



RAPHAEL MUNIZ SIQUARA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE IHM PARA TÉCNICAS DE
METROLOGIA ÓPTICA POR INTERFERÊNCIA**

LAVRAS – MG

2020

RAPHAEL MUNIZ SIQUARA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE IHM PARA TÉCNICAS DE METROLOGIA ÓPTICA
POR INTERFERÊNCIA**

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 (Engenharias IV), para a obtenção do título de Mestre.

Prof. DSc. Roberto Alves Braga Jr.
Orientador

LAVRAS – MG
2020

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

Silva, Raphael Muniz Siquara

Desenvolvimento de IHM para técnicas de metrologia
óptica por interferência / Raphael Muniz Siquara Silva. –
Lavras : UFLA, 2020.

80 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal
de Lavras, 2020.

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

Bibliografia.

1. Visão de Máquina. 2. Moiré. 3. Shearografia. I. Braga
Júnior, Roberto Alves. II. Título.

RAPHAEL MUNIZ SIQUARA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE IHM PARA TÉCNICAS DE METROLOGIA ÓPTICA
POR INTERFERÊNCIA**

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 (Engenharias IV), para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 5 de Março de 2020.

Prof. DSc. Henrique Leandro Silveira	UFLA
Prof. DSc. Carlos Antônio Rufino	Cefet-MG
Prof. DSc. Dimitri Campos Viana (Suplente)	UFLA
Prof. DSc. Paulo Henrique Cruz Pereira (Suplente)	Cefet-MG


Prof. DSc. Roberto Alves Braga Jr.
Orientador

**LAVRAS – MG
2020**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade e força concedida durante todo o caminho. À minha família pelo apoio, palavras de ânimo e paciência nos momentos difíceis e aos amigos e familiares pelos momentos de descontração. Agradeço também aos amigos e companheiros do CEDIA: Thiago, Elisângela, Fernando e ao orientador Roberto pelo apoio, auxílio nas dúvidas e contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

Você não pode voltar atrás e fazer um novo começo, mas você pode começar agora e fazer um novo fim.

(Chico Xavier)

RESUMO

O ensaio não destrutivo aplicado no estudo de deformações, tensões, perfis e falhas estruturais possui grande importância para a obtenção de informações relativas à estrutura e propriedades de materiais, sendo essencial por exemplo no controle de qualidade da produção e na manutenção industrial. Técnicas de metrologia óptica por interferência como moiré e shearografia são amplamente utilizadas para obtenção de tais informações, devido principalmente à capacidade de aplicação em campo, serem não-intrusivas, possuírem boa precisão, qualidade visual, e possibilidade de exibição dos resultados em tempo real. Para obtenção dos resultados finais de ambas as técnicas, um conjunto de etapas sequenciais são necessárias, envolvendo desde os procedimentos iniciais de adequação dos padrões obtidos aos de recuperação da informação física estudada. Tais etapas podem requerer o uso de programas e procedimentos diversos, o que dificulta a prática caso os resultados não sejam adequados ou necessite realizar alterações na configuração física experimental, exigindo um tempo longo devido à necessidade de calibrações e repetições das etapas do procedimento. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma interface homem-máquina (IHM) que integre todas as etapas experimentais das técnicas de Moiré e Shearografia, com possibilidade de configuração das etapas e visualização dos resultados em tempo real e estático, além da aplicação em campo com uso de técnicas de visão de máquina. A aplicação em tempo real facilita possíveis alterações nas etapas ou no arranjo experimental, além de possibilitar a obtenção de diversos padrões com diferentes objetivos. Os resultados obtidos comprovam a qualidade, a velocidade e a fácil configuração das etapas experimentais através da IHM desenvolvida.

Palavras-chave: Moiré. Shearografia. Visão de Máquina.

ABSTRACT

The non-destructive testing applied to the study of deformation, strain, profile, and the structural fault has great importance in obtaining information relative to the structure and material properties, being essential for example in production quality control and industrial maintenance area. Optical metrology techniques by interference such as Moiré and Shearography are widely used to obtain such information, mainly due to its field application capacity, being not intrusive, having good precision, visual quality, and real-time exhibition possibility. To obtain the final results of both techniques, a set of sequential steps is necessary, involving the initial procedures of the adequacy of the patterns obtained to the studied physical information recovery. Such steps may require the use of different programs and procedures, which makes the experience difficult if the results are not adequate or if it is necessary to make any alteration in the experimental physical setup, requiring a long time due to the need for calibrations and repetitions of the procedure steps. The objective of this work is the development of a human-machine interface (HMI) that integrates all the experimental steps of the Moiré and Shearography techniques, with the possibility of configuring the steps and visualizing the results in real and static time, in addition to application in the field with the use of machine vision. The real-time application facilitates possible changes in the steps or experimental arrangement, in addition to making it possible to obtain different patterns with different objectives. The results obtained prove the quality, speed, and easy configuration of the experimental steps through the developed HMI.

Keywords: Moiré. Shearography. Machine Vision.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Arranjo experimental do Moiré por projeção digital.	16
Figura 2.2 – Padrões de Moiré. a) Projeção da grade sobre o objeto; b) Grade de referência; c) Sobreposição de b) sobre a); d) Franjas de interferência de Moiré.	17
Figura 2.3 – Arranjo experimental do Moiré por projeção de sombra.	18
Figura 2.4 – Padrões obtidos da shearografia. a) Padrão de referência, b) Padrão de deformação, c) Diferença entre os padrões e d) Informação de fase exibindo os pontos de tensão.	20
Figura 2.5 – Arranjo experimental da shearografia por interferômetro de Michelson . . .	21
Figura 2.6 – Mapa de fases empacotadas. a) Visualização bidimensional e b) Visualização do perfil de uma linha.	22
Figura 2.7 – Mapa de fases desempacotadas. a) Visualização bidimensional e b) Visualização do perfil de uma linha.	22
Figura 2.8 – Mapa de fases com defeito. a) Mapa de fases empacotado e b) Mapa de fases desempacotado.	24
Figura 3.1 – Fluxograma de funcionamento da IHM.	33
Figura 4.1 – Janela da interface inicial da IHM.	34
Figura 4.2 – Janela da interface de Moiré.	36
Figura 4.3 – Janela da interface da shearografia.	38
Figura 4.4 – Janela de seleção de ROI.	40
Figura 4.5 – Janela de seleção de visualização gráfica tridimensional.	41
Figura 4.6 – Janela para carregar padrões.	42
Figura 4.7 – Janela para salvar padrões.	42
Figura 4.8 – Janela do gerador de grade cosseinodal.	43
Figura 4.9 – Padrões teste e fases recuperadas de Moiré.	45
Figura 4.10 – Teste real com uma semiesfera oca de isopor. a) Padrão de projeção, b) Padrão de grade e c) Fase recuperada.	46
Figura 4.11 – Padrões teste e fases recuperadas da Shearografia.	47
Figura 4.12 – Aplicação de padrão real da Shearografia. a) Padrão de interferência filtrado, b) Padrão de fases empacotadas e c) Padrão de fases desempacotadas.	48
Figura 4.13 – Padrão empacotado com artefatos. a) Padrão de interferência, b) Padrão de fases empacotadas e c) Padrão de fases desempacotadas.	50

Figura 1 –	Sinal unidimensional e seu sinal de quadratura.	59
Figura 2 –	Representação da posição dos <i>pixels</i>	63
Figura 3 –	Mapa de confiabilidade e medida de confiabilidade das fronteiras.	64
Figura 4 –	Fluxograma do algoritmo de desempacotamento.	66
Figura 5 –	Padrão de Moiré e magnitude da transformada bidimensional de Fourier . . .	68
Figura 6 –	Filtragem e operação de shift no espectro de frequência.	68
Figura 7 –	Padrão de fases empacotadas obtido.	69
Figura 8 –	Representação das frequências no espectro bidimensional de fourier após a operação de <i>shift</i>	70
Figura 9 –	Filtro passa baixa com diferentes valores de atenuação e frequência de corte.	71
Figura 10 –	Filtro passa alta com diferentes valores de atenuação e frequência de corte.	72
Figura 11 –	Exemplo de padrão processado pelo algoritmo. a) Padrão de franjas fecha- das, b) Mapa de coerência e c) Mapa de qualidade da orientação.	76
Figura 12 –	Mapas iniciais não corrigidos. a) Mapa de fases empacotadas e b) Mapa de fases desempacotadas.	76
Figura 13 –	Esquema da região de acoplamento horizontal entre duas janelas, sendo A a central e B a vizinha.	78
Figura 14 –	Resultado do algoritmo. a) Mapa de fases empacotadas corrigido e b) Mapa de fases desempacotadas.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Erro quadrático médio dos padrões simulados de Moiré.	45
Tabela 4.2 – Erro quadrático médio dos padrões simulados da Shearografia.	47
Tabela 4.3 – Tempos de execução do processamento online das técnicas ópticas.	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Metrologia por interferência óptica	14
2.2	Técnica de Moiré	14
2.2.1	Técnica de Moiré por projeção	15
2.2.1.1	Moiré por projeção digital	15
2.2.1.2	Moiré por projeção de sombra	16
2.2.2	Técnica de projeção de padrão de franjas	17
2.3	Shearografia	18
2.3.1	Shearografia digital por interferômetro de Michelson modificado	19
2.4	Similaridades e procedimentos das técnicas de Moiré e Shearografia	20
2.4.1	Obtenção do mapa de fases empacotadas	21
2.4.2	Desempacotamento de fases	23
2.5	Visão de Máquina	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	Linguagem de implementação e bibliotecas	26
3.2	Fluxograma de funcionamento da IHM	27
3.2.1	Tela Inicial	28
3.2.2	Tipo de processamento: dinâmico e estático	28
3.2.3	Obtenção e carregamento dos padrões para processamento	28
3.2.4	Obtenção dos padrões de interferência	29
3.2.5	Adaptação dos padrões	29
3.2.6	Obtenção do mapa de fases	30
3.2.7	Desempacotamento do mapa de fases	30
3.2.8	Exibição	31
3.2.9	Funcionalidades adicionais: gerador de grades	31
3.3	Escolha dos algoritmos de processamento das etapas	31
3.4	Validação dos algoritmos utilizados	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1	Apresentação e estrutura de funcionamento da IHM	34

4.1.1	Interface inicial	34
4.1.2	Interface de Moiré	35
4.1.3	Interface da Shearografia	37
4.1.4	Janela de seleção de ROI	39
4.1.5	Janela de exibição gráfica tridimensional	40
4.1.6	Telas de carregar e salvar	41
4.1.7	Janela de geração de grade cosseinodal	41
4.2	Variáveis e definições internas da IHM	43
4.3	Análise da qualidade da fase recuperada de Moiré e Shearografia	44
4.3.1	Análise dos resultados do processamento de Moiré	44
4.3.2	Análise dos resultados de processamento da Shearografia	46
4.4	Tempos de processamento online	46
4.5	Problemas encontrados na execução de alguns algoritmos	49
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	52
	APENDICE A – Equações dos padrões das técnicas ópticas	56
	APENDICE B – A transformada de Hilbert	59
	APENDICE C – Algoritmo de desempacotamento	62
	APENDICE D – Obtenção da fase empacotada através da transformada de Fourier	67
	APENDICE E – Filtros passa-alta e passa-baixa	70
	APENDICE F – Orientação de franjas lineares - PCA	73
	APENDICE G – Algoritmo de obtenção de fase empacotada de padrões com franjas fechadas	75

1 INTRODUÇÃO

A metrologia por interferência baseia-se no fenômeno físico de interferência de ondas para análises estruturais e perfilométricas de superfícies de materiais. No caso das técnicas baseadas no uso de luz, elas se dividem no uso de luz estruturada, que consiste na iluminação em forma de padrões ou grades, ou luz coerente, que consiste na luz composta de ondas de mesma frequência, fase e direção. As principais vantagens de tais técnicas é que são não-intrusivas e não-destrutivas, tornando-se ideais para testes, inspeções e avaliações de superfícies de materiais. Dentre as técnicas existentes, a técnica de Moiré e Shearografia se destacam no quesito qualidade, rapidez e principalmente na possibilidade de aplicação em campo.

A Shearografia obtém experimentalmente o gradiente da deformação da superfície de um material estudado, exibindo os pontos de tensões presentes no material, permitindo a identificação e o estudo de possíveis falhas estruturais. Seu arranjo experimental na versão digital é bem compacto, consistindo basicamente no uso de uma fonte de luz coerente, geralmente laser monocromático granular (*speckle*), um equipamento para interferência, como por exemplo o interferômetro de Michelson modificado, e uma câmera para obtenção dos padrões. A Shearografia também é capaz de obter deformações, vibrações e perfis, garantindo presença nas etapas de controle de qualidade das indústrias, principalmente nas áreas naval, aeronáutica e automobilística.

A técnica de Moiré possui larga aplicação na análise topográfica de superfícies, com capacidade de obtenção de informações como deformações, tensões, perfis e principalmente na visualização tridimensional de superfícies, com qualidade e precisão. Seu arranjo experimental consiste no uso de projeção de luz estruturada, permitindo a visualização do padrão de interferência em tempo real com equipamentos simples como por exemplo um projetor e uma câmera para obtenção dos padrões em sua versão por projeção digital. Seu simples arranjo experimental garante, além de aplicações na indústria, aplicações em laboratórios de estudos e consultórios médicos, como por exemplo na análise postural de pacientes.

Ambas as técnicas possuem similaridades no conjunto de etapas para a obtenção dos resultados finais, ou seja, a grandeza física estudada. Tais etapas consistem basicamente na adequação inicial do padrão obtido e aplicação de algoritmos de transformação do mesmo até a finalização do procedimento. A grande dificuldade é que tais etapas são sequenciais e a manipulação irregular de qualquer uma destas propaga erros para as posteriores, resultando na obtenção de informações finais ruidosas ou inutilizáveis. Isto pode ocorrer devido à erros

na definição de parâmetros do processamento ou erros de calibração e adequação do arranjo experimental. Desta forma, as repetições do ciclo de correção do arranjo experimental, obtenção de novos padrões, e definição adequada dos parâmetros nas etapas de processamento pode tomar um tempo considerável até alcançar os resultados desejados. A possibilidade de alteração e visualização em tempo real das etapas e resultados finais seria um passo importante na redução do tempo experimental e na realização das correções, além de permitir a utilização posterior para múltiplos objetivos.

A metodologia de aplicação mais utilizada destas técnicas ópticas é através da obtenção de múltiplos padrões com deslocamentos de fase entre si. Embora seja mais confiável, apresenta mais qualidade nos resultados e possui algoritmos simples, esta é sensível a ruídos ambientes e difícil de aplicar em tempo real. A metodologia de padrão único, apesar de menos utilizada, possui maior robustez a ruídos e permite processamento em tempo real, mas apresenta algoritmos com maior complexidade e exigência de capacidade computacional, além da qualidade ser proporcional à capacidade do algoritmo utilizado. Desta forma, para aplicação em tempo real das técnicas, esta última se apresenta mais favorável caso esteja alinhada com algoritmos que apresentam baixo custo computacional e qualidade dos resultados.

A visão de máquina vem como principal solução para possibilitar a aplicação em campo e obtenção de resultados mais confiáveis. Esta consiste basicamente no uso de técnicas de visão computacional, processamento de imagens e aprendizado de máquina para obtenção e tratamento de imagens provenientes de ambientes agressivos, através do uso de câmeras, possíveis sensores, e algoritmos específicos. O objetivo no uso de visão de máquina é fornecer uma aplicação mais robusta, de forma a manter a qualidade e velocidade no processamento e obtenção dos resultados finais.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo avaliar os desafios e desenvolver uma IHM para obter, pré-processar e apresentar os resultados finais das aplicações experimentais das técnicas de Moiré por projeção digital e Shearografia digital com metodologia de padrão único de entrada, de forma dinâmica (tempo real) e estática (utilização de imagens pré-obtidas), para aplicações em ambientes controlados e agressivos através de técnicas de visão de máquina. Esta IHM será disponibilizada para download no repositório da UFLA. Para desenvolvê-la, os seguintes objetivos específicos deverão ser cumpridos:

- Estudo e definição do fluxo de processamento do algoritmo, definindo as etapas necessárias para obtenção dos resultados e implementação dos processamentos estático e em tempo real;
- Pesquisa e implementação de algoritmos que apresentem execução rápida, bons resultados e baixa complexidade para o usuário;
- Realização de testes com padrões obtidos por procedimentos reais e com padrões simulados, quantificando a qualidade e velocidade de processamento da IHM.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Metrologia por interferência óptica

As técnicas de metrologia por interferometria óptica se baseiam na sobreposição de duas ou mais ondas em uma mesma região do espaço, resultando em um novo padrão que pode ser estudado e relacionado com as informações físicas do objeto em estudo. No caso das técnicas topográficas, tal fenômeno é obtido através da projeção de luz coerente (ABDELSALAM; YAO, 2017) ou estruturada (BELL; LI; ZHANG, 2016) sobre uma superfície em estudo, o que significa que este tipo de técnica oferece uma experimentação não-intrusiva e consequentemente não-destrutiva.

A interferometria holográfica e *speckle* na metrologia óptica consistem no uso de luz coerente, geralmente laser, para obtenção de padrões de interferência, baseadas no registro de duas gravações holográficas, antes e após uma pequena deformação de uma superfície em estudo, permitindo a interferência entre ambas, já que cada registro possui informações de fase e amplitude únicos (PEDRINI; ZOU; TIZIANI, 1996). As técnicas mais conhecidas baseadas neste tipo de interferometria são o ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*), Shearografia e o Moiré interferométrico. A interferometria por luz estruturada consiste na obtenção do padrão de interferência de dois padrões de ondas espaciais sobrepostos, sendo facilmente visualizado assim que se sobrepõem. A forma de projeção da luz estruturada depende do tipo de experimentação realizada. As franjas geradas pela interferência das ondas espaciais são conhecidas como franjas de Moiré, o que permite a formação de técnicas de metrologia óptica por interferência, apresentadas na Seção 2.2.

2.2 Técnica de Moiré

O termo “Moiré” não é relacionado ao nome de um autor, mas a um termo de origem francesa que consiste na visualização de um padrão de onda irregular formado em tecidos por processos de tecelagem ou prensagem. Os padrões formados são úteis para o fácil entendimento do conceito de interferência de ondas, já que a sobreposição de padrões gera as franjas de interferência construtiva e destrutivas de forma visual e simples. O primeiro uso deste fenômeno foi em 1874 por Lord Rayleigh na análise de qualidade de grades de difração (RAYLEIGH, 1874), sendo que o uso para medições topográficas de superfícies foi primeiramente apresentado por Meadows, Takasaki e Wasowski em 1970 (TAKASAKI, 1970). Antes deste ano, a técnica foi

principalmente utilizada em análises de tensões, deformações e deslocamentos. Posteriormente, a mesma foi adaptada para medições de vibrações (CREATH; WYANT; MALACARA, 1995).

