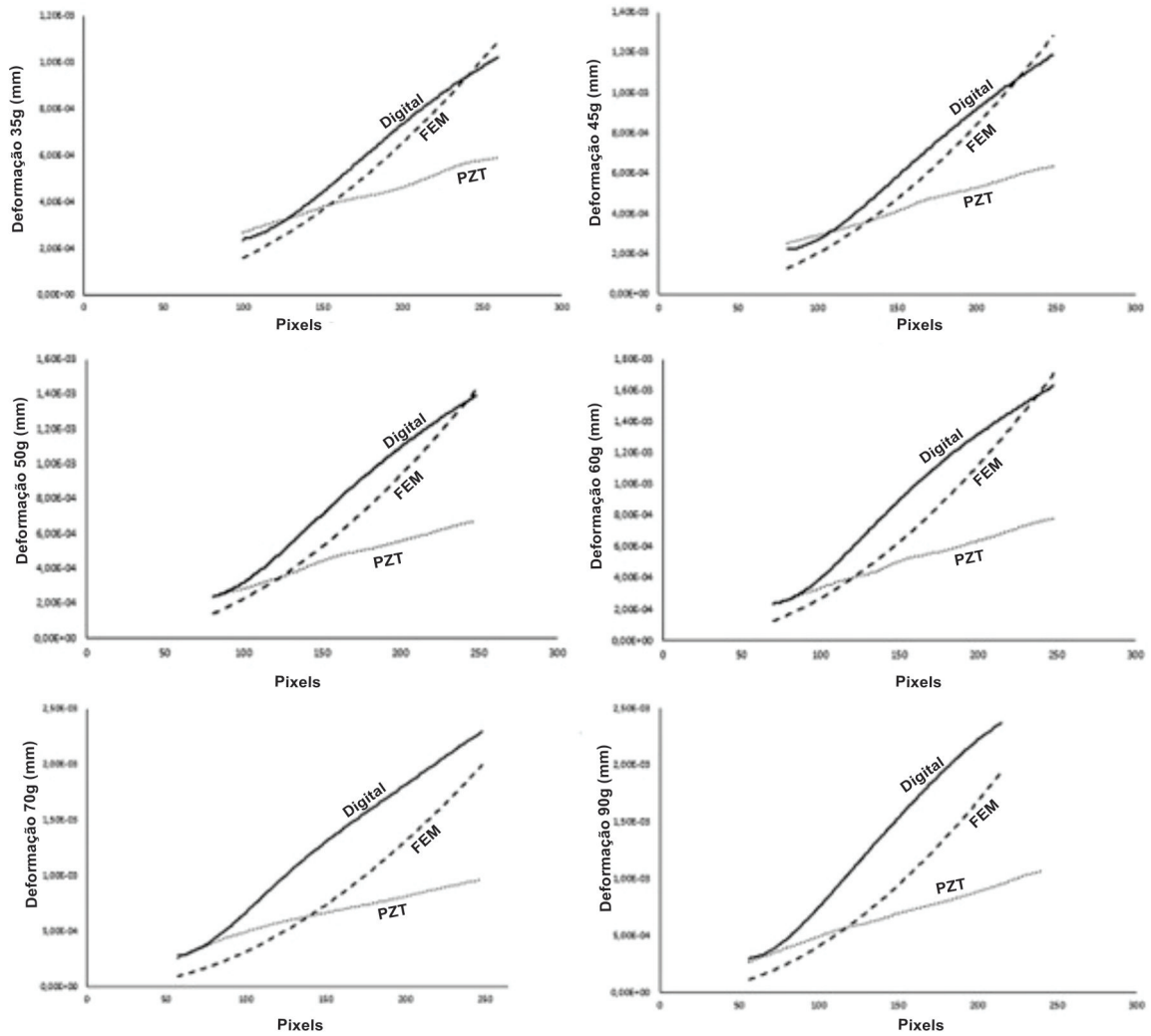
A região na viga cantilever escolhido para comparar os resultados foi relacionada a uma porção onde a deformação não compromete a correlação da configuração de manchas. Os resultados apresentam a capacidade da técnica proposta para seguir o fenômeno com um comportamento semelhante em comparação com um simulação fornecida por uma FEM, com uma melhor correlação quando em comparação com a abordagem PZT.