O uso de Moiré no estudo de superfícies consiste basicamente na utilização de luz estruturada projetada sobre uma superfície em estudo e sua visualização através do mesmo padrão projetado para formação das franjas de interferência (OSTER; WASSERMAN; ZWERLING, 1964). Para isto, existem diversas configurações experimentais que projetam e definem a formação das franjas de interferência, sendo as técnicas de Moiré por projeção as mais aplicadas. Tais técnicas são as mais utilizadas devido a sua simples configuração experimental, ao custo acessível, aos bons resultados e à boa adaptação para aplicações em campo e em tempo real. Outra técnica que tem conquistado ótimos resultados na metrologia de superfícies é a de projeção de padrão de franjas, que não apresenta etapa de interferência e possui configuração experimental similar à técnica de Moiré por projeção digital.

Apesar dos diferentes arranjos experimentais, todas as técnicas de metrologia óptica relacionadas ao uso dos padrões de Moiré possuem a mesma finalidade e resultado final: a obtenção dos contornos de interferência, que carregam em si a informação sobre a grandeza física da superfície em estudo.

2.2.1 Técnica de Moiré por projeção

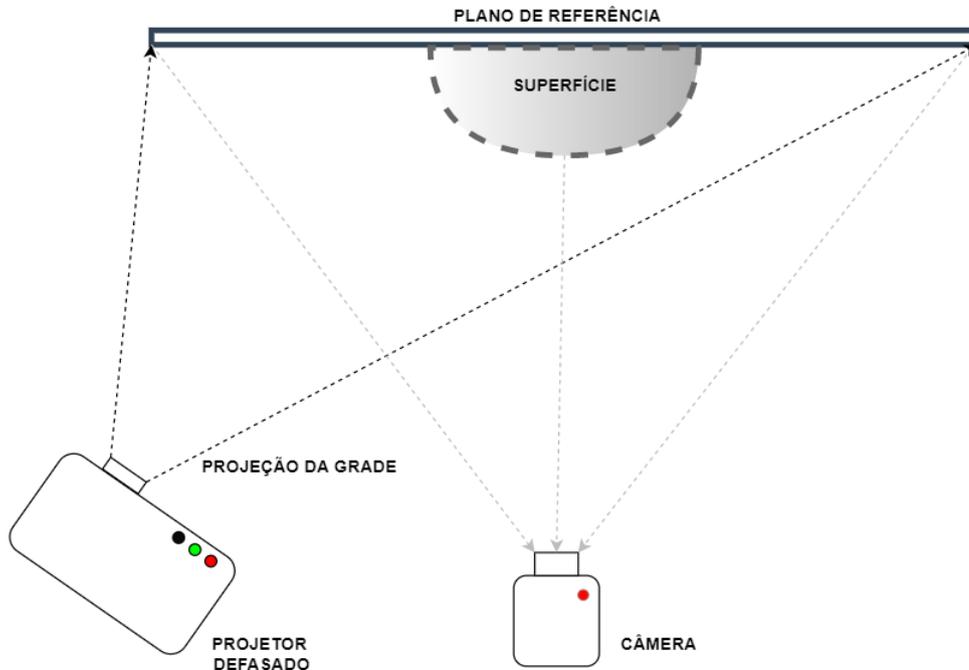
A técnica por projeção consiste basicamente na projeção da luz estruturada, geralmente em forma de grade, sobre a superfície em estudo. Para realizar tal projeção, os equipamentos normalmente utilizados são uma grade física iluminada por uma fonte de luz e a projeção da sombra da grade sobre a superfície ou utilização de um projetor de imagens, projetando uma grade digital. Ambas configurações são explicadas mais detalhadamente abaixo.

2.2.1.1 Moiré por projeção digital

Os equipamentos utilizados na experimentação desta configuração de projeção consistem em apenas um projetor, responsável pela projeção da luz estruturada geralmente em forma de grade linear, e uma câmera para obtenção digital dos padrões. Os equipamentos ficam com diferentes ângulos com relação a normal do plano de referência, conforme a Figura 2.1. O padrão de interferência é obtido de forma digital entre dois padrões obtidos previamente: o padrão de projeção da grade sobre a superfície e a visualização através do padrão de projeção da grade sobre o plano de referência, tal como apresentado na Figura 2.2. O padrão de interferência

necessita passar por um processo de filtragem, para eliminação das linhas da grade e obtenção das franjas de interferência puras, tal como apresentado na Figura 2.2-d (HALIOUA, 1986).

Figura 2.1 – Arranjo experimental do Moiré por projeção digital.



Fonte: Autor

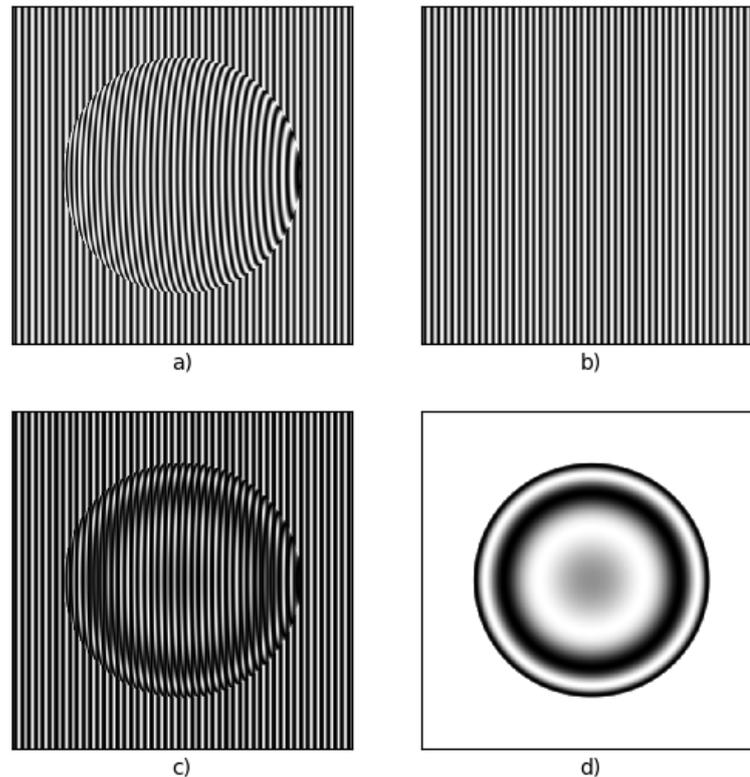
O uso de equipamentos simples, boa velocidade e qualidade devido ao processamento digital, garantem a aplicabilidade desta configuração nos mais diversos campos de estudo (BREQUE; DUPRE; BREMAND, 2004), (MCKENZIE et al., 2016) e (MORIMOTO, 2016).

2.2.1.2 Moiré por projeção de sombra

O diferencial desta configuração com relação a de projeção digital é a visualização do padrão de interferência de forma direta, sem necessidade de interferência digital, apesar de ainda necessitar passar pelo processo de filtragem para eliminação das linhas da grade. Os equipamentos utilizados consistem em apenas uma fonte de luz, câmera, e uma única grade física disposta à frente da superfície estudada, utilizada para projeção das franjas pela fonte de luz em forma de sombras e visualização do padrão de interferência pela câmera. Para formação do padrão de interferência, é necessária a colocação da fonte de luz ou da câmera ou ambas em diferentes ângulos com relação ao plano de projeção. A Figura 2.3 apresenta o arranjo experimental da técnica (YOSHIZAWA; TOMISAWA, 1993).

Esta configuração possui mais aplicação devido a visualização direta das franjas de interferência sem necessidade de processamento de padrões, possibilitando uma rápida avaliação

Figura 2.2 – Padrões de Moiré. a) Projeção da grade sobre o objeto; b) Grade de referência; c) Sobreposição de b) sobre a); d) Franjas de interferência de Moiré.



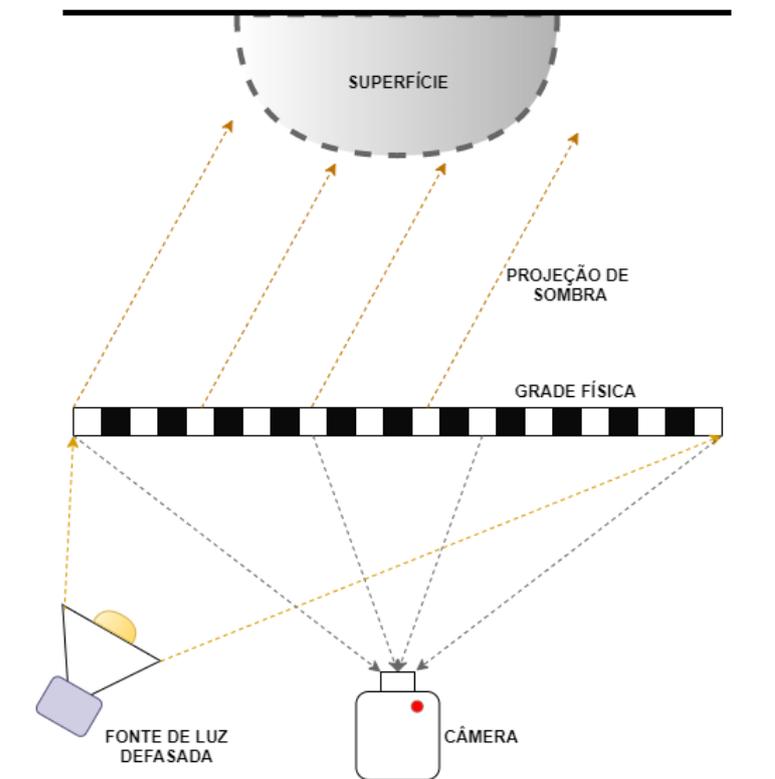
Fonte: Autor

dos resultados pelos contornos apresentados. A visualização do padrão formado desta configuração é similar à Figura 2.2-c. Ela apresenta fácil arranjo, calibração e obtenção do padrão de interferência, além de equipamentos simples e boa qualidade dos resultados, se tornando a mais aplicada na medicina (PORTO et al., 2010), (KUROKI et al., 2018) e na indústria (MORIMOTO, 2016).

2.2.2 Técnica de projeção de padrão de franjas

Esta técnica consiste basicamente na simples projeção de uma grade linear sobre uma superfície, sendo necessário que a projeção ou visualização das franjas seja defasada do plano de referência, permitindo a obtenção da deformação das franjas pelos contornos da superfície. Diferentemente das técnicas de Moiré, esta não apresenta etapa de interferência, mas permite a obtenção do perfil da superfície de forma simples e rápida. Sua primeira aplicação para medi-

Figura 2.3 – Arranjo experimental do Moiré por projeção de sombra.



Fonte: Autor

ções topográficas de superfícies se deu em 1967 por Rowe and Welford (ROWE; WELFORD, 1967). Seu arranjo experimental é similar ao da técnica de Moiré por projeção digital apresentado na Figura 2.1, sem a necessidade do padrão de referência. Um exemplo do padrão obtido por esta técnica é apresentado na Figura 2.2-a.

Sua simplicidade e velocidade de obtenção dos resultados fazem desta técnica uma das mais aplicadas atualmente para visualização tridimensional e estudo de superfícies (GORTHI; RASTOGI, 2010). Além do mais, esta é uma das etapas do Moiré por projeção digital, o que permite a fácil integração de ambas técnicas para visualização de franjas de interferência ou rápida visualização tridimensional da superfície estudada.

2.3 Shearografia

A shearografia foi criada com o objetivo de obter uma técnica de avaliação não destrutiva para detecção de falhas em materiais, de forma rápida e com possibilidade de aplicação em campo. Sua criação data do início dos anos 80, pelos pesquisadores Dr. John Butters, Dr. S. Nakadate e Dr. Mike Hung (NEWMAN, 2008). A shearografia é capaz de obter o gradiente da deformação de superfícies, ou seja, é capaz de exibir o campo de tensões presentes na su-

perfície, que podem indicar possíveis falhas estruturais na mesma (ZHAO et al., 2018). Esta característica foi ponto marcante para definir a presença desta nas indústrias aeronáutica, naval e automobilística, auxiliando no controle de qualidade para identificação de falhas na produção e na manutenção de peças.

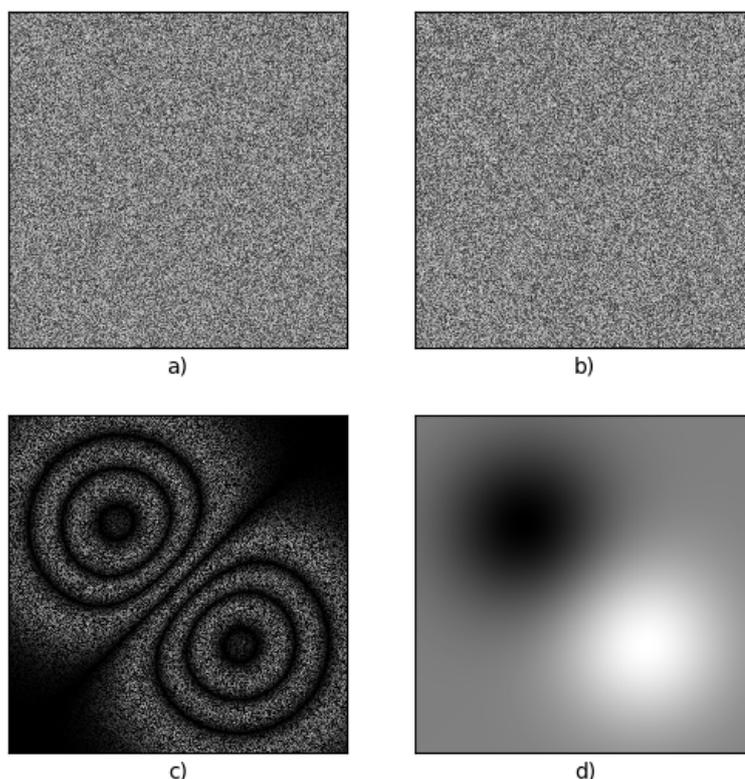
A shearografia utiliza luz coerente para obtenção de dois padrões de *speckle*, dos quais será obtido o gradiente da deformação da superfície estudada. O primeiro padrão *speckle*, também definido como padrão de referência, consiste na iluminação pelo laser da superfície a ser estudada e obtenção do mesmo através de um interferômetro baseado em um sistema de divisão de feixes e recombinação. O segundo padrão é obtido de forma similar ao primeiro, com a diferença que é aplicada uma leve deformação na superfície. A diferença entre os padrões forma as franjas de interferência, que indicam as tensões e possíveis falhas presentes no material estudado (FRANCIS; TATAM; GROVES, 2010) e (HUNG; HO, 2005). Todo o procedimento descrito é representado na Figura 2.4.

Dentre os interferômetros utilizados na shearografia, pode-se destacar o interferômetro de Mach-Zehnder e o interferômetro de Michelson modificado. Dentre estes, o último é o mais aplicado, devido à liberdade de ajuste e fácil implementação do processo de obtenção do mapa de fases por deslocamento de fase (HUNG, 1974). Os interferômetros têm como objetivo criar um caminho deslocado da imagem do padrão *speckle* e sobrepor sobre o mesmo, gerando um padrão com sua própria imagem sobreposta e levemente deslocada lateralmente, sendo este processo também denominado de cisalhamento.

2.3.1 Shearografia digital por interferômetro de Michelson modificado

O arranjo experimental da shearografia digital baseada no interferômetro de Michelson é exibida na Figura 2.5. Neste arranjo, o feixe de luz proveniente do laser é refletido pela superfície em estudo, passando pelo equipamento divisor de feixes, que permite a passagem de até metade da intensidade do feixe, e reflexão do restante. Os feixes divididos são então refletidos por dois espelhos, sendo um dos espelhos levemente defasado. Esta defasagem permite que o feixe percorra um caminho diferente que o outro feixe refletido pelo espelho não defasado, gerando uma imagem com um leve deslocamento lateral devido a recombinação dos feixes em direção à câmera de captura (YANG; XIE, 2016).

Figura 2.4 – Padrões obtidos da shearografia. a) Padrão de referência, b) Padrão de deformação, c) Diferença entre os padrões e d) Informação de fase exibindo os pontos de tensão.



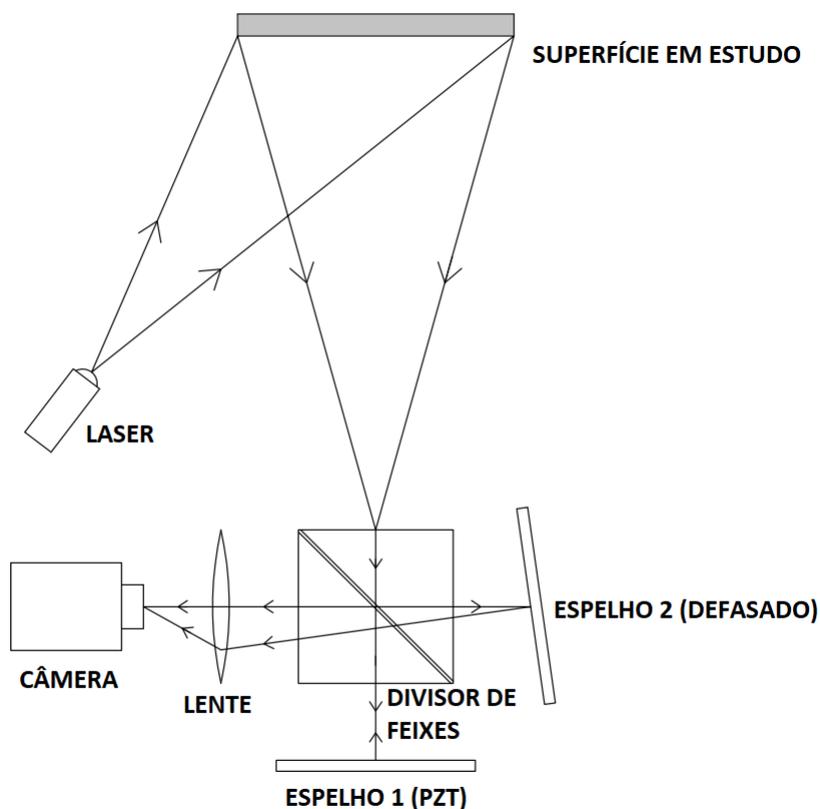
Fonte: Autor

2.4 Similaridades e procedimentos das técnicas de Moiré e Shearografia

Os padrões iniciais obtidos pelas câmeras experimentais em ambas as técnicas de Moiré e Shearografia necessitam passar por etapas de transformação e adequação para eliminação de informações indesejadas. Tais etapas incluem principalmente procedimentos de processamento de imagens e sinais, tais como seleção de região de interesse (ROI), transformação de escala de cores, redimensionamento e filtragem. Isto fornece padrões de maior qualidade e adequação para as etapas posteriores de processamento.

Os padrões de interferência obtidos por ambas as técnicas são similares estruturalmente, com presença de franjas em forma de caminhos abertas e/ou fechadas, diferindo apenas na intensidade de ruído. Estas franjas carregam a informação física estudada, apresentando uma avaliação estrutural da superfície. Para análise mais aprofundada e visualização tridimensional, é necessário extrair a informação de fase do padrão, que corresponde à topografia da superfície

Figura 2.5 – Arranjo experimental da shearografia por interferômetro de Michelson



Fonte: Autor

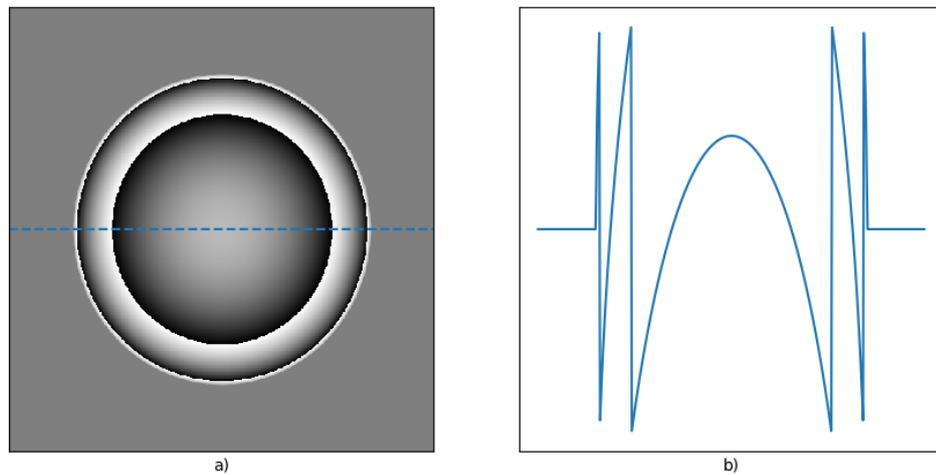
estudada no Moiré e o gradiente da deformação na Shearografia. Este procedimento de extração consiste na etapa de obtenção do mapa de fases empacotadas.

A fase empacotada leva este nome devido ao formato “empacotado” do mapa de fases, com presença de deslocamentos de módulo 2π , tal como demonstrado na Figura 2.6. Isto significa que para a obtenção da informação de fase verdadeira, é necessário passar por um processo de desempacotamento de fases, que consiste na aplicação de correções nos deslocamentos de fase, por meio da soma ou subtração de múltiplos de 2π às regiões empacotadas (YING, 2006). O desempacotamento da Figura 2.6 é demonstrado na Figura 2.7.

2.4.1 Obtenção do mapa de fases empacotadas

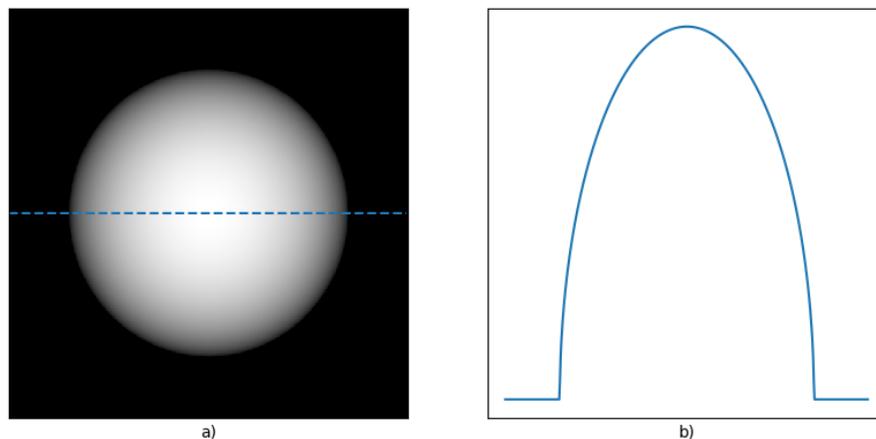
A obtenção do mapa de fases empacotadas para as técnicas ópticas discutidas consiste na utilização de algoritmos com capacidade de processamento de franjas com curvas fechadas, algo presente principalmente nos experimentos shearográficos. Pode-se classificar os algoritmos

Figura 2.6 – Mapa de fases empacotadas. a) Visualização bidimensional e b) Visualização do perfil de uma linha.



Fonte: Autor

Figura 2.7 – Mapa de fases desempacotadas. a) Visualização bidimensional e b) Visualização do perfil de uma linha.



Fonte: Autor

existentes em duas classes: os baseados em múltiplos padrões de interferência e os baseados em um único padrão.

Os algoritmos baseados em múltiplos padrões de interferência, consistem basicamente na obtenção de diversos padrões com defasagens conhecidas entre si. Isto é obtido com variações angulares em um dos espelhos do interferômetro de Michelson através de um piezoelétrico, e os deslocamentos lineares nas grades de projeção do Moiré. Os padrões obtidos são combinados para obtenção de um único mapa de fases. As técnicas mais utilizadas são o deslocamento

de fase temporal (CHOI; KIM, 1998),(YOSHIZAWA; TOMISAWA, 1993), e (KAUFMANN, 2011), deslocamento de fase espacial (projeção de franjas) (DONG; CHENG, 2016), obtenção por clusterização (Shearografia) (HUANG et al., 2011) e deslocamento de grade (Moiré e projeção de franjas) (ZHOU et al., 2018) e (ZUO et al., 2018). Os dois últimos algoritmos são passíveis de aplicação em tempo real.

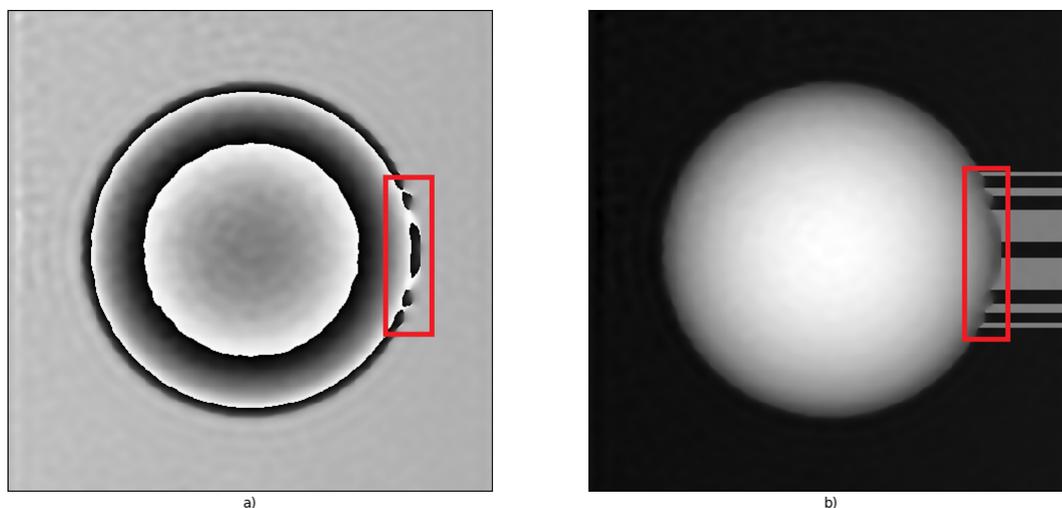
Os algoritmos baseados no processamento de um único padrão são os mais indicados para processamento em tempo real, já que não necessitam múltiplos padrões para obtenção de um único mapa de fase. Dentre os inúmeros existentes, os mais utilizados para processamento de franjas em forma de curvas fechadas são os baseados na transformada janelada de Fourier (KEMAO, 2007), transformada wavelet (HERNÁNDEZ et al., 2018), transformada espiral (LARKIN; BONE; OLDFIELD, 2001) e (LARKIN, 2001), filtros de quadratura com adaptação local (ESTRADA; SERVIN; MARROQUÍN, 2007) e seguidor de fase regularizado (SERVIN et al., 1998), sendo que o último possui capacidade de obtenção da fase desempacotada de forma direta.

O procedimento de projeção de franjas é baseado na presença do portador espacial, ou seja, o padrão não apresenta franjas em forma de curvas fechadas, o que exige diferentes algoritmos de obtenção de fases para uma única projeção, sendo os mais aplicados a transformada de Fourier (TAKEDA; INA; KOBAYASHI, 1982) e (BONE; BACHOR; SANDEMAN, 1986), transformada janelada de Fourier (KEMAO, 2004), transformada wavelet (ZHONG; WENG, 2004) e filtros de quadratura (MARROQUIN; FIGUEROA; SERVIN, 1997). A shearografia também possui modificações em seu arranjo experimental para introduzir o portador espacial (XIE et al., 2013), o que possibilita utilizar as mesmas técnicas citadas para obtenção do mapa de fases empacotadas.

2.4.2 Desempacotamento de fases

A qualidade do processo de desempacotamento de fases é diretamente proporcional à qualidade do mapa de fases obtido. Em muitos casos, os mapas de fases podem apresentar ruídos, falsos deslocamentos de fases, desconexão de caminhos, etc. Para isto, os algoritmos de desempacotamento devem ser capazes de identificar e tratar tais anomalias, para obtenção de um mapa de fases sem defeitos (YING, 2006). Um exemplo de um mapa de fases com defeitos é exibido na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Mapa de fases com defeito. a) Mapa de fases empacotado e b) Mapa de fases desempacotado.



Fonte: Autor

Os algoritmos de desempacotamento podem ser classificados em três tipos: Baseados em varredura, em estratégia de caminho e na otimização de funções de otimização (BALDI; BERTOLINO; GINESU, 2000). Os baseados em varredura são os mais simples, e consistem na varredura linear, radial, circular, ou baseado em mapas de qualidade (ZHAO et al., 2011) do mapa de fases em busca de deslocamentos de fase. Os de estratégia de caminho consistem na definição de caminhos de desempacotamento para evitar regiões problemáticas do mapa empacotado, sendo o mais famoso o método branch-cut (GUTMANN; WEBER, 2000). Os de minimização de função custo tem como objetivo a obtenção do mapa de fases desempacotados de forma completa, sem traçar caminhos nem varreduras do mapa empacotado, sendo os mais famosos os baseados no método de otimização por mínimos quadrados e suas variações (PRITT; SHIPMAN, 1994), (GHIGLIA; ROMERO, 1995), e (HUNG; YAMADA, 1998), e Lp-Norm (GHIGLIA; ROMERO, 1996).

2.5 Visão de Máquina

Para aplicações em tempo real, os ruídos provenientes do ambiente não devem ou devem influenciar o mínimo possível o procedimento e o resultado do processo experimental das técnicas. A visão de máquina vem com o objetivo de desenvolver aplicações que sejam robustas ao ambiente inserido, por meio do uso de visão computacional, processamento de imagens e sinais e técnicas de aprendizado de máquina, dependendo das necessidades do projeto (STEGER; UL-RICH; WIEDEMANN, 2018). Nas técnicas de Moiré e Shearografia, o uso de filtros tais como

passa-baixa, passa-alta, passa-banda e de quadratura são necessários para redução de ruídos e auxílio no processamento dos passos de cada técnica. O uso de transformadas tal como a de Fourier e wavelet são importantes e podem ser utilizadas no processamento. Os procedimentos de recorte, redimensionamento e rotação são importantes para a definição e a adequação de regiões em que as técnicas deverão ser aplicadas. O uso de aprendizado de máquina, que consiste em algoritmos com capacidade de aprender padrões em dados e fazer previsões à partir de seus próprios erros sem necessidade de programação explícita (LEE; SHIN; REALFF, 2018), é um campo em desenvolvimento no estudo de técnicas de filtragem de padrões de franjas (YAN et al., 2019) , obtenção de fases empacotadas e desempacotamento de fases (FENG et al., 2019) e (SPOORTHI; GORTHI; GORTHI, 2018), através do uso de redes neurais de aprendizado profundo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Linguagem de implementação e bibliotecas

Todo desenvolvimento da IHM foi feita na linguagem de programação *Python*. Os principais motivos da escolha desta linguagem são:

- Linguagem de fácil entendimento, aprendizado e sintaxe de fácil assimilação, permitindo a criação de códigos legíveis e limpos;
- Possui grande número de bibliotecas para diversas aplicações, sendo as de aplicação científica composta de funções poderosas e bem otimizadas;
- É bem conhecida para aplicações de análise de dados e criação de modelos preditivos de aprendizado de máquina, com inúmeras bibliotecas para tais aplicações;
- É uma linguagem moderna, envolvendo os meios empresarial, de pesquisa, hobistas, iniciantes, etc. Devido a isto, tem recebido grandes contribuições para desenvolvimento nos mais diversos campos do conhecimento.

No desenvolvimento deste trabalho, as bibliotecas que foram utilizadas são voltadas para os campos de visão computacional, aprendizado de máquina, análise de dados e processamento de sinais e imagens. Estas são:

- Numpy: Biblioteca para aplicações de computação científica, com capacidade de trabalhar com arranjos, vetores e matrizes de múltiplas dimensões, álgebra linear, geração robusta de números aleatórios, transformações para o domínio da frequência e funções matemáticas em geral. Possui alta velocidade de processamento e fácil aplicabilidade. Será utilizada para implementações de praticamente todas as etapas do software.
- Scipy: Biblioteca para aplicações de computação científica, com módulos para processamento de imagem e sinais, álgebra linear, transformações para o domínio da frequência, otimizações, etc. Possui alta velocidade de processamento e fácil aplicabilidade.
- OpenCV: Biblioteca para aplicações de visão computacional e processamento de imagens, com finalidade para aplicações de tempo real. Possui integração com algoritmos de aprendizado profundo para desenvolvimento de tarefas mais complexas. Desenvolvida para múltiplas linguagens e ambientes de desenvolvimento, como Python, Matlab e

Java. Possui capacidade de obter, manipular, salvar e carregar imagens nos mais diversos formatos.

- Scikit-Image: Biblioteca voltada para aplicações de processamento de imagens. Simples, com fácil aplicação e processamento rápido.
- PyQT: Plataforma para desenvolvimento de GUI's (Interface Gráfica do Usuário) baseada na ferramenta QT, adaptada para aplicações em Python. Extremamente intuitiva e completa para aplicações simples e avançadas.
- Scikit-Learn: Biblioteca voltada para aplicações de aprendizado de máquina. Possui diversos algoritmos de aprendizagem, além de ferramentas para seleção, treinamento e validação dos modelos. Também possui ferramentas de análise, modificação e transformação de dados.
- Keras: Biblioteca para aprendizado de máquina, voltada principalmente para aplicações de redes neurais e deep learning, com suporte a uma grande quantidade de arquiteturas e capacidade de desenvolvimento modular e simplificado dos modelos de aprendizagem.
- Pandas: Biblioteca para manipulação de dados. Possui inúmeras ferramentas para análises, preparação e manipulação de inúmeros formatos de dados. Indispensável para aplicações de aprendizado de máquina.
- Matplotlib e Seaborn: Bibliotecas para visualização gráfica de dados. Suporte para vários tipos de dados, estilos e dimensões, permitindo a geração de gráficos simples até de alta complexidade.
- Pyqtgraph: Biblioteca para visualização gráfica de dados. Voltada para aplicações matemáticas, científicas e de engenharia, possuindo como principal característica a alta velocidade de processamento e exibição gráfica.

3.2 Fluxograma de funcionamento da IHM

A Figura 3.1 apresenta o fluxograma sequencial de funcionamento da IHM e suas respectivas etapas. Cada etapa do fluxograma é descrita nas subseções abaixo.

3.2.1 Tela Inicial

Toda primeira execução da IHM apresentará uma tela inicial que permitirá ao usuário a escolha da técnica óptica que desejará utilizar, no caso a Shearografia ou Moiré. Esta escolha inicial torna o desenvolvimento da IHM mais modular, permitindo que cada técnica possua sua própria interface de processamento, tornando-a mais simples e visualmente limpa. Além disto, apesar da similaridade dos padrões de interferência, as técnicas apresentam etapas de obtenção e pré-processamento diferentes, o que reforça a necessidade do desenvolvimento específico. Também é possível iniciar um gerador de grades como ferramenta adicional para os experimentos de Moiré.

3.2.2 Tipo de processamento: dinâmico e estático

Nas interfaces de cada técnica o usuário pode escolher o tipo de processamento que deseja, seja este dinâmico (online), ou estático (offline). Para cada técnica, o processamento possui algumas semelhanças e diferenças.

Na técnica de Moiré o processamento estático consiste no carregamento dos padrões da grade e de projeção, enquanto que no procedimento em tempo real, o padrão da grade é definido em tempo real pelo usuário e o padrão de projeção e interferência é obtido continuamente durante o experimento. Os procedimentos subsequentes são os mesmos para ambos tipos de processamento, com a diferença que o estático mantém o resultado final e o dinâmico retorna à obtenção do padrão de projeção e atualiza os resultados.

Na Shearografia, para o processamento estático é possível carregar os padrões de referência e o de deformação, para posteriormente obter o padrão de interferência, ou carregar diretamente o padrão de interferência para processamento e exibição dos resultados posteriores. No processamento online, a padrão de referência é definido pelo usuário e este servirá para interferência com o padrão de deformação da superfície obtido pela câmera de forma contínua. Tal como no Moiré, a diferença é que o processamento estático mantém o resultado obtido, enquanto o dinâmico obtém um novo padrão de deformação e atualiza os resultados posteriores.

3.2.3 Obtenção e carregamento dos padrões para processamento

Tal como tratado na Seção 3.1, a biblioteca *OpenCV* possui diversas funções para obtenção, tratamento e extração de informações de imagens. Ela foi utilizada para obtenção dos padrões em ambas técnicas, já que permite o acesso a qualquer câmera, desde que esta esteja

funcional na máquina e possua os drivers instalados, além da utilização para etapas de transformação para escala de cinza e redimensionamentos necessários.

A biblioteca *OpenCV* também possui a funcionalidade de carregamento de imagens para o programa, e foi utilizada em conjunto com funções do PyQT que permitem a exibição de janelas de exploração da máquina, permitindo a obtenção do endereço local onde a imagem está presente, gerando mais mobilidade para o usuário que terá apenas de selecionar a imagem onde estiver armazenada.

3.2.4 Obtenção dos padrões de interferência

Os procedimentos para obtenção dos padrões de interferência de ambas técnicas em conjunto com as equações envolvidas são demonstrados no Apêndice A. Com relação às operações envolvidas na obtenção destes padrões no ambiente de programação *Python*, as imagens em escala de cinza são consideradas como instâncias da biblioteca *numpy*, ou seja, podemos trabalhar com elas como matrizes bidimensionais, tornando operações como multiplicação, soma, subtração e módulo tão simples quanto trabalhar com escalares, simplificando a obtenção dos padrões de ambas técnicas.

3.2.5 Adaptação dos padrões

A adaptação dos padrões consiste nas operações de definição da região de interesse (ROI), redimensionamento e filtragem da imagem/padrão de entrada. A seleção da ROI poderá ser definida no padrão obtido em tempo real ou estático, sendo que todos os padrões subsequentes serão adaptados conforme a definição da primeira. A forma da ROI será retangular com tamanho configurável pelo usuário.