Figura 4.30 – Diferença de fase para uma carga de 19 g com (a) linha tracejada grossa representa o proposto deslocamento digital, linha contínua que representa a mudança de fase PZT e linha pontilhada pequena representando o ajuste no software para identificar o franjas e, assim, gerar digitais phase-shifting, e (b) linha grossa tracejada representando a transferência digital de proposta, linha contínua representa o PZT mudança de fase, e a linha tracejada, representando a parte inferior da imagem de gerar digitais phase-shifting.



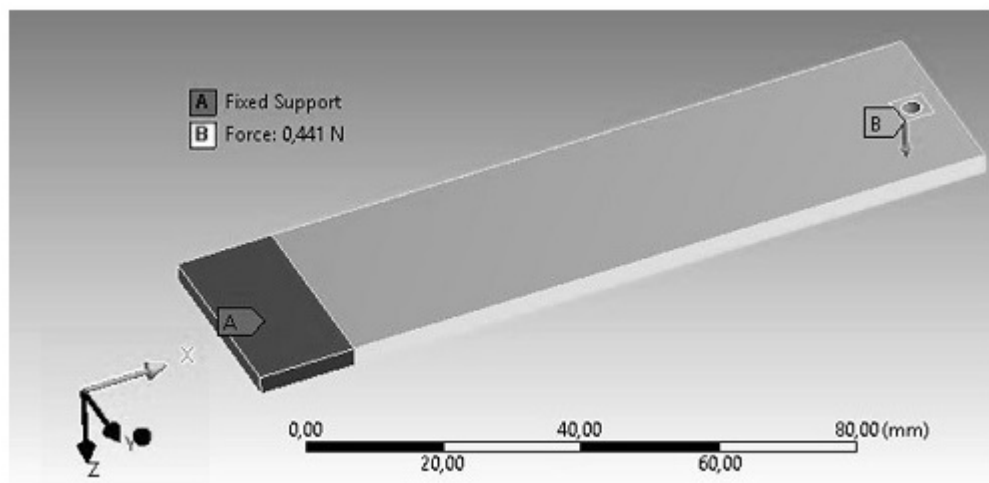
Fonte: Dados da pesquisa

Figura 4.31 – Comparação das técnicas de FEM, PZT e *Phase shift Digital* utilizando várias cargas



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 4.32 – Vista da viga em balanço apresentada durante a simulação da análise de elementos finitos.



Fonte: Dados da pesquisa

5 CONCLUSÃO

A abordagem de mudança de fase digital foi capaz de acompanhar as deformações de um feixe de uma viga cantilever, bem como o tradicional método usando o PZT como o gerador de deslocamento de fase. O técnica proposta foi capaz de reproduzir a deformação da viga cantilever na região intermediária entre o ponto de fixação e sua extremidade livre, apresentando sensibilidade, repetibilidade e robustez, que justifica a sua utilização como uma alternativa ao PZT em aplicações tradicionais, e principalmente quando o PZT não pode ser usado.

REFERÊNCIAS

- ABRÀMOFF, M. D.; MAGALHÃES, P. J.; RAM, S. J. Image processing with imagej. **Biophotonics international**, Pittsfield, v. 11, n. 7, p. 36–42, 2004.
- ALBERTAZZI, A. et al. Detecção de falhas de adesão entre mantas poliméricas e dutos usando interferometria de deslocamento lateral. **CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO**, São Paulo. Anais... São Paulo: ABENDI, 2006.
- AMARO, A. M. et al. Utilização de técnicas de interferometria holográfica na detecção de defeitos em compósitos laminados. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**, Coimbra, v. 10, n. 1, p. 83–91, 2006.
- 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.
- 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. Fringe scanning interferometers. **Optical Shop Testing**, Oxford, v. 1, p. 409, 1978.
- 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. Multiple-wavelength phase-shifting interferometry. **Applied optics**, Easton, v. 24, n. 6, p. 804–807, 1985.
- 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. 1985.
- CREATH, K. Phase shifting speckle interferometry. **Applied optics**, Easton, v. 24, n. 18, p. 3053–3058, 1985.
- DIAS, G. L. et al. The use of a robotic arm for displacement measurements in a cantilever beam. **International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering**, Amsterdam, v. 6, n. 3, p. 45–57, 2016.
- GERALDES, S. M. M. **Desenvolvimento e construção dum sistema interferométrico Shear baseado da shearography speckle para medição de deformações no plano**. 134 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, 2008.
- GOMES, J. S.; MONTEIRO, J.; VAZ, M. Ndi of interfaces in coating systems using digital interferometry. **Mechanics of materials**, v. 32, n. 12, p. 837–843, Dec.