O redimensionamento das imagens é de extrema importância, já que possui influência direta no tempo de processamento dos algoritmos posteriores. Desta forma, foi definida uma quantidade de pixels que a imagem deveria ter, realizando o redimensionamento proporcional das dimensões das imagens de forma a aproximar à esta quantidade. Esta quantidade de pixels definida permite a visualização dos padrões obtidos sem perda de informação e qualidade. A biblioteca *OpenCV* possui função para redimensionamento de imagens, sendo o algoritmo de interpolação bilinear (PARSANIA; VIRPARIA, 2016) o utilizado por padrão, oferecendo bons resultados para redimensionamentos pequenos e médios.

Os filtros aplicados nos padrões para obtenção de resultados mais confiáveis e com mais qualidades foram implementados manualmente, já que existem especificações a serem cumpridas e desejáveis na implementação dos procedimentos posteriores. Foram implementados dois tipos de filtros no domínio da frequência: um passa-baixa e um passa-alta. A teoria de implementação dos filtros é exibida no Apêndice E.

3.2.6 Obtenção do mapa de fases

Esta etapa consiste na aplicação dos algoritmos pesquisados e escolhidos para o processamento das franjas de interferência abertas, fechadas ou mistas, com base na velocidade de processamento e qualidade do mapa de fases.

Para obtenção do mapa de fases, em ambas técnicas ópticas um dos procedimentos mais aplicados é o deslocamento de fase temporal, conforme apresentado no referencial teórico. Este trabalho não foi baseado em tal técnica, já que exige a obtenção de múltiplos padrões e possui maior susceptibilidade a erros e ruído, tornando o procedimento em tempo real mais complexo. Na Shearografia foi feita a implementação de algoritmos baseados no processamento de apenas um padrão de interferência. Na técnica de Moiré, a obtenção do mapa de fases não foi baseada no padrão de interferência, mas nos padrões de projeção e grade. Tal escolha é devido aos algoritmos para processamento de franjas abertas e unidirecionais possuírem melhor qualidade e velocidade de processamento, algo que é possível nos experimentos de Moiré. Neste caso, dois algoritmos estão disponíveis para serem utilizados, o baseado na transformada bidimensional de Fourier e o da transformada de Hilbert, ambos detalhados nos Apêndices D e B deste trabalho. Para a Shearografia, foram utilizados a transformada de Hilbert para padrões que apresentem apenas franjas lineares unidirecionais, e a técnica da obtenção rápida de fase para franjas fechadas e mistas, ambos detalhados nos apêndices B e G.

3.2.7 Desempacotamento do mapa de fases

Os mapas de fases obtidos em ambas técnicas ópticas são similares, o que permite a utilização de um único algoritmo de desempacotamento para ambas. O algoritmo utilizado é o baseado em mapas de qualidade e estratégia de caminho não-linear, explicado no Apêndice C. Tal algoritmo é implementado na biblioteca *scikit-image*, o que significa que é um algoritmo bem otimizado, garantindo velocidade e qualidade na obtenção dos resultados.

3.2.8 Exibição

Os resultados das etapas descritas acima são exibidos nas janelas das interfaces de ambas as técnicas ópticas. São exibidas quatro janelas na interface principal e suas respectivas exibições são definidas da seguinte maneira:

- Primeira janela: Exibição dos padrões de projeção da grade no Moiré e do padrão de deformação na Shearografia;
- Segunda janela: Exibição dos padrões fixos, a projeção da grade no caso de Moiré e a referência fixa na Shearografia;
- Terceira janela: Exibição dos padrões de interferência com aplicação dos filtros, magnitude do espectro de frequências da transformada de Fourier do padrão de interferência e a mesma magnitude com aplicação dos filtros;
- Quarta janela: Exibição do mapa de fases empacotadas e desempacotadas.

Para exibição tridimensional da superfície obtida, no caso o mapa de fases desempacotado, foi definido um botão para acesso e exibição da interface do gráfico, sendo esta interface iterativa e configurável para exibição conforme necessidades do usuário. A janela de exibição e seleção da ROI também é acessada a partir de um botão na interface. Todos os padrões exibidos são possíveis de salvar, com exceção das magnitudes do espectro de frequência exibidos na terceira janela.

3.2.9 Funcionalidades adicionais: gerador de grades

Foi implementado como ferramenta adicional um gerador de grades cossenoidal para utilização nos experimentos de Moiré. Tal funcionalidade facilitará a experimentação sem necessidade de programas adicionais para gerar e projetar a grade desejada, além de permitir alterações nas frequências das direções x e y e fase das linhas em tempo real através de comandos do teclado, garantindo mais praticidade no processo experimental.

3.3 Escolha dos algoritmos de processamento das etapas

As técnicas ópticas de Moiré e Shearografia possuem um grande número de algoritmos para obtenção da fase empacotada e desempacotada, conforme apresentado no referencial teórico. A escolha dos algoritmos foi baseada nas métricas de tempo e qualidade exibidos em

trabalhos e artigos publicados. Além disto, foi levado em conta a complexidade de utilização do algoritmo, tal como a dependência da configuração de parâmetros iniciais, buscando os que apresentassem o menor número de parâmetros e maior robustez a tais parâmetros, eliminando o uso excessivo de ajuste fino.

3.4 Validação dos algoritmos utilizados

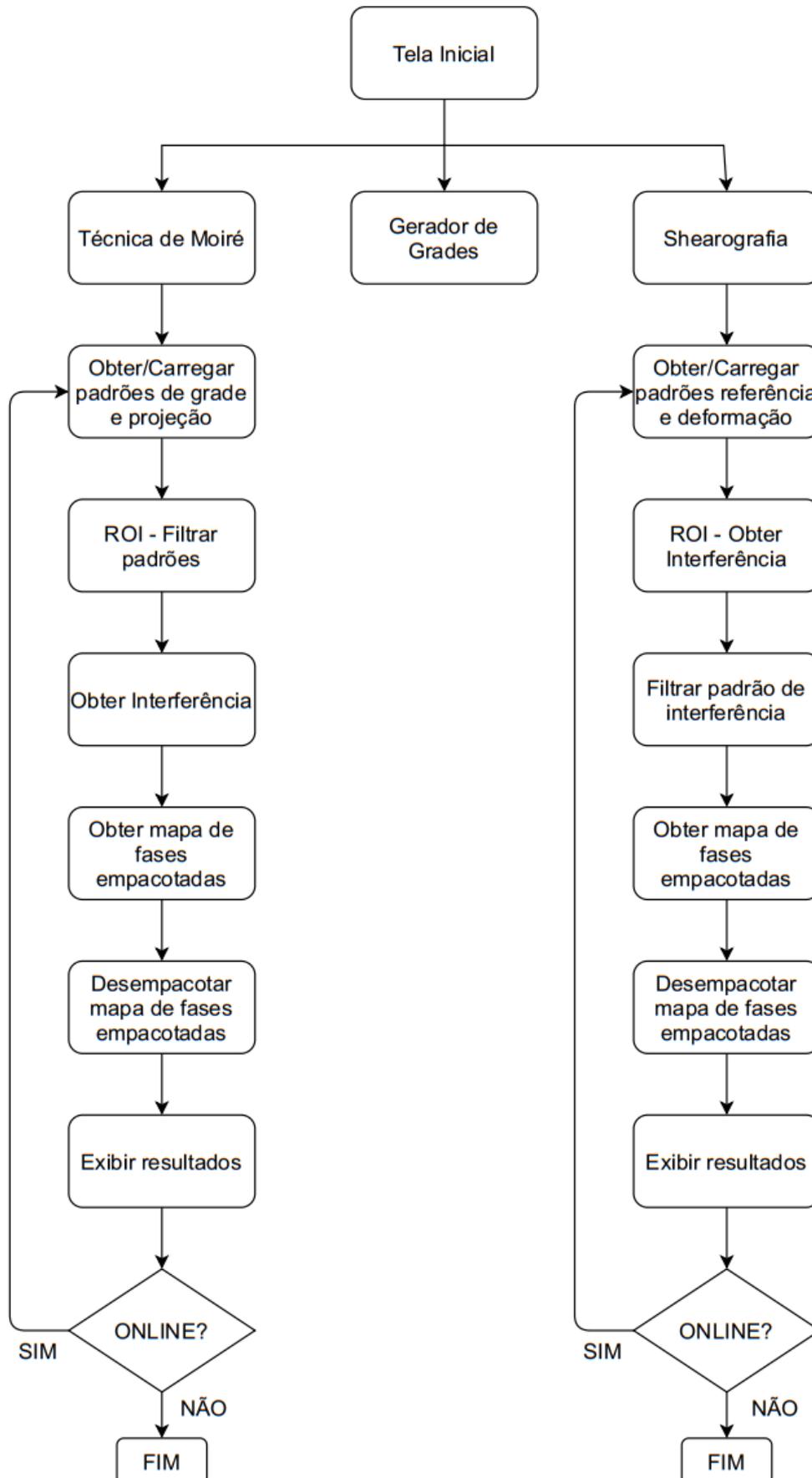
Para validar o funcionamento e eficiência da IHM, foram realizados testes com padrões gerados artificialmente através das equações exibidas no Apêndice A. Através destes padrões podemos utilizar métricas de avaliação para análise da fase recuperada com relação à real criada. Tais padrões foram adicionados de ruídos gaussianos para avaliar a capacidade de processamento dos algoritmos. Também foram utilizados padrões reais, mas apenas para análise visual da fase recuperada, já que o que buscamos é a fase mais aproximada possível da real. O tempo de execução de cada interface da IHM no modo execução online também foi avaliado.

As métricas utilizadas para avaliação da qualidade e tempo de execução foram o erro quadrático médio (EQM) entre os padrões real e obtido pela interface, representado pela equação 3.1, e a média, desvio padrão e valores mínimo e máximo do tempo de execução e obtenção dos resultados online de cada técnica após mil iterações.

$$EQM = \frac{\sum(F_r - F_o)^2}{N} \quad (3.1)$$

sendo EQM o erro quadrático médio, F_r a fase real, F_o a fase obtida e N o número de pixels do padrão.

Figura 3.1 – Fluxograma de funcionamento da IHM.



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos estão divididos em cinco etapas: a apresentação final das janelas desenvolvidas e estrutura de funcionamento da IHM, as variáveis e definições internas da IHM, as análises de qualidade dos resultados obtidos no uso da IHM para padrões simulados e reais, os tempos de execução online das interfaces de Moiré e Shearografia, e alguns problemas presentes na funcionalidade de algoritmos.

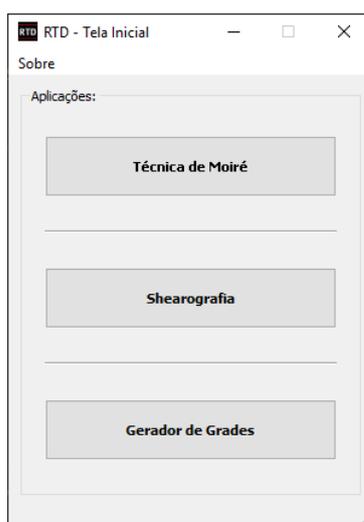
4.1 Apresentação e estrutura de funcionamento da IHM

Nesta seção são apresentadas as janelas presentes na manipulação da IHM e as respectivas funcionalidades presentes nas janelas.

4.1.1 Interface inicial

A Figura 4.1 apresenta a janela executada inicialmente para seleção da técnica óptica desejada ou o gerador de grades cosseinodal. A janela se mantém aberta independente da escolha da técnica desejada, e não permite a abertura de ambas técnicas ópticas, mas permite a abertura do gerador em paralelo.

Figura 4.1 – Janela da interface inicial da IHM.



Fonte: Autor

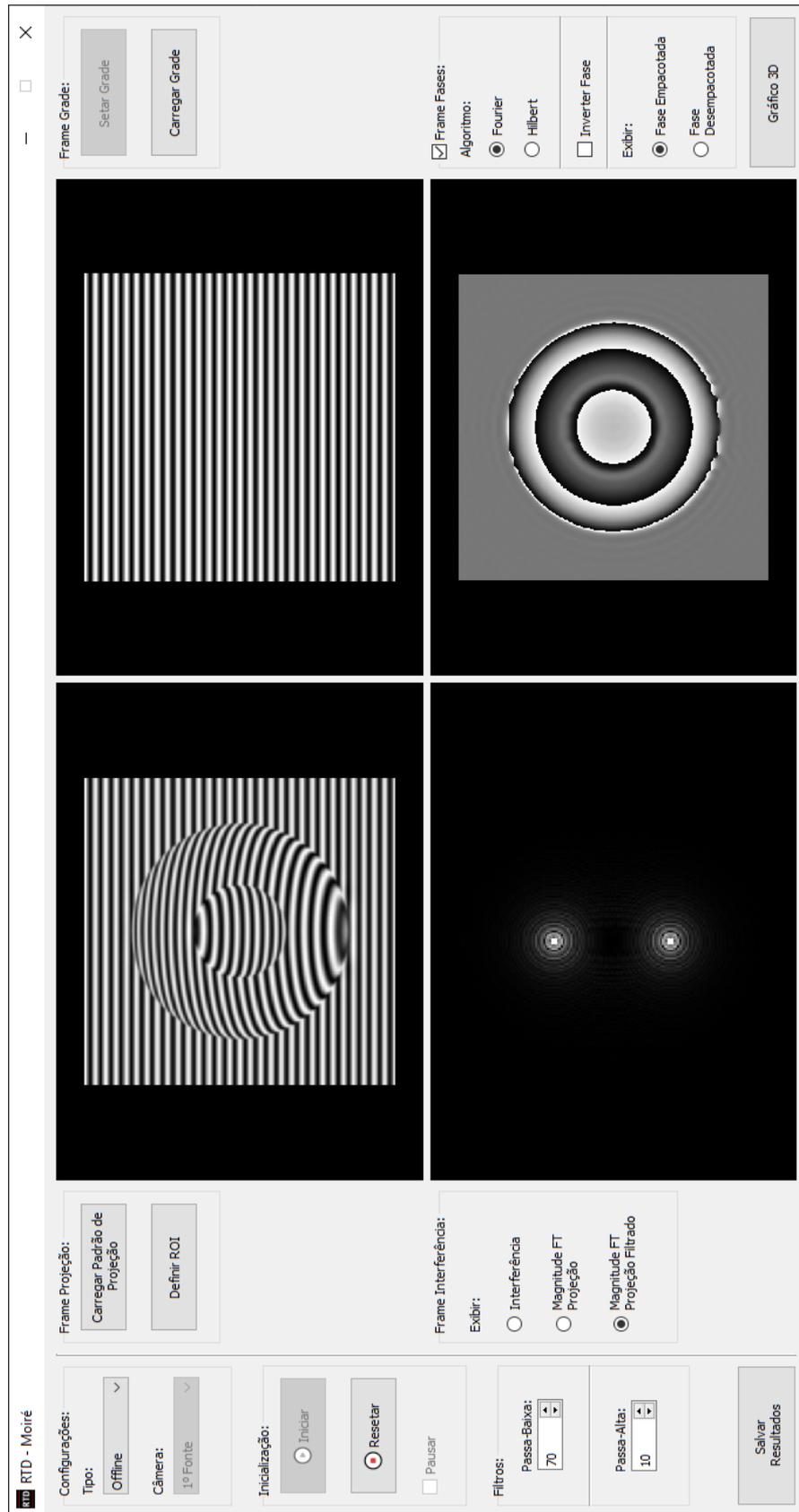
O menu “sobre” relata sobre os participantes do projeto e uma visão geral de funcionamento da IHM.

4.1.2 Interface de Moiré

A Figura 4.2 apresenta a interface para utilização na técnica de Moiré. As funcionalidades presentes na mesma são detalhadas abaixo, iniciando da parte superior esquerda para a inferior direita.

- Tipo: caixa de seleção para definição de tipo de processamento desejado, sendo estes offline ou online;
- Câmera: caixa de seleção para definição de qual câmera será selecionada. Alguns dispositivos possuem webcam e a câmera do processo experimental, sendo necessário definir a câmera a ser utilizada. Permite apenas a seleção entre duas fontes de vídeo;
- Inicialização: Possui botões para inicializar, parar e pausar o processamento online. Possui desativação do botão de início e caixa de seleção para pausar caso o processamento seja offline, além de transformar o botão de parar em “resetar”, caso o usuário deseje resetar os padrões carregados.
- Filtros: Caixas de entrada numérica para seleção do nível de filtragem dos filtros passa baixa e passa alta. Eles são aplicados aos padrões de projeção e grade simultaneamente;
- Salvar resultados: Botão para salvar os resultados do processamento. Salva todos os padrões possíveis de visualizar na interface, menos as magnitudes das transformadas de Fourier bidimensional, além de ser necessário abrir a janela gráfica 3D para salvar a superfície tridimensional;
- Frame projeção: Permite carregar o padrão de projeção caso esteja no modo de processamento offline e abertura da janela de definição da ROI. Possui desativação de botões conforme o processamento escolhido;
- Frame interferência: Seleção de visualização entre o padrão de interferência, magnitude da transformada de Fourier bidimensional do padrão de projeção ou o mesmo com os filtros aplicados;
- Frame grade: Permite definir a grade online ou carrega-la no processamento offline. Possui desativação de botões conforme o processamento escolhido;

Figura 4.2 – Janela da interface de Moiré.



Fonte: Autor

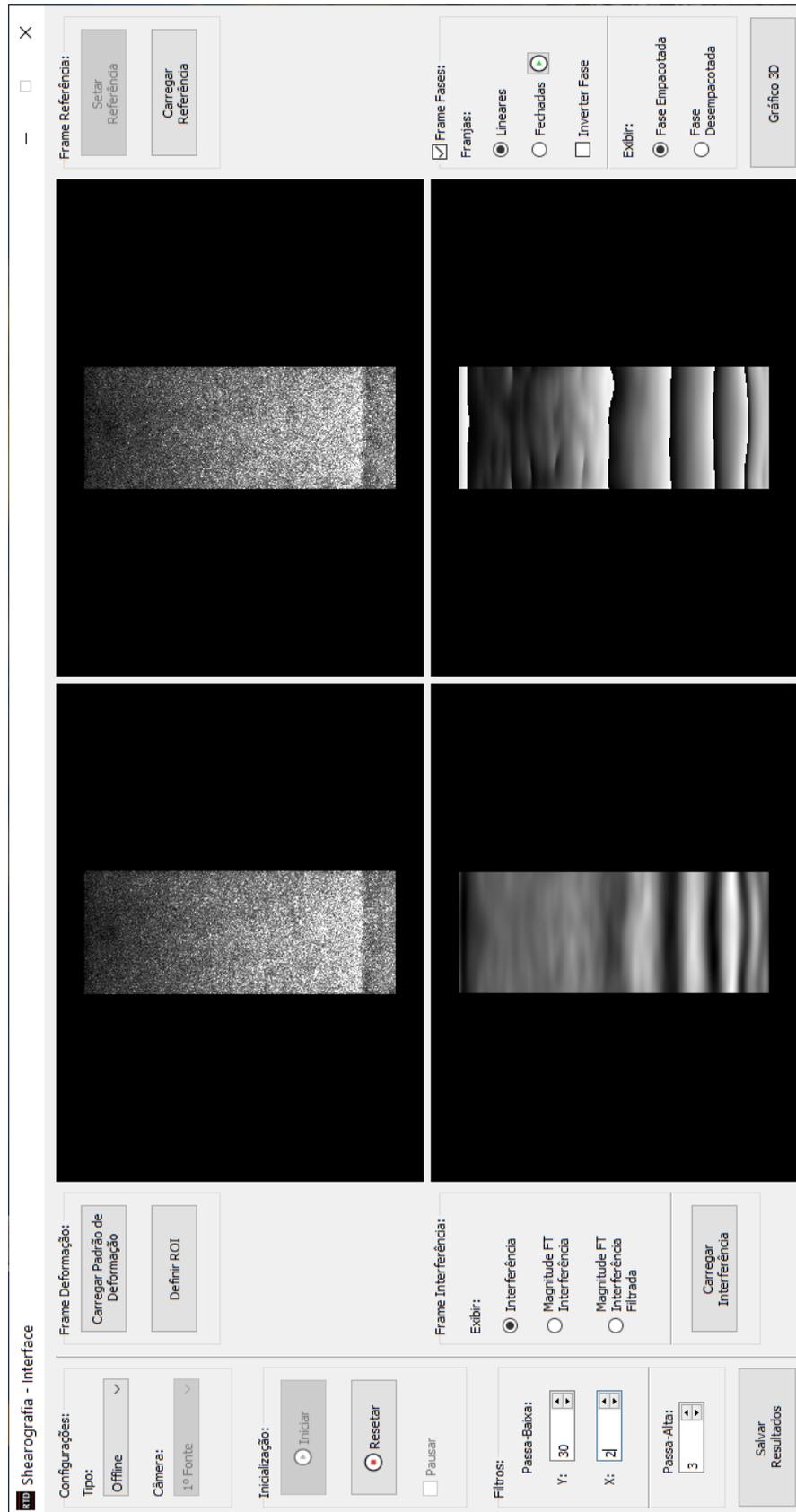
- **Frame fases:** Frame para seleção do algoritmo para obtenção da fase empacotada, inversão de sinal da fase empacotada e seleção de visualização da fase empacotada ou desempacotada. Para o algoritmo de Hilbert, é necessária a definição da grade. É possível desativar todas as funcionalidades desmarcando a caixa de seleção inicial, permitindo maior velocidade de processamento.
- **Botão Gráfico 3D:** Botão que executa janela de visualização tridimensional. É possível abrir a qualquer momento, mas apresenta conteúdo apenas quando o frame de fases está em funcionamento.

4.1.3 Interface da Shearografia

A Figura 4.3 apresenta a interface para utilizar a técnica da Shearografia. As funcionalidades desta interface são detalhadas abaixo:

- **Tipo:** caixa de seleção para definição de tipo de processamento desejado, sendo estes offline ou online;
- **Câmera:** caixa de seleção para definição de qual câmera será selecionada. Alguns dispositivos possuem webcam e a câmera do processo experimental, sendo necessário definir a câmera a ser utilizada. Permite apenas a seleção entre duas fontes de vídeo;
- **Inicialização:** Possui botões para inicializar, parar e pausar o processamento online. Possui desativação do botão de início e caixa de seleção para pausar caso o processamento seja offline, além de transformar o botão de parar em “resetar”, caso o usuário deseje resetar os padrões carregados.
- **Filtros:** Caixas de entrada numérica para seleção do nível de filtragem dos filtros passa baixa e passa alta. O filtro passa-baixa possui capacidade de filtragem focada na direção horizontal ou vertical, ajudando a eliminar mais ruídos e obter franjas mais intensas. É aplicado apenas ao padrão de interferência;
- **Salvar resultados:** Botão para salvar os resultados do processamento. Salva todos os padrões possíveis de visualizar na interface, menos as magnitudes das transformadas de Fourier bidimensional e a superfície tridimensional, sendo necessário abrir a janela gráfica 3D para salvar a última;

Figura 4.3 – Janela da interface da shearografia.



Fonte: Autor

- **Frame deformação:** Permite carregar o padrão de deformação caso esteja no modo de processamento offline e abertura da janela de definição da ROI. Possui desativação de botões conforme o processamento escolhido;
- **Frame interferência:** Seleção de visualização entre o padrão de interferência, magnitude da transformada de Fourier bidimensional do padrão de interferência ou o mesmo com os filtros aplicados;
- **Frame referência:** Permite definir o padrão de referência online ou carrega-la no processamento offline. Possui desativação de botões conforme o processamento escolhido;
- **Frame fases:** Frame para seleção do tipo de franjas presentes no padrão de interferência, inversão de sinal da fase empacotada e seleção de visualização da fase empacotada ou desempacotada. É possível desativar todas as funcionalidades desmarcando a caixa de seleção inicial, permitindo maior velocidade de processamento.
- **Botão Gráfico 3D:** Botão que executa janela de visualização tridimensional. É possível abrir a qualquer momento, mas apresenta conteúdo apenas quando o frame de fases está em funcionamento.

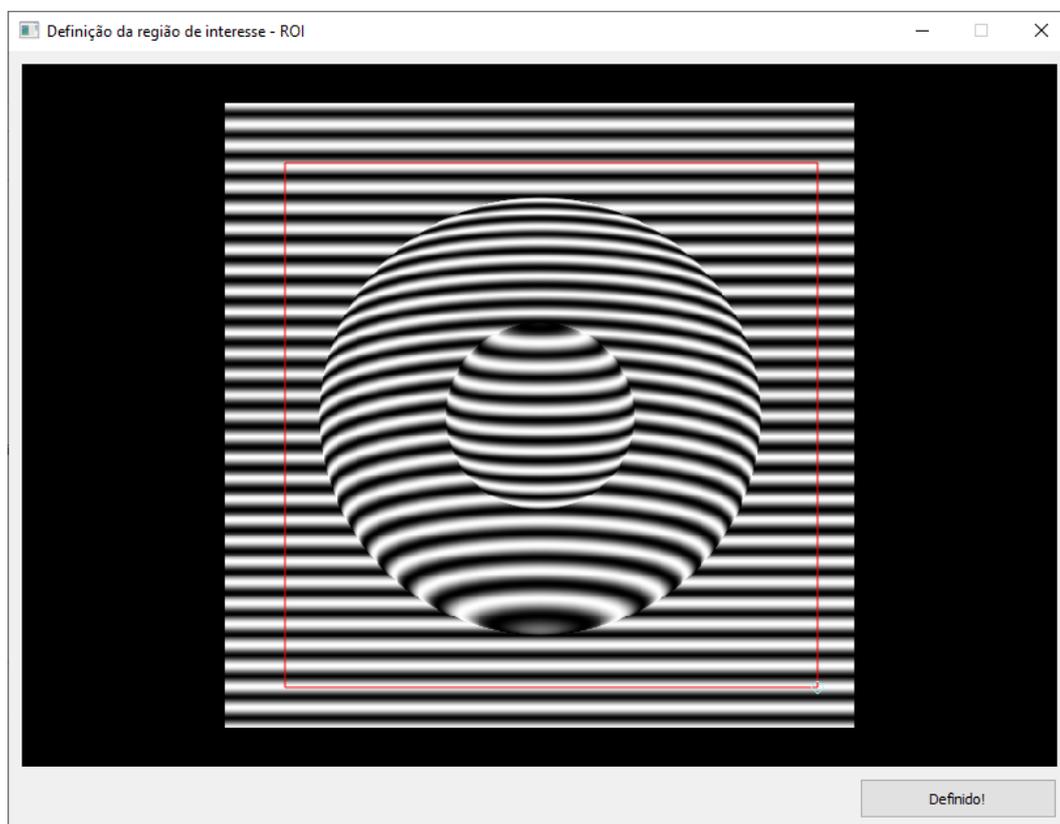
Para a utilização do algoritmo de franjas fechadas existe um botão à frente da caixa de seleção deste algoritmo para executá-lo. Esta implementação foi devida ao tempo de execução deste algoritmo, o que poderia travar toda a IHM se caso se mantesse executando em tempo real, tal como todos os outros procedimentos. Desta forma, tanto no processamento offline quanto online é necessário primeiramente preparar o padrão de interferência para finalmente executar o algoritmo de curvas fechadas. Desta forma, a quarta janela que exhibe as fases empacotada e desempacotada só atualiza ao executar o algoritmo, mantendo os resultados até que se execute uma nova vez. A discussão sobre tempos de execução é demonstrada na quarta seção deste capítulo.

4.1.4 Janela de seleção de ROI

A tela para seleção da ROI é aberta separadamente da interface principal e é similar para ambas técnicas. Tal como demonstrado na Figura 4.4, esta apresenta uma caixa de seleção retangular configurável pelo usuário, que deverá confirmar a seleção desejada pelo botão “defi-

nido” no canto inferior direito. É possível movimentar e estender a região da caixa de seleção por toda a imagem, não sendo possível rotacioná-la.

Figura 4.4 – Janela de seleção de ROI.



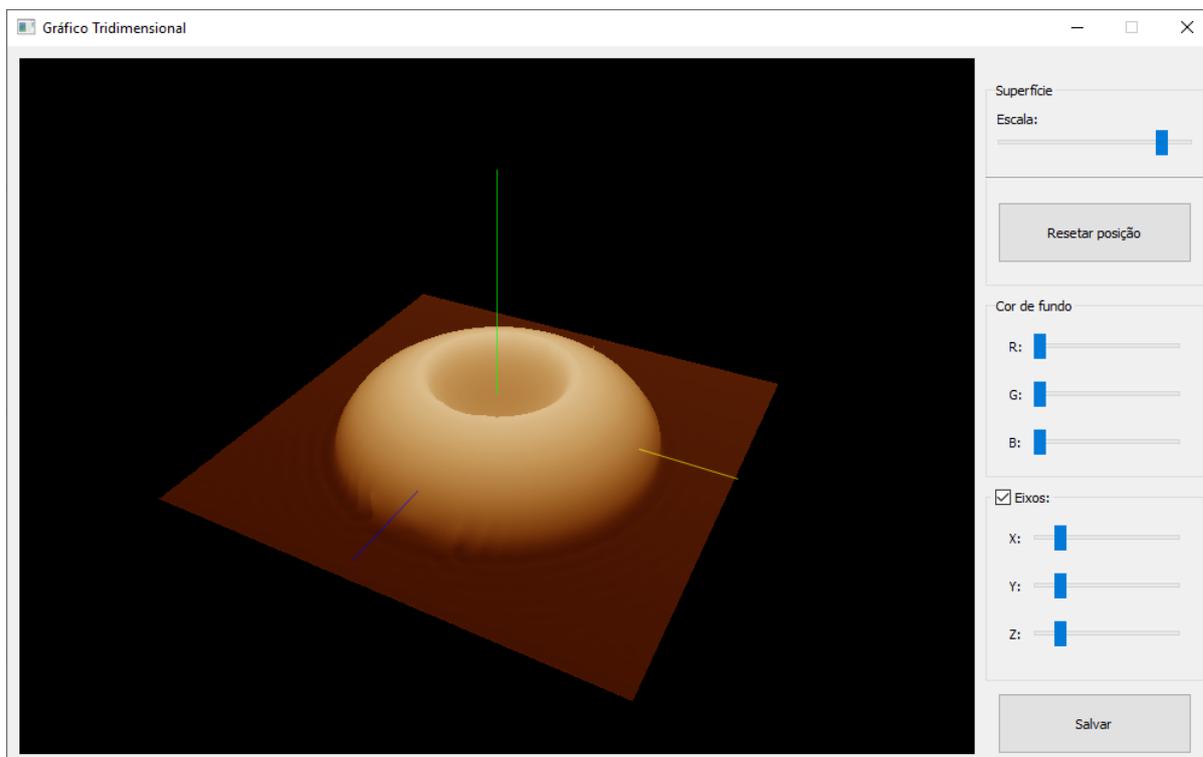
Fonte: Autor

4.1.5 Janela de exibição gráfica tridimensional

A tela de exibição tridimensional da superfície, tal como a de definição da ROI, é aberta separadamente da interface principal e é similar para ambas as técnicas. Tal como exibido na Figura 4.5, o gráfico é interativo através de ações com o mouse e as funcionalidades no lado direito do gráfico permitem as seguintes configurações:

- Superfície: permite através da escala esticar ou achatar a superfície visualizada e resetar a visualização da superfície para o posicionamento inicial padrão através do botão;
- Cor de fundo: permite a modificação da cor de fundo do gráfico através do padrão RGB;
- Eixos: configuração do tamanho dos eixos onde a superfície é exibida. É possível desativá-los através da caixa de seleção no menu;
- Salvar: Botão para salvar a superfície tridimensional.

Figura 4.5 – Janela de seleção de visualização gráfica tridimensional.



Fonte: Autor

4.1.6 Telas de carregar e salvar

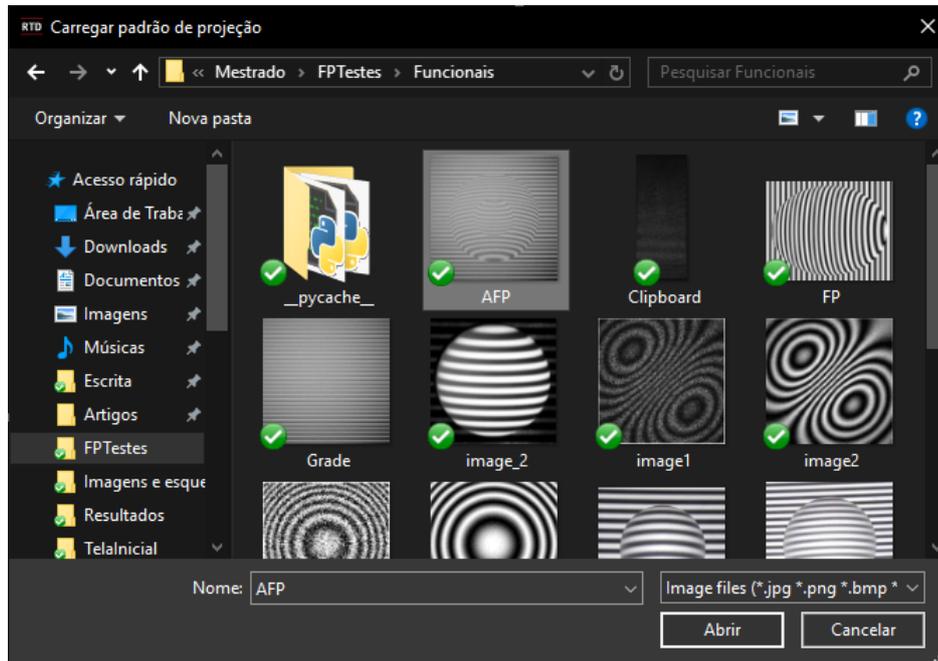
As telas de carregar e salvar são as telas padrões do sistema operacional, e apresentam as funcionalidades comuns como exploração do sistema, seleção da imagem para carregar e definição do local para salvar. As telas são exibidas pelas Figuras 4.6 e 4.7 respectivamente.

4.1.7 Janela de geração de grade cosseinodal

A execução desta tela se dá apenas pela interface inicial e possui liberdade de execução em paralelo com as técnicas ópticas. Sua inicialização exibe uma mensagem com os comandos necessários para manipular as franjas da grade. A Figura 4.8 exibe o gerador e o aviso com os comandos para configuração da grade. Os comandos são todos pelo teclado físico e são basicamente:

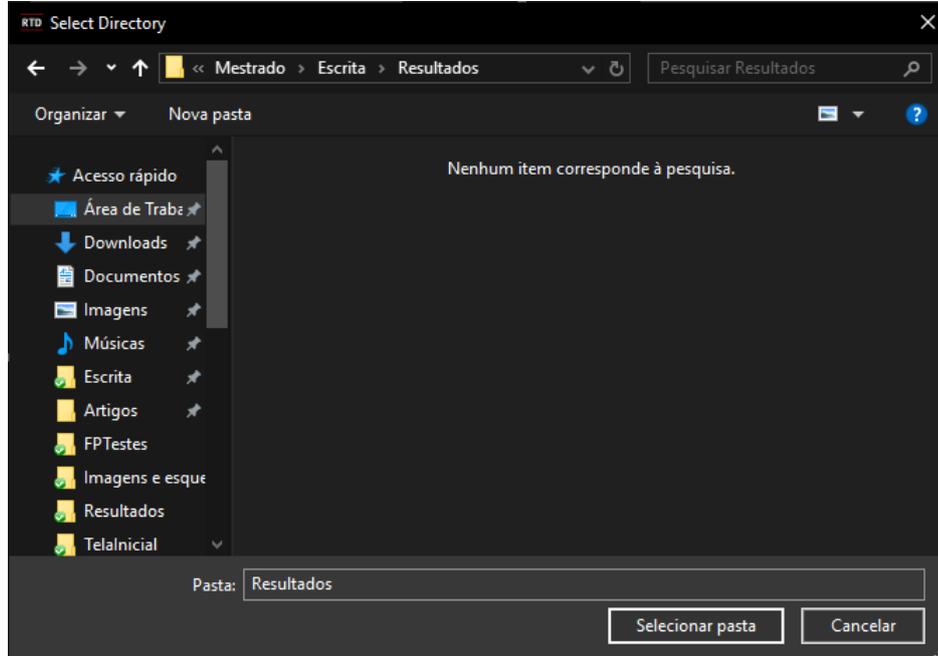
- Teclas direcionais: ConFiguram as frequências horizontal e vertical das franjas;
- Page Up e Page Down: Realiza a translação das franjas através da modificação da fase angular da grade;

Figura 4.6 – Janela para carregar padrões.