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

GREIVENKAMP, J. E. Generalized data reduction for heterodyne interferometry. **Optical Engineering**, Redondo Beach, v. 23, n. 4, p. 234350–234350, Ago 1984.

GROVES, R. M.; JAMES, S. W.; TATAM, R. P. Shape and slope measurement by source displacement in shearography. **Optics and lasers in Engineering**, London, v. 41, n. 4, p. 621–634, Abr 2004.

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.

HABIB, K. Thermally induced deformations measured by shearography. **Optics & Laser Technology**, Surrey, v. 37, n. 6, p. 509–512, Set 2005.

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.

HAYES, J. B. **Linear methods of computer controlled optical figuring**. Tese (Doutorado), 1984.

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

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.

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.

JONES, R.; WYKES, C. **Holographic and speckle interferometry**. [S.l.]: Cambridge: Cambridge university press, 1989. 368 p.

KIM, K.-S. et al. Analysis of an internal crack of pressure pipeline using espi and shearography. **Optics & Laser Technology**, Surrey, v. 35, n. 8, p. 639–643, Nov 2003.

KOLIPOULOS, C. L. **Interferometric Optical Phase Measurement Techniques**. Tese (Doutorado), 1981.

LEE, J.-R. et al. Application of grating shearography and speckle shearography to mechanical analysis of composite material. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Kidlington, v. 35, n. 7, p. 965–976, 2004.

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.

- MARINI, R.; VAZ, M. et al. Non destructive testing of composite sandwich panels using optical interferometric patterns. In: **International Conference on “Emerging Techniques in NDT”, Atenas**. [S.l.]: Atenas. Proceedings... Atenas: [s.n.], 1999. v. 2.
- 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.
- MONTEIRO, J. Desenvolvimento de um sistema interferometria holográfica (espi) para análise de estruturas sob solicitações estáticas e dinâmicas. FEUP, 1998.
- NYAKANG’O, O. E.; RURIMO, G. K.; KARIMI, P. M. Optical phase shift measurements in interferometry. **International Journal of Optoelectronic Engineering**, Elmsford, v. 3, n. 2, p. 13–18, 2013.
- OWNER-PETERSEN, M. Decorrelation and fringe visibility: on the limiting behavior of various electronic speckle-pattern correlation interferometers. **Journal the Optical Society of America**, Oxford, v. 8, n. 7, p. 1082–1089, 1991.
- 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.
- SANTOS, F.; VAZ, M.; MONTEIRO, J. A new set-up for pulsed digital shearography applied to defect detection in composite structures. **Optics and Lasers in Engineering**, London, v. 42, n. 2, p. 131–140, Ago 2004.
- SANTOS, F. M. F. d. et al. **Novos métodos de interferometria de speckle com lasers de impulso: aplicação ao estudo do comportamento dinâmico de estruturas**. 310 p. Tese (Doutorado), 1981.
- 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.
- SCHWIDER, J. et al. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources. **Applied optics**, Easton, v. 22, n. 21, p. 3421–3432, 1983.
- SIROHI, R. S. Speckle methods in experimental mechanics. **OPTICAL ENGINEERING-NEW YORK-MARCEL DEKKER INCORPORATED-**, MARCEL DEKKER AG, v. 38, p. 99–99, 1993.
- STEINCHEN, W.; YANG, L. Digital shearography: Theory and application of digital speckle pattern shearing interferometry. New York: CRC Press, p. 330, 2003.
- STEINCHEN, W. et al. Non-destructive testing of aerospace composite materials using digital shearography. **Journal of Aerospace Engineering**, New York, v. 212, n. 1, p. 21–30, Jan 1998.
- 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.