Fonte: Autor

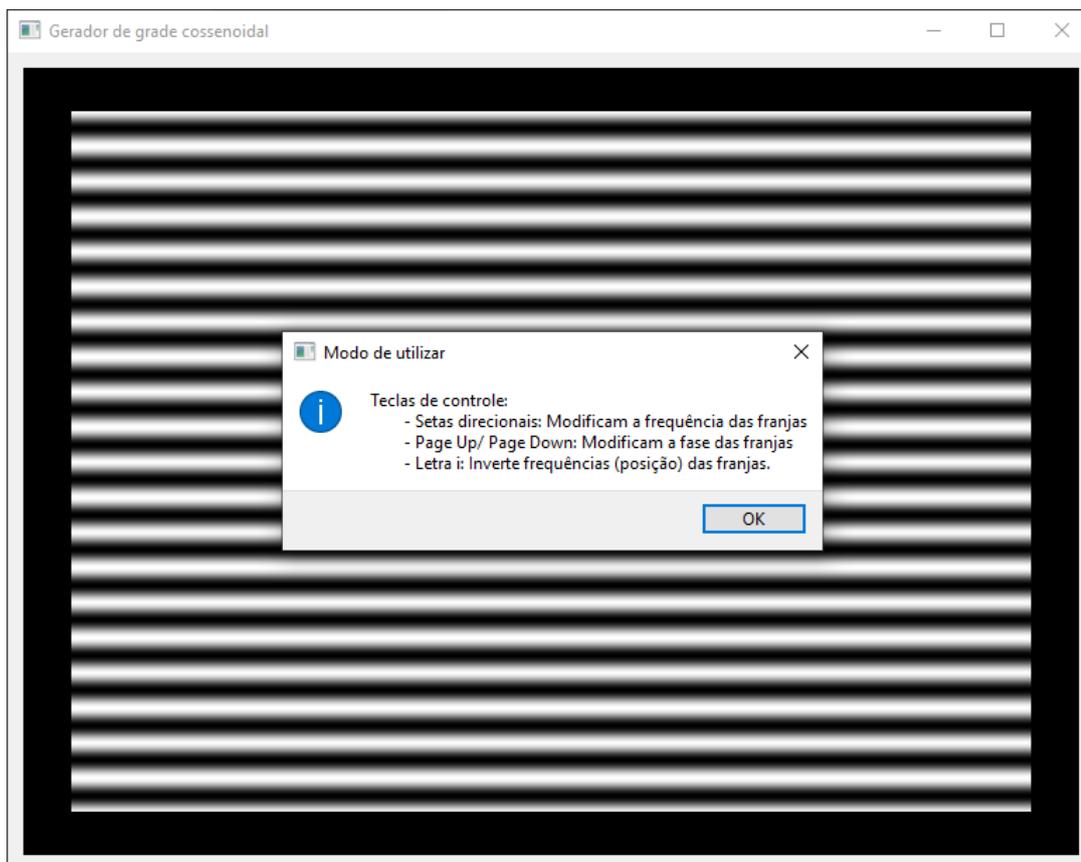
Figura 4.7 – Janela para salvar padrões.



Fonte: Autor

- Letra "i": Realiza a inversão das frequências horizontal e vertical. Por exemplo: uma grade totalmente vertical se torna totalmente horizontal e vice-versa.

Figura 4.8 – Janela do gerador de grade cosseinodal.



Fonte: Autor

4.2 Variáveis e definições internas da IHM

Existem algumas variáveis e definições não acessíveis ao usuário, que são mantidas constantes ou realizadas de forma automática pela IHM. Tais definições têm como objetivo a eliminação da necessidade de configurações iniciais e maior automação no processamento. Estas são:

- Redimensionamento: Todo padrão obtido ou carregado é redimensionado para que possua um total de 150 mil pixels, mantendo as proporções das dimensões. Isto corresponde a um padrão de aproximadamente 387x387 caso possua dimensões iguais. Caso o padrão já possua uma quantidade menor de pixels, este não passa por nenhum redimensionamento;
- Técnica de Fourier em Moiré: A seleção da frequência para aplicação do filtro e translação para o centro ocorre de forma automática, a partir da seleção do ponto de maior magnitude ao redor do centro do espectro bidimensional;

- Técnica de Hilbert no Moiré e na Shearografia (franjas lineares): A etapa de obtenção da orientação vertical ou horizontal das franjas através do uso da técnica de análise dos componentes principais (PCA), tratado no Apêndice F, se dá de forma automática, através da análise da matriz de covariância. Mesmo que as franjas não sejam completamente horizontal ou vertical, será escolhida a direção mais presente;
- Algoritmo de curvas fechadas na Shearografia: O processo de janelamento possui dimensão fixa de 16x16 pixels, mesmo com a possibilidade do algoritmo trabalhar com diferentes dimensões, o que o deixaria mais complexo e influenciaria no tempo de processamento.

4.3 Análise da qualidade da fase recuperada de Moiré e Shearografia

Para validação da IHM e seus resultados finais, foram criados padrões artificiais para recuperação de suas devidas fases pela IHM, possibilitando a comparação entre a fase recuperada e a real. Foram realizadas as análises para a IHM de Moiré e da Shearografia separadamente.

4.3.1 Análise dos resultados do processamento de Moiré

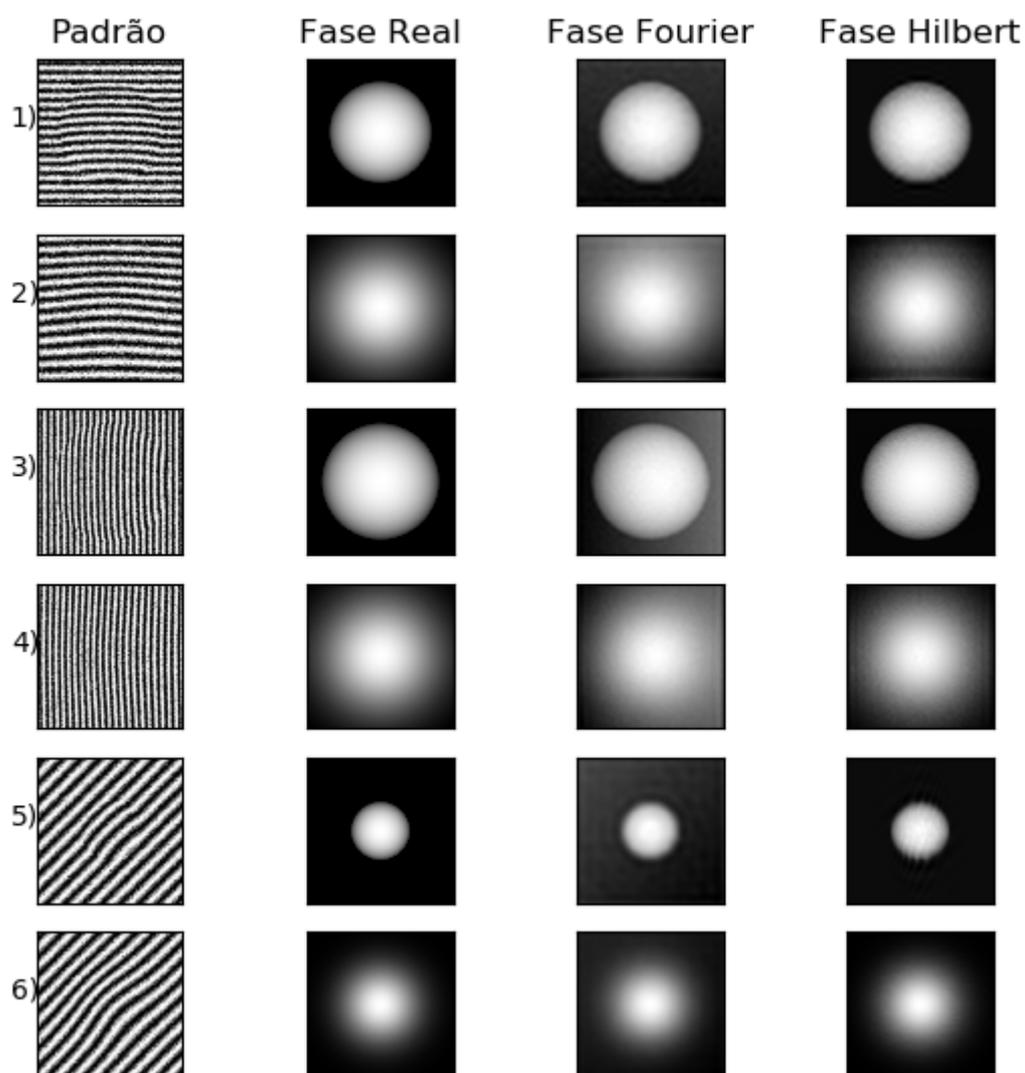
Para a técnica de Moiré, foram gerados padrões de projeção com diferentes frequências das portadoras e superfícies gaussiana e semi-esférica como fases, utilizando os algoritmos de Fourier e Hilbert na recuperação das fases, possibilitando a comparação entre os algoritmos. A Figura 4.9 exibe um resumo dos padrões gerados, as fases reais e recuperadas pelos algoritmos. Os padrões gerados possuem dimensões de 380x380 pixels e ruído gaussiano adicionado ao padrão com média nula e variância de 0.3.

É possível visualizar que os algoritmos são capazes de recuperar as fases com qualidade considerável, principalmente o de Hilbert. A obtenção do erro quadrático médio dos exemplos reforça a boa qualidade dos algoritmos, tal como exibido na Tabela 4.1. Para a realização dos cálculos, as fases reais e obtidas foram normalizadas no intervalo de 0 a 1.

Pelo erro quadrático médio dos padrões gerados, é notável a diferença entre os algoritmos de Fourier e Hilbert, sendo que o último apresenta os melhores resultados. Ainda assim, os valores gerais dos erros estão baixos, reforçando a funcionalidade e qualidade das fases obtidas.

Um exemplo de aplicação real com uma semiesfera é demonstrada na Figura 4.10. Nesta aplicação existiram problemas com relação à calibração do arranjo experimental e qualidade

Figura 4.9 – Padrões teste e fases recuperadas de Moiré.



Fonte: Autor

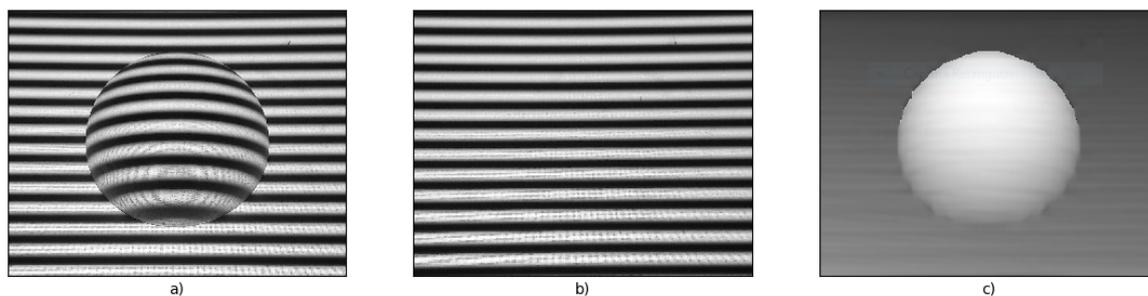
Tabela 4.1 – Erro quadrático médio dos padrões simulados de Moiré.

Padrão	Fourier	Hilbert
1	1.22×10^{-2}	1.47×10^{-3}
2	2.63×10^{-2}	3.81×10^{-4}
3	4.17×10^{-2}	3.93×10^{-4}
4	2.52×10^{-2}	1.90×10^{-4}
5	2.27×10^{-2}	2.18×10^{-3}
6	4.01×10^{-3}	1.27×10^{-5}

insuficiente da câmera utilizada, obtendo padrões borrados e inadequados para aplicação dos algoritmos. Desta forma, foi necessário obter os padrões manualmente com auxílio de um smartphone. Tal procedimento fez com que a angulação de obtenção dos padrões de projeção

e grade fossem levemente diferentes, além de não ser a ideal. Ainda assim, os resultados são satisfatórios e demonstram a robustez dos algoritmos a não-linearidades e ruídos.

Figura 4.10 – Teste real com uma semiesfera oca de isopor. a) Padrão de projeção, b) Padrão de grade e c) Fase recuperada.



Fonte: Autor

4.3.2 Análise dos resultados de processamento da Shearografia

Da mesma maneira que na análise de Moiré, foram gerados padrões artificiais de dimensões 380x380 para aplicação na IHM, possibilitando a análise visual da fase recuperada e comparação com a fase real. A Figura 4.11 exibe os padrões simulados, as fases reais e as obtidas pelos algoritmos da IHM, sendo os três primeiros com franjas fechadas e os últimos com franjas lineares. Para criação do ruído *speckle*, foi utilizado ruído gaussiano multiplicativo com média unitária e variância de 0.5, e aditivo com média nula e variância de 0.5.

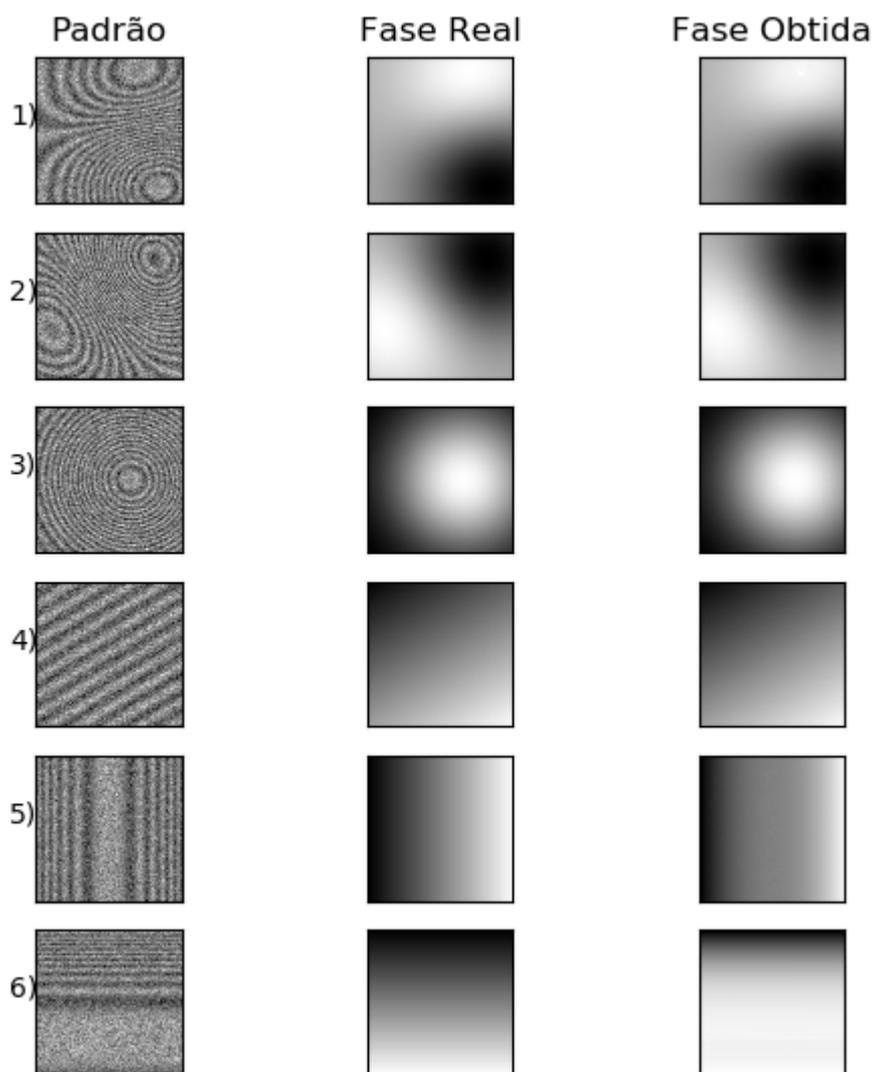
As fases obtidas pela IHM possuem boa qualidade visual, tanto para os padrões processados pelo algoritmo de curvas lineares quanto o de curvas fechadas. Os erros quadráticos médios dos padrões obtidos com relação aos reais são exibidos na Tabela 4.2, e validam a qualidade da obtenção das fases dos algoritmos da IHM. Para realização dos cálculos, as fases reais e obtidas foram normalizadas no intervalo de 0 a 1.

Uma aplicação real é exibida na Figura 4.12. Nela, uma chapa é utilizada na experimentação, gerando franjas de interferência lineares através da aplicação de uma leve deformação na parte superior da mesma. É visível que o algoritmo foi capaz de obter a fase empacotada e a fase desempacotada com boa qualidade.

4.4 Tempos de processamento online

O tempo de processamento é algo que apesar de mensurável, não apresenta um valor global para toda máquina que utilizar a IHM. As diferentes configurações de poder de processa-

Figura 4.11 – Padrões teste e fases recuperadas da Shearografia.



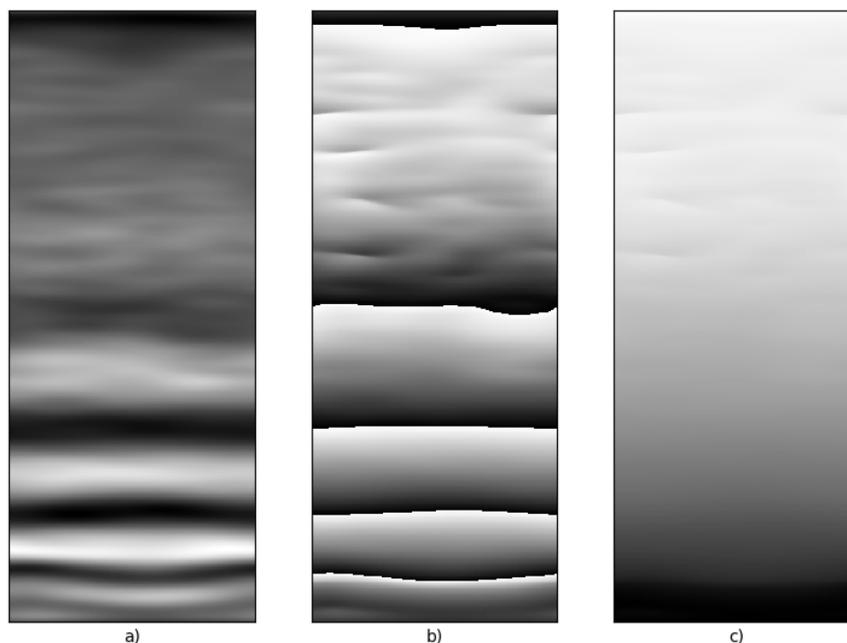
Fonte: Autor

Tabela 4.2 – Erro quadrático médio dos padrões simulados da Shearografia.

Padrão	EQM
1	4.61×10^{-4}
2	2.57×10^{-5}
3	7.14×10^{-5}
4	1.18×10^{-5}
5	8.05×10^{-3}
6	9.59×10^{-2}

mento e memória influenciam diretamente na velocidade de processamento, além da existência de tarefas em paralelo executadas pelo próprio sistema operacional, que também influenciam de forma direta. Desta forma, estes fatores podem defasar o tempo de execução entre diferen-

Figura 4.12 – Aplicação de padrão real da Shearografia. a) Padrão de interferência filtrado, b) Padrão de fases empacotadas e c) Padrão de fases desempacotadas.



Fonte: Autor

tes máquinas. Mas como um dos objetivos é obtenção de uma IHM com boa capacidade de processamento, a etapa online foi executada por mil iterações para cada técnica óptica.

Durante a execução do teste, foram abertas janelas de região de interesse, gráfico tridimensional, além de utilização dos valores de filtragem em seus respectivos máximos, forçando o tempo de execução ao limite. Além disto, durante todo o momento foram utilizadas todas as funcionalidades permitidas nas interfaces. A máquina utilizada possui um core i3-5005U com 2.0 GHz de velocidade e 8Gb de memória RAM. Durante todo o teste não foi utilizado nenhum programa exterior além da IHM. O tempo médio, o desvio padrão, o tempo máximo e o mínimo de execução de cada técnica são exibidos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Tempos de execução do processamento online das técnicas ópticas.