UDUPA, G. et al. Defect detection in unpolished si wafers by digital shearography. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v. 15, n. 1, p. 35, Out 2003.

VEUSTER, C. D. et al. In-line phase-shifter calibration and drift measurement and compensation for digital speckle pattern interferometry (dspe). 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.

WYANT, J. C. Use of an ac heterodyne lateral shear interferometer with real-time wavefront correction systems. **Applied optics**, Easton, v. 14, n. 11, p. 2622–2626, Nov 1975.

XU, L. et al. Studies of digital microscopic holography with applications to microstructure testing. **Applied Optics**, Easton, v. 40, n. 28, p. 5046–5051, Out 2001.

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.

YOSHIZAWA, T. **Handbook of optical metrology: Principles and Applications**. [S.l.]: CRC Press, 2009. 744 p.

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.

6 ANEXOS

6.1 Códigos Image J

Função responsável por copiar uma área da imgOrig para imgDestino function copyROI(imgOrig, imgDest, x , y, height, width)

```
( write("copyROI-----" + getImageID());
selectImage(imgOrig);
write("copyROI-----" + getImageID());
```

```
img_copy = newArray(height * width);
```

```
for(i = 0; i < height; i ++)(
for(j = 0; j < width; j ++)(
img_copy(height * j + i) = getPixel(i, j);
)
)
```

```
selectImage(imgDest);
for(i = 0; i < height; i ++)(
for(j = 0; j < width; j ++)(
setPixel(x + i, y + j, img_copy(height * j + i));
)
)
```

```
selectImage(imgOrig);
write("copyROI-----" + getImageID());
write("copyRoiexecuted...");
)
```

Função responsável por redimensionar uma área da imgOrig com base na taxa informada retorna a referência para a imagem resultante function resizeROI(imgOrig, x, y, height, width , taxa)

```
(
    selectImage(imgOrig);
```

```
        Altura do ROI que será copiado makeRectangle(x,y,width,height);
    run("Copy");
```

```
        Creating as a new image
    run("Internal Clipboard");
    selectWindow("Clipboard");
```

```
        Resizing the image and creating a new one
    run("Scale...", "x=1 y="+taxa+"width="+width+"height="+height*taxa+"interpolation=Bilinear
    average create title=image");
    scaledImage = getImageID();
    selectWindow("Clipboard");
    close();
```

```
        selectImage(imgOrig);
    write("resizeRoi executed...");
    return scaledImage;
)
```

```
        Função que busca e retorna os máximos locais da faixa central da imagem function find-
    Minima(sourceImg)
    ( write("findMinima—————" + getImageID());
```

```
        selectImage(sourceImg);
```

```
        getDimensions(srcWidth, srcHeight, srcChannels, srcSlices, srcFrames);
```

```

        makeRectangle(round(srcWidth/2), 0, 1, srcHeight);
makeRectangle(0, 0, srcWidth, srcHeight);

```

```

        run("Copy");
run("Internal Clipboard");
imgMinimum = getImageID();
run("Select All");
run("Gaussian Blur...", "sigma=12");
run("Find Maxima...", "noise=15 output=List light");

```

```

        v = newArray(nResults);
for (i = 0; i < nResults; i++){
v(i) = getResult("Y", i);
}
selectionSort(v);

```

```

        selectImage(imgMinimum);
write("findMinima—————" + getImageID());
close();

```

```

        selectImage(sourceImg);
selectWindow("Clipboard");
close();

```

```

        write("findMinima—————" + getImageID());
write("findMinima executed...");
return v;

```

```

    )
    function selectionSort(v) (
        for (i = 0; i < v.length-1; i++) ( indexmin = i; for (j = i + 1; j < v.length; j++) ( if (v(j)
< v(indexmin)) ( indexmin = j;

```

```

)
)
if ( $index_m in \neq i$ ) (
  aux = v( $index_m in$ );
  v( $index_m in$ ) = v(i);
  v(i) = aux;
)
)
)

```

Função responsável Fechar a imagem informada function closeImage(toClose)

```

(
  selectImage(toClose);
  write("closing Image number "+toClose+"...");
  close();
)

```

Função responsável Salvar e fechar a imagem informada:

```

function saveAndClose(toClose, path)
(
  selectImage(toClose);
  run("8-bit");
  run("Select All");
  run("Gaussian Blur...", "sigma=12");
  run("Save", "save=("+path+"");
  run("Close");
)

```

function getTamFranjas(franjas, height)

```

(
  v = newArray(franjas.length);
  for(i = 0; i < franjas.length-1; i++){
    v(i) = franjas(i+1) - franjas(i);
  }
)

```

```

v(franjas.length-1) = height - franjas(franjas.length-2);
return v;
)

```

```

function getDelta(tamFranjas)
(
v = newArray(tamFranjas.length);
for(i = 0; i < franjas.length-1; i++){
v(i) = round(tamFranjas(i)/4);
}
return v;
)

```

no vetor imageTeste utilizado para processamento em batch
 Está configurado para executar o caminho da imagem sem comentário
 Para executar mais de uma imagem deve-se alterar a linha 157 para o número de imagens desejado

remover o comentário ou alterar o caminho (linhas 158 - 170)

```

numImagens = 1;
imagemTeste = newArray(numImagens);

```

As imagens serão extraídas e salvas do caminho abaixo

Na pasta Original serão salvas as imagens com defasagem via PZT e na pasta Generated as com phase shift digital
 rootDirectory = "D:/João Vítor/UFLA/CEDIA/SHEAR/RESULTADOS/SEM SOLDA/70g";

ALTERAR O DIRETÓRIO QUE BUSCA A IMAGEM 0

```

for (img = 0; img < numImagens; img++){
open("C:/Users/thiago/Desktop/shear/Clipboard.bmp");
/IMAGEM 0

```



```
run("8-bit");
```

```
initial = getImageID();
```

```
bgColor = getPixel(3,45);
```

```
run("Duplicate...", "title=Temp");
```

```
temp = getImageID();
```

```
getDimensions(imgWidth, imgHeight, channels, slices, frames);
```

```
write("getDimensions("+imgWidth+", "+imgHeight+", "+channels+", "+slices+", "+frames+"");
```

```
francas = findMinima(initial);
```

```
tamFrancas = getTamFrancas(francas, imgHeight);
```

Calculando as defasagens de cada franja O vetor delta armazena o valor referente a 90 graus de defasagem

```
delta = getDelta(tamFrancas);
```

Criando diretório que irá armazenar as imagens de resultado

```
File.makeDirectory("C:/Users/thiago/Desktop/shearVGenerated");
```

ALTERAR O DDIRETÓRIO QUE CRIA A PASTA Q VAI SALVAR AS 4 IMAGENS

```
for(j = 1; j < 4; j++){
```

```
write("Iteração "+j+"antes do resizeROI");
```

```
resized = resizeROI(initial, 0, 0, 10, imgWidth , (delta(0)*j)/10);
```

```
selectImage(initial);
```

```
newImage("Result"+(j*90)+"graus", "8-bit", imgWidth, imgHeight, 1);
```

```
result = getImageID();
```

```
setForegroundColor(bgColor, bgColor, bgColor);
```

```
floodFill(1, 1);
```

```
copyROI(resized, result, 0,0, imgWidth, delta(0)*j);
```

```
closeImage(resized);
```

```
for(i = 0; i < franjas.length-1; i++){
write(-----Início da "+i+" iteração-----);
```

```
    taxa = (tamFranjas(i) - (delta(i)*j) + (delta(i+1)*j))/tamFranjas(i);
    write("Iteração "+j+", "+i+" antes do resizeROI");
    resized = resizeROI(initial, 0, franjas(i), tamFranjas(i), imgWidth , taxa);
```

```
    copyROI(resized, result, 0,franjas(i)+(delta(i)*j), imgWidth, floor(tamFranjas(i)*taxa)-
1);
```

```
    closeImage(resized);
```

```
    )
```

```
    saveAndClose(result,"C:/Users/thiago/Desktop/shear/Generated/PHASE-S-CAPTURA-
P"+(j*90)+-generated.bmp");
```