Técnica	Média [s]	Desvio Padrão [s]	Mínimo [s]	Máximo [s]
Moiré	0.505	0.030	0.357	0.824
Shearografia	0.486	0.051	0.305	0.784

Os tempos médios de processamento obtidos por ambas as técnicas são curtos e permitem a utilização confortável da IHM. Os valores baixos de desvio padrão indicam a consistência na execução dos algoritmos, e seus valores máximos e mínimos não se afastam muito da média, além de estarem dentro de, no máximo, um segundo de execução.

A única exceção é o processamento de curvas fechadas da shearografia. Após executar o algoritmo 200 vezes com padrões de 380x380 pixels, este apresentou um tempo médio de 2.56 segundos, com desvio padrão de 0.33 e valores máximo e mínimo de 3.76 e 1.96 segundos respectivamente. Apesar de ser um tempo superior à execução online das IHMs, é um tempo bem aceitável para o processamento de curvas fechadas, sendo que muitos trabalhos pesquisados levam até dois a cinco minutos para obtenção da fase empacotada de padrões com a mesma ou com dimensões próxima à utilizada neste trabalho.

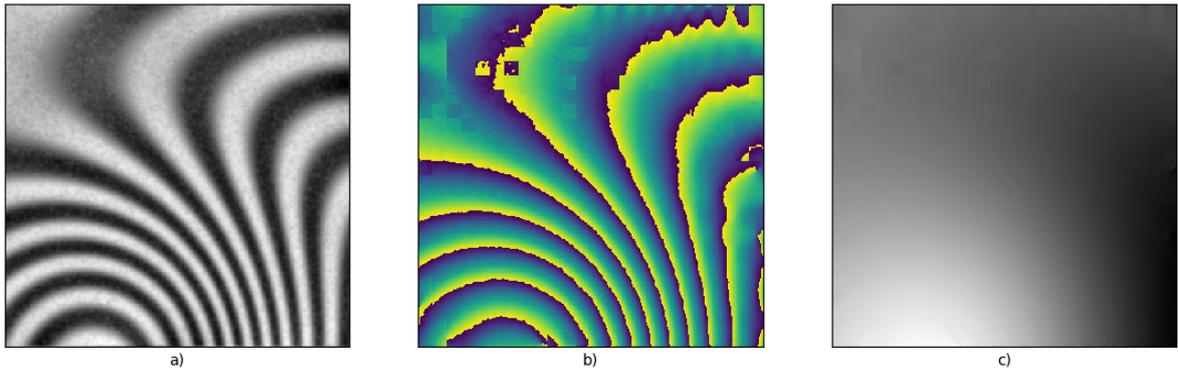
4.5 Problemas encontrados na execução de alguns algoritmos

O algoritmo de obtenção da fase empacotada por Fourier no Moiré pode apresentar alguns problemas caso a seleção da frequência para translação não seja a correta. O algoritmo trabalha com a seleção automática do ponto de maior amplitude no espectro bidimensional, o que muitas vezes não representa a frequência correta, sendo isto devido principalmente a ruídos e anormalidades no padrão. Isto ocorre no terceiro exemplo da Figura 4.9, em que é possível visualizar a semicircunferência, mas também é visível a presença de um plano abaixo dela, apresentando o lado esquerdo mais escuro que o direito, o que indica que a verdadeira frequência das franjas não foi centralizada na translação.

O algoritmo de curvas fechadas na shearografia também apresenta alguns problemas. Apesar de funcional para uma grande quantidade de padrões, este pode apresentar artefatos na fase recuperada caso as franjas do padrão sejam largas, e em regiões do padrão em que o mapa de qualidade utilizado no algoritmo possui os valores mais baixos. Para o caso das franjas largas, o problema se dá principalmente devido ao processo de janelamento do algoritmo, sendo esta pequena para detectar variações nas franjas em alguns pontos do padrão, ficando completamente em cima da franja em alguns casos. Um exemplo é demonstrado na Figura 4.13, sendo os artefatos visíveis na parte superior do mapa de fases empacotadas, onde as franjas densas estão presentes. Para as regiões de valores baixos do mapa de qualidade o problema se dá principalmente devido ao algoritmo de desempacotamento utilizado ser diferente do que o utilizado pelo autor do algoritmo, que apesar de ser mais robusto a ruídos, é mais demorado para obtenção do mapa, adicionando mais tempo de processamento e indo contra a proposta de uma IHM com boa velocidade de obtenção dos resultados. Este problema é o mais raro de acontecer, sendo que dependendo da configuração dos filtros para uma boa eliminação dos ruídos, pode ser resolvido

e apresentar bons resultados. O usuário da IHM é notificado deste problema através de uma janela de aviso quando o algoritmo de franjas fechadas é selecionado.

Figura 4.13 – Padrão empacotado com artefatos. a) Padrão de interferência, b) Padrão de fases empacotadas e c) Padrão de fases desempacotadas.



Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

O objetivo de criar uma IHM com capacidade de englobar as etapas necessárias para obtenção de bons resultados com velocidade e robustez à influência de ruídos para ambas técnicas ópticas foi alcançado, conforme indicado pelas métricas de avaliação dos testes realizados. As fases recuperadas apresentam boa similaridade e baixo erro quadrático médio com relação às fases artificiais, e os experimentos reais apresentam a capacidade de obtenção dos resultados pela IHM. Os tempos de processamento permitem a utilização da IHM de maneira confortável, levando menos de um segundo para o processamento online com diferentes algoritmos de processamento, tomando no máximo menos de quatro segundos no caso de processamento de padrões de curvas fechadas.

Com relação à estrutura visual e funcionalidades, as interfaces são limpas e fáceis de utilizar, sem necessidade de ajuste de inúmeros parâmetros para obtenção de bons resultados. Todo o fluxo de funcionamento é bem simples e objetivo, permitindo que qualquer usuário com conhecimento mínimo da técnica óptica possa utilizar sem necessidade de aprofundar nos algoritmos envolvidos nas etapas de processamento.

Sugestões para trabalhos futuros

Os algoritmos que apresentam defeitos em situações específicas, tais como o de seleção de frequência na obtenção da fase empacotada por Fourier e o de obtenção da fase empacotada de curvas fechadas podem ser melhorados ou substituídos por algoritmos mais eficientes. O estudo e uso de redes de aprendizado profundo em padrões de franjas tem exibido bons resultados e pode oferecer em breve uma nova alternativa para solucionar tais etapas com velocidade e qualidade.

Para o caso da Shearografia, a IHM obtém apenas o gradiente da deformação, sendo necessária a implementação futura de um algoritmo que realize a integração espacial do mapa da fase recuperada.

REFERÊNCIAS

- ABDELSALAM, D. G.; YAO, B. Interferometry and its applications in surface metrology. In: BANISHEV, A. A.; BHOWMICK, M.; WANG, J. (Ed.). **Optical Interferometry**. Rijeka: IntechOpen, 2017. cap. 5. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/66275>>.
- BALDI, A.; BERTOLINO, F.; GINESU, F. Phase unwrapping algorithms: A comparison. In: JACQUOT, P.; FOURNIER, J.-M. (Ed.). **Interferometry in Speckle Light**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000. p. 483–490. ISBN 978-3-642-57323-1.
- BELL, T.; LI, B.; ZHANG, S. Structured light techniques and applications. In: _____. [S.l.: s.n.], 2016.
- BONE, D. J.; BACHOR, H.-A.; SANDEMAN, R. J. Fringe-pattern analysis using a 2-d fourier transform. **Applied Optics**, Optical Society of America, v. 25, n. 10, p. 1653–1660, 1986.
- BREQUE, C.; DUPRE, J.-C.; BREMAND, F. Calibration of a system of projection moiré for relief measuring: biomechanical applications. **Optics and Lasers in Engineering**, Elsevier, v. 41, n. 2, p. 241–260, 2004.
- CHOI, Y.-B.; KIM, S.-W. Phase-shifting grating projection moiré topography. **Optical Engineering**, International Society for Optics and Photonics, v. 37, n. 3, p. 1005–1011, 1998.
- CREATH, K.; WYANT, J. C.; MALACARA, E. D. Moiré and fringe projection techniques. **Optical Shop Testing**, 01 1995.
- DALMAU-CEDEÑO, O.; RIVERA, M.; LEGARDA-SAENZ, R. Fast phase recovery from a single closed-fringe pattern. **Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision**, v. 25, p. 1361–70, 07 2008.
- DONG, Z.; CHENG, H. Hybrid algorithm for phase retrieval from a single spatial carrier fringe pattern. **Applied optics**, v. 55, p. 7565–7573, 09 2016.
- DU, Y. et al. Spatial carrier phase-shifting algorithm based on principal component analysis method. **Optics Express**, Optical Society of America, v. 20, n. 15, p. 16471–16479, 2012.
- ESTRADA, J.; SERVIN, M.; MARROQUÍN, J. Local adaptable quadrature filters to demodulate single fringe patterns with closed fringes. **Optics express**, Optical Society of America, v. 15, n. 5, p. 2288–2298, 2007.
- FENG, S. et al. Fringe pattern analysis using deep learning. **Advanced Photonics**, International Society for Optics and Photonics, v. 1, n. 2, p. 025001, 2019.
- FRANCIS, D.; TATAM, R.; GROVES, R. Shearography technology and applications: a review. **Measurement science and technology**, IOP Publishing, v. 21, n. 10, p. 102001, 2010.
- GHIGLIA, D. C.; ROMERO, L. A. **2-D weighted least-squares phase unwrapping**. [S.l.]: Google Patents, 1995. US Patent 5,424,743.
- GHIGLIA, D. C.; ROMERO, L. A. Minimum lp-norm two-dimensional phase unwrapping. **JOSA A**, Optical Society of America, v. 13, n. 10, p. 1999–2013, 1996.
- GORTHI, S. S.; RASTOGI, P. Fringe projection techniques: whither we are? **Optics and lasers in engineering**, Elsevier, v. 48, n. ARTICLE, p. 133–140, 2010.

- GUTMANN, B.; WEBER, H. Phase unwrapping with the branch-cut method: role of phase-field direction. **Applied optics**, Optical Society of America, v. 39, n. 26, p. 4802–4816, 2000.
- HALIOUA, M. **Apparatus and method for projection moire topography**. [S.l.]: Google Patents, 1986. US Patent 4,564,295.
- HERNÁNDEZ, J. d. J. V. et al. The 2d continuous wavelet transform: Applications in fringe pattern processing for optical measurement techniques. In: **Wavelet Theory and Its Applications**. [S.l.]: IntechOpen, 2018.
- HERRÁEZ, M. A. et al. Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path. **Applied optics**, Optical Society of America, v. 41, n. 35, p. 7437–7444, 2002.
- HUANG, Y. et al. Dynamic phase measurement in shearography by clustering method and fourier filtering. **Optics express**, Optical Society of America, v. 19, n. 2, p. 606–615, 2011.
- HUNG, K. M.; YAMADA, T. Phase unwrapping by regions using least-squares approach. **Optical Engineering**, v. 37, 1998.
- HUNG, Y.; HO, H. Shearography: an optical measurement technique and applications. **Materials science and engineering: R: Reports**, Elsevier, v. 49, n. 3, p. 61–87, 2005.
- HUNG, Y. Y. A speckle-shearing interferometer: a tool for measuring derivatives of surface displacements. **Optics Communications**, Elsevier, v. 11, n. 2, p. 132–135, 1974.
- JAYBHAY, J.; SHASTRI, R. A study of speckle noise reduction filters. **signal & image processing: An international Journal (SIPIJ)**, v. 6, n. 3, p. 71–80, 2015.
- KAUFMANN, G. H. **Advances in speckle metrology and related techniques**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- KEMAO, Q. Windowed fourier transform for fringe pattern analysis. **Applied Optics**, Optical Society of America, v. 43, n. 13, p. 2695–2702, 2004.
- KEMAO, Q. Two-dimensional windowed fourier transform for fringe pattern analysis: principles, applications and implementations. **Optics and Lasers in Engineering**, Elsevier, v. 45, n. 2, p. 304–317, 2007.
- KUROKI, H. et al. School scoliosis screening by moiré topography–overview for 33 years in miyazaki japan. **Journal of Orthopaedic Science**, Elsevier, v. 23, n. 4, p. 609–613, 2018.
- LARKIN, K. G. Natural demodulation of two-dimensional fringe patterns. ii. stationary phase analysis of the spiral phase quadrature transform. **JOSA A**, Optical Society of America, v. 18, n. 8, p. 1871–1881, 2001.
- LARKIN, K. G.; BONE, D. J.; OLDFIELD, M. A. Natural demodulation of two-dimensional fringe patterns. i. general background of the spiral phase quadrature transform. **JOSA A**, Optical Society of America, v. 18, n. 8, p. 1862–1870, 2001.
- LEE, J. H.; SHIN, J.; REALFF, M. J. Machine learning: Overview of the recent progresses and implications for the process systems engineering field. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 114, p. 111–121, 2018.

- LORENZO-GINORI, J. V. An approach to the 2d hilbert transform for image processing applications. In: SPRINGER. **International Conference Image Analysis and Recognition**. [S.l.], 2007. p. 157–165.
- MARROQUIN, J.; FIGUEROA, J.; SERVIN, M. Robust quadrature filters. **JOSA A**, Optical Society of America, v. 14, n. 4, p. 779–791, 1997.
- MCKENZIE, B. M. et al. Moiré as a low-cost, robust, optical-technique to quantify soil surface condition. **Soil and Tillage Research**, Elsevier, v. 158, p. 147–155, 2016.
- MORIMOTO, Y. Short history of optical methods in experimental mechanics and practical application to industry. **Advanced Experimental Mechanics**, The Japanese Society for Experimental Mechanics, v. 1, p. 3–8, 2016.
- NEWMAN, J. W. Aerospace ndt with advanced laser shearography. In: . [S.l.: s.n.], 2008.
- OSTER, G.; WASSERMAN, M.; ZWERLING, C. Theoretical interpretation of moiré patterns. **JOSA**, Optical Society of America, v. 54, n. 2, p. 169–175, 1964.
- PARSANIA, P.; VIRPARIA, D. A comparative analysis of image interpolation algorithms. **IJARCCCE**, v. 5, p. 29–34, 01 2016.
- PEDRINI, G.; ZOU, Y.; TIZIANI, H. J. Speckle- and digital holographic interferometry (a comparison). In: WAIDELICH, W. et al. (Ed.). **Laser in Forschung und Technik / Laser in Research and Engineering**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996. p. 485–488. ISBN 978-3-642-80263-8.
- PORTO, F. et al. Moiré topography: Characteristics and clinical application. **Gait & posture**, Elsevier, v. 32, n. 3, p. 422–424, 2010.
- PRITT, M. D.; SHIPMAN, J. S. Least-squares two-dimensional phase unwrapping using fft's. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, IEEE, v. 32, n. 3, p. 706–708, 1994.
- RAYLEIGH, L. On the manufacture and theory of diffraction gratings. **Philos. Mag.**, v. 47, p. 81–93, 01 1874.
- ROWE, S. H.; WELFORD, W. T. Surface topography of non-optical surfaces by projected interference fringes. **Nature**, v. 216, p. 786–787, 11 1967.
- SERVIN, M. et al. Phase unwrapping with a regularized phase-tracking system. **Applied Optics**, Optical Society of America, v. 37, n. 10, p. 1917–1923, 1998.
- SPOORTHY, G.; GORTHI, S.; GORTHI, R. K. S. S. Phasenet: A deep convolutional neural network for two-dimensional phase unwrapping. **IEEE Signal Processing Letters**, IEEE, v. 26, n. 1, p. 54–58, 2018.
- STEGER, C.; ULRICH, M.; WIEDEMANN, C. **Machine vision algorithms and applications**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2018.
- TAKASAKI, H. Moiré topography. **Appl. Opt.**, OSA, v. 9, n. 6, p. 1467–1472, Jun 1970. Disponível em: <<http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-9-6-1467>>.

TAKEDA, M.; INA, H.; KOBAYASHI, S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. **JosA**, Optical Society of America, v. 72, n. 1, p. 156–160, 1982.

TRUSIAK, M.; SŁUŻEWSKI, Ł.; PATORSKI, K. Single shot fringe pattern phase demodulation using hilbert-huang transform aided by the principal component analysis. **Optics express**, Optical Society of America, v. 24, n. 4, p. 4221–4238, 2016.

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

YAN, K. et al. Fringe pattern filtering using convolutional neural network. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **Seventh International Conference on Optical and Photonic Engineering (icOPEN 2019)**. [S.l.], 2019. v. 11205, p. 1120500.

YANG, L.; XIE, X. **Digital shearography: New developments and applications**. [S.l.]: SPIE Press Bellingham, 2016. v. 31.

YING, L. Phase unwrapping. **Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering**, Wiley Online Library, 2006.

YOSHIZAWA, T.; TOMISAWA, T. Shadow moiré topography by means of the phase-shift method. **Optical Engineering**, International Society for Optics and Photonics, v. 32, n. 7, p. 1668–1675, 1993.

ZHANG, Z.; GUO, H. Principal-vector-directed fringe-tracking technique. **Applied optics**, Optical Society of America, v. 53, n. 31, p. 7381–7393, 2014.

ZHAO, M. et al. Quality-guided phase unwrapping technique: comparison of quality maps and guiding strategies. **Applied optics**, Optical Society of America, v. 50, n. 33, p. 6214–6224, 2011.

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

ZHONG, J.; WENG, J. Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform: wavelet transform profilometry. **Applied optics**, Optical Society of America, v. 43, n. 26, p. 4993–4998, 2004.

ZHOU, C. et al. Dynamic 3d shape measurement based on the phase-shifting moiré algorithm. **arXiv preprint arXiv:1807.01399**, 2018.

ZUO, C. et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 109, p. 23 – 59, 2018. ISSN 0143-8166. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816618302203>>.

APÊNDICE A – Equações dos padrões das técnicas ópticas

As equações aqui apresentadas definem matematicamente os padrões envolvidos nas técnicas de Moiré e Shearografia, não sendo demonstrado o desenvolvimento para obtenção das mesmas, visto que não é o objetivo deste trabalho, mas que podem ser encontrados nas referências citadas no referencial teórico das técnicas. Todos os padrões simulados utilizados neste trabalho foram baseados nas equações apresentadas neste Apêndice.