ALTERAR O DIRETÓRIO QUE VAI SALVAR AS 3 IMAGENS GERADAS NA PASTA CRIADA)

```
    saveAndClose(initial,"C:/Users/thiago/Desktop/shear/Generated/PHASE-S-CAPTURA-
P01-generated.bmp");
```

SALVA A IMAGEM 0 JUNTO COM AS OUTRAS 3

```
File.makeDirectory("I:/Phaseshift/FOTOS EDITADAS/COM SOLDA/19g/Original");
```

```
    open("I:/Phaseshift/FOTOS EDITADAS/COM SOLDA/19g/Generated/PHASE-S-CAPTURA-
P0.bmp");
    saveAndClose(getImageID(), "E:/Phaseshift/Original3/PHASE-S-CAPTURA-P0.bmp");
```

```

open(rootDirectory+"/"+imagemTeste(img)+"/PHASE-S-CAPTURA-P90.bmp");
saveAndClose(getImageID(), +rootDirectory+"/"+imagemTeste(img)+"/Original/PHASE-S-CAPTURA-
P90.bmp");
open(rootDirectory+"/"+imagemTeste(img)+"/PHASE-S-CAPTURA-P180.bmp");
saveAndClose(getImageID(), +rootDirectory+"/"+imagemTeste(img)+"/Original/PHASE-S-CAPTURA-
P180.bmp");
open(rootDirectory+"/"+imagemTeste(img)+"/PHASE-S-CAPTURA-P270.bmp");
saveAndClose(getImageID(), +rootDirectory+"/"+imagemTeste(img)+"/Original/PHASE-S-CAPTURA-
P270.bmp");

        closeImage(temp);
    )

```

6.2 Códigos SCILAB

```

        stacksize(4e7);

Directory of where the images are in your computer
chdir('C:/Users/thiago/Desktop/shear/Generated');

*****Read Grid Images with Phase-Shift*****

Grade1 = gray-imread('PHASE-S-CAPTURA-P01-generated.bmp');
Grade2 = gray-imread('PHASE-S-CAPTURA-P90-generated.bmp');
Grade3 = gray-imread('PHASE-S-CAPTURA-P180-generated.bmp');
Grade4 = gray-imread('PHASE-S-CAPTURA-P270-generated.bmp');

***** Read Object *****

Objeto11 = gray-imread('objeto.tif');

Subtraction of the images

s1 = abs(Grade1);

```

```
s2 = abs(Grade2);
s3 = abs(Grade3);
s4 = abs(Grade4);
```

Gaussian filter to eliminate the grids. You should adjust the level of filtering.

```
Moire1 = gsm2d(s1,1);
Moire2 = gsm2d(s2,1);
Moire3 = gsm2d(s3,1);
Moire4 = gsm2d(s4,1);
```

```
imwrite(Moire1,'Moire1b.jpg');
imwrite(Moire2,'Moire2b.jpg');
imwrite(Moire3,'Moire3b.jpg');
imwrite(Moire4,'Moire4b.jpg');
```

3D Moiré unwrap

Empacotada = normal(imphase('bucket4a',0,Moire1,Moire2,Moire3,Moire4)); Phase shifting

```
Topo = unwrapl(Empacotada);
```

Topo-normal = 255*normal(Topo); /255 levels of gray

Topo-normal = gsm2d(Topo-normal,70); /Smoothing and denoising

Saving the result

```
imwrite(normal(Topo-normal),'objeto-recuperadophsh2.bmp');
```

Ploting the result

```
Topo-normal=-Topo-normal;
```

```
xset("window",1); xbaso();xselect();plot3d1(1:4:size(Topo-normal,'r'),1:4:size(Topo-normal,'c'),To
normal(1:4:, 1 : 4 :));
```