Equações de Moiré

Para a técnica de projeção digital, citada na Seção 2.2.1, são obtidos os padrões de grade, de projeção e posteriormente o de interferência, sendo este último obtido através da multiplicação dos padrões da grade e de projeção e filtragem dos portadores espaciais. Na versão por grade física, obtemos diretamente o padrão de interferência, com necessidade de filtrar os portadores espaciais. A equação de interferência é similar para ambas as técnicas ópticas, e será demonstrada na última seção. A equação da grade é definida em 1 e a equação de projeção em 2. Muitos trabalhos não levam em consideração o termo de ruído $N(x,y)$ presente nas equações, definindo como ruído apenas a influência do ambiente, ou definindo este como um ruído de alta frequência, sendo amenizado ou removido pela aplicação de um filtro passa-baixa.

$$G(x,y) = A(x,y) + B(x,y) \cdot \cos(w_x x + w_y y) + N(x,y) \quad (1)$$

sendo $G(x,y)$ o padrão da grade, $A(x,y)$ o ruído aditivo devido à influência do ambiente, $B(x,y)$ o ruído modulante devido ao ambiente, w_x e w_y as frequências portadoras nas direções horizontal e vertical, x e y as posições espaciais do padrão e $N(x,y)$ ruídos gerais provenientes do ambiente, qualidade dos equipamentos, má amostragem, baixa resolução, entre outros.

$$G(x,y) = A(x,y) + B(x,y) \cdot \cos(\phi(x,y) + w_x x + w_y y) + N(x,y) \quad (2)$$

dado que $G(x,y)$ é o padrão de projeção, $A(x,y)$ o ruído aditivo devido à influência do ambiente, $B(x,y)$ o ruído modulante devido ao ambiente, $\phi(x,y)$ a informação de fase procurada, w_x e w_y as frequências portadoras nas direções horizontal e vertical, x e y as posições espaciais do padrão e $N(x,y)$ ruídos gerais provenientes do ambiente, má amostragem, baixa resolução, entre outros.

O padrão de interferência é obtido através da multiplicação dos padrões de grade e projeção com o termo aditivo de baixa frequência $A(x,y)$ filtrado por um filtro passa alta. A multiplicação gera as franjas de interferência, mas mantém as franjas da grade, necessitando outro processo de filtragem para eliminação das frequências da grade. Quanto maior a frequência da grade melhor, pois além de reforçar as curvas interferência são mais fáceis de filtrar do padrão obtido, já que as curvas geralmente apresentam termos de frequência mais baixa.

Equações da Shearografia

Para obtenção do padrão de interferência na shearografia, dois padrões são previamente obtidos: um de referência e outro após uma leve deformação na superfície em estudo. As equações que representam ambas situações são representadas em 4 e 5. A subtração destes revela o padrão de interferência, demonstrado na última seção. A equação que define o ruído *speckle* presente nos padrões da shearografia é demonstrada na Equação 3, tal como apresentado em (JAYBHAY; SHASTRI, 2015).

$$C(x,y) = P(x,y) \cdot N_m(x,y) + N_a(x,y) \quad (3)$$

sendo $C(x,y)$ o padrão corrompido, $P(x,y)$ o padrão livre de ruídos, N_m o ruído multiplicativo e N_a o ruído aditivo, sendo estes dois últimos os que definem o ruído *speckle*. Muitos trabalhos não consideram os termos do ruído *speckle*, considerando este incluído no ruído de fase aleatório, apresentado nas equações 4 e 5.

$$I(x,y) = A(x,y) + B(x,y) \cdot \cos(\phi(x,y)) \cdot N_m(x,y) + N_a(x,y) \quad (4)$$

onde $I(x,y)$ é a intensidade do padrão de referência, $A(x,y)$ o ruído aditivo devido à influência do ambiente, $B(x,y)$ o ruído modulante, $\phi(x,y)$ o ruído de fase aleatório, N_m o ruído multiplicativo e N_a o ruído aditivo.

$$I'(x,y) = A(x,y) + B(x,y) \cdot \cos(\phi(x,y) + \Delta(x,y)) \cdot N_m(x,y) + N_a(x,y) \quad (5)$$

em que $I'(x,y)$ é a intensidade do padrão de deformação, $A(x,y)$ o ruído aditivo devido à influência do ambiente, $B(x,y)$ o ruído modulante, $\phi(x,y)$ o ruído de fase aleatório, $\Delta(x,y)$ o gradiente da deformação aplicada, N_m o ruído multiplicativo e N_a o ruído aditivo.

O padrão de interferência é obtido pela subtração dos padrões de referência e deformação. Esta subtração normalmente gera valores negativos, necessitando realizar a operação de módulo do padrão obtido, dado que não existem valores de pixels negativos, impossibilitando a representação no valores 0 – 255, correspondente a imagens 8 bits.

Equação do padrão de interferência

A equação do padrão de interferência é similar para ambas as técnicas, com o único diferencial de adição ou não do ruído *speckle* no caso da shearografia e do ruído geral $N(x,y)$ no Moiré. A equação 6 aqui apresentada não está adicionada os ruídos, sendo a mais encontrada em artigos e trabalhos para ambas as técnicas.

$$G(x,y) = A(x,y) + B(x,y) \cdot \cos(\alpha(x,y)) \quad (6)$$

sendo $G(x,y)$ o padrão de interferência, $A(x,y)$ o ruído aditivo devido à influência do ambiente, $B(x,y)$ o ruído modulante e $\alpha(x,y)$ a informação de fase procurada, definida como a deformação em Moiré e o gradiente da deformação na shearografia.

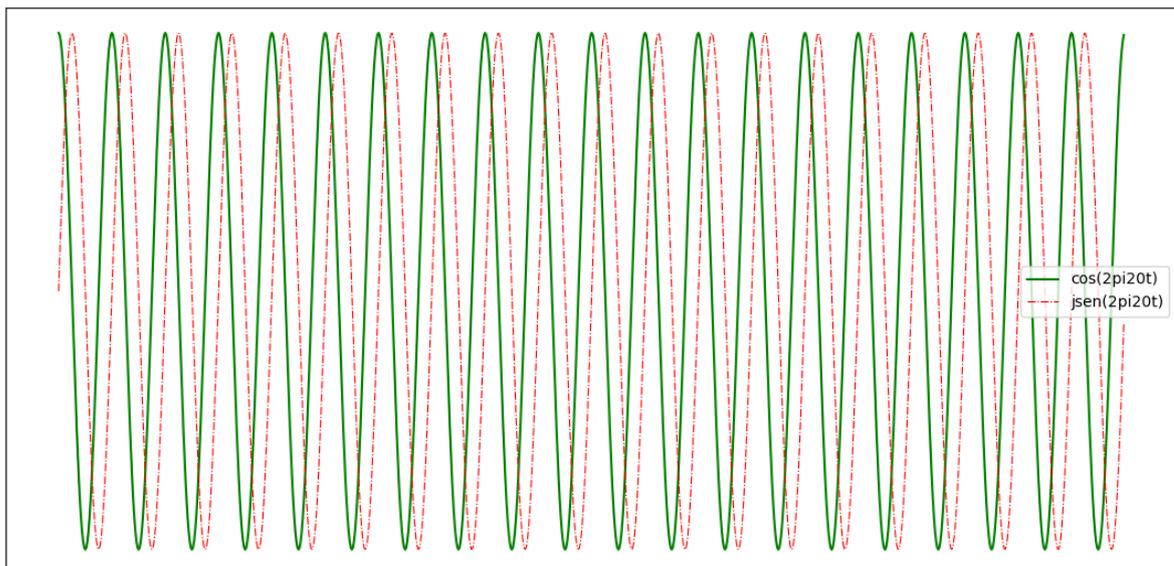
APÊNDICE B – A transformada de Hilbert

Todo sinal real e variante no tempo possui componentes de frequências positivas e negativas no domínio da frequência. Sinais que não possuem os componentes de frequências negativas são chamados sinais analíticos e geralmente são compostos por uma parte real e outra imaginária, esta última definida como o sinal de quadratura. Tais sinais possuem como principal vantagem a possibilidade de obtenção da informação de fase e magnitude instantâneas do sinal real de forma rápida e simplificada, sem necessidade da aplicação da transformada de Fourier.

A transformada de Hilbert é um operador linear capaz de obter o sinal de quadratura de sinais reais através da convolução do sinal com a função $\frac{1}{\pi t}$. Ele gera deslocamentos (shifts) de $\frac{\pi}{2}$ para as frequências negativas e $-\frac{\pi}{2}$ para as frequências positivas. No domínio da frequência, isto é o correspondente a duplicar os componentes de frequência positiva e eliminar os de frequência negativa, além do componente DC. A transformada pode ser aplicada através de operações no domínio da frequência ou através da convolução com filtros de quadratura (MARROQUIN; FIGUEROA; SERVIN, 1997).

A Figura 1 apresenta um exemplo da aplicação da transformada de Hilbert da função $\cos(2\pi 20t)$ e a obtenção de seu respectivo sinal de quadratura, dado por $j\sin(2\pi 20t)$. Se analisarmos a transformada deste exemplo, vemos que o sinal analítico gerado é correspondente à identidade de Euler, dada por $e^{(j\omega_0 t)} = e^{(j2\pi 20t)} = \cos(2\pi 20t) + j\sin(2\pi 20t)$, o que indica que esta identidade representa um sinal analítico.

Figura 1 – Sinal unidimensional e seu sinal de quadratura.



Fonte: Autor

Para sinais unidimensionais, a transformada de Hilbert é bem definida e gera os resultados previamente definidos. No caso de sinais bidimensionais, como por exemplo imagens, não existe uma aplicação definida da transformada, dado que não é possível determinar onde os componentes de frequências negativas estão presentes. Isto gera um sinal de quadratura inadequado ou um comprometimento da parte real. Algumas das metodologias utilizadas é a aplicação de filtros passa-banda no domínio da frequência da imagem, mas estas não possuem boa aplicabilidade para todo tipo de imagem e diferentes objetivos. Tais dificuldades e algumas abordagens são tratadas em (LORENZO-GINORI, 2007). Para análise de padrões de interferência com formação de franjas a transformada espiral é a metodologia mais adequada para a transformada de Hilbert bidimensional (LARKIN; BONE; OLDFIELD, 2001) e (LARKIN, 2001).

Com relação aos tipos de padrões de franjas, se estas forem abertas, lineares e possuírem orientação única com poucas distorções, é possível a obtenção do sinal de quadratura de forma correta. No caso de curvas fechadas, ou abertas com muitas distorções, a transformada espiral gera inconsistências de fase que podem ser resolvidas a partir da obtenção do mapa de direções. Mas a obtenção deste pode ser bem demorado, além de necessitar correções futuras para obtenção de um mapa de fases mais fidedigno e livre de inconsistências.

Neste trabalho, a transformada de Hilbert foi aplicada apenas para padrões que possuam franjas abertas e lineares com poucas distorções, tais como os padrões obtidos pela técnica de Moiré, e as deformações que geram franjas lineares na Shearografia. A biblioteca scipy conta com funções de aplicação da transformada de Hilbert bidimensional e unidimensional. Neste trabalho, é utilizada a transformada unidimensional na direção da maior variação das franjas, ou seja, perpendicular à orientação global das franjas. Esta orientação é obtida conforme o apêndice F.

As equações a seguir demonstram o procedimento de obtenção da fase empacotada da técnica de Moiré. Primeiramente, a equação 2 do padrão de projeção que representa um padrão sem curvas fechadas com presença do portador espacial possui sua influência do ambiente filtrada, o que é uma das dependências da transformada de Hilbert, obtendo a equação 7 representada abaixo:

$$P = B \cdot \cos(\phi + w_x \cdot x + w_y \cdot y) \quad (7)$$

Logo após, a transformada na direção da maior orientação média global das franjas é aplicada sobre o padrão filtrado. O sinal de quadratura obtido é representado pela equação abaixo:

$$Q = B \cdot \text{sen}(\phi + w_x \cdot x + w_y \cdot y) \quad (8)$$

Em posse do sinal filtrado e de quadratura, a operação de arco tangente é realizada, obtendo assim:

$$F = \text{arctan2}(Q/P) = \phi_{\text{empac}} + w_x \cdot x + w_y \cdot y \quad (9)$$

Vemos que o resultado da equação 9 é a informação de fase na forma empacotada mais o portador espacial, que representa a equação de um plano. Se realizarmos o mesmo procedimento com padrão de grade, representado pela equação 1, obteremos esta equação do plano, e assim podemos subtrair da equação 9 e obter a informação de fase empacotada (ϕ_{empac}), tal como representado abaixo:

$$F = \phi_{\text{empac}} + w_x \cdot x + w_y \cdot y - (w_x \cdot x + w_y \cdot y) = \phi_{\text{empac}} \quad (10)$$

No caso da Shearografia, apesar de existirem padrões de interferência que apresentam apenas franjas lineares, estas não possuem um espaçamento linear, não exibindo a presença do portador espacial. Isto significa que tais franjas representam apenas a informação de fase procurada, o que simplifica o processo de obtenção da fase. Da mesma maneira que no procedimento de Moiré, o padrão de interferência shearográfico, representado na equação 6, possui sua influência ambiente filtrada, obtém-se o sinal de quadratura e por fim é realizada a operação de arco tangente para finalmente obter a informação de fase empacotada.

APÊNDICE C – Algoritmo de desempacotamento

O algoritmo de desempacotamento utilizado neste trabalho é definido como um algoritmo rápido de desempacotamento bidimensional baseado na ordenação da confiabilidade através de caminho não contínuo (HERRÁEZ et al., 2002). Como o próprio título diz, este algoritmo utiliza mapas de qualidade para atribuir graus de confiabilidade aos *pixels* do padrão empacotado e utiliza uma estratégia de caminho não contínuo para desempacotar a partir do *pixel* de maior confiabilidade para o menor. Tais procedimentos aumentam a robustez à propagação de erros devido a regiões de má qualidade do mapa empacotado e mantém o algoritmo computacionalmente leve.

Nos algoritmos baseados em mapa de qualidade e estratégia de caminho existem duas definições a serem resolvidas: primeiramente a escolha da função de confiabilidade que irá gerar o mapa de qualidade dos *pixels*, e a formulação da estratégia do algoritmo para gerar um caminho para desempacotamento dos *pixels*. Neste algoritmo, a função para gerar o mapa de qualidade é definido como função de diferenças de segunda ordem e a geração do caminho é discreto e não contínuo.

Mapa de qualidade: Função de diferenças de segunda ordem

Segundo o autor, esta função de confiabilidade foi escolhida devido à sua capacidade de prover uma medida do grau de concavidade/convexidade do mapa de fases, gerando uma melhor distinção das inconsistências presentes no mapa. Para entendê-la, suponha um *pixel* na posição (i, j) e seus *pixels* vizinhos representados na Figura 2. A função de diferenças de segunda ordem é dada por:

$$D(i, j) = \sqrt{H^2(i, j) + V^2(i, j) + D_1^2(i, j) + D_2^2(i, j)} \quad (11)$$

Sendo que:

$$H(i, j) = \gamma[\phi(i-1, j) - \phi(i, j)] - \gamma[\phi(i, j) - \phi(i+1, j)]$$

$$V(i, j) = \gamma[\phi(i, j-1) - \phi(i, j)] - \gamma[\phi(i, j) - \phi(i, j+1)]$$

$$D_1(i, j) = \gamma[\phi(i-1, j-1) - \phi(i, j)] - \gamma[\phi(i, j) - \phi(i+1, j+1)]$$

$$D_2(i, j) = \gamma[\phi(i-1, j+1) - \phi(i, j)] - \gamma[\phi(i, j) - \phi(i-1, j+1)]$$

Figura 2 – Representação da posição dos *pixels*.

(i-1, j-1)	(i-1, j)	(i-1, j+1)
(i, j-1)	(i, j)	(i, j+1)
(i+1, j-1)	(i+1, j)	(i+1, j+1)

Fonte: Adaptado de Herráez et al. (2002)

Onde $\gamma(\cdot)$ é definida como uma operação simples de desempacotamento para eliminar qualquer salto de 2π entre os *pixels*. Este procedimento envolve todos os *pixels* exceto os das bordas do padrão, que são definidos como infinito para serem tratados nos próximos passos do algoritmo.

Em posse do resultado dos valores da função de diferenças de segunda ordem, o mapa de confiabilidade dos *pixels* é dado pelo inverso, tal como representado na equação 12 abaixo:

$$R = 1/D \quad (12)$$

sendo R o mapa de qualidade obtido e D o mapa obtido pela função de diferenças de segunda ordem.

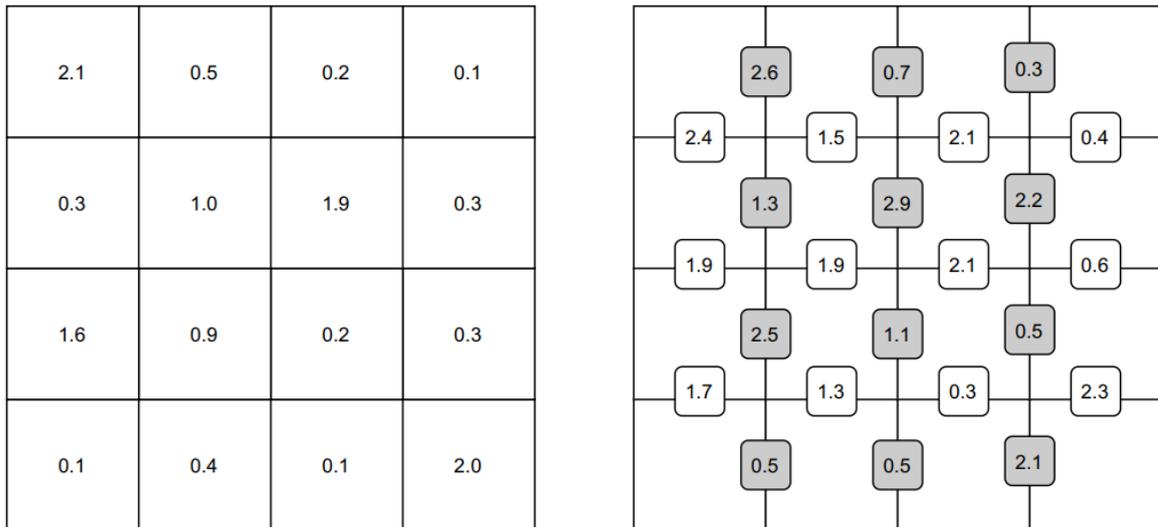
Estratégia de caminho

Cada *pixel* presente no padrão, com exceção das bordas, possui quatro *pixels* vizinhos com fronteiras que dividem este dos demais. Por exemplo, supondo um *pixel* não presente na borda do padrão, este terá os *pixels* superior, inferior, esquerdo e direito dividindo uma fronteira com o mesmo. De forma geral, estes *pixels* vizinhos são conectados de forma vertical ou horizontal com o *pixel* central.

Em posse do mapa de confiabilidade definido em 12, é obtida a medida de confiabilidade de fronteira entre os *pixels*. Esta medida é obtida através da soma vertical e horizontal dos

valores de confiabilidade dos *pixels* e suas respectivas fronteiras, tal como exibido na Figura 3. A próxima etapa consiste no armazenamento dos valores de confiabilidade de fronteira em um vetor e a ordenação deste em ordem decrescente. A partir deste vetor é iniciado o processo de desempacotamento do mapa de fases.

Figura 3 – Mapa de confiabilidade e medida de confiabilidade das fronteiras.



Fonte: Adaptado de Herráez et al. (2002)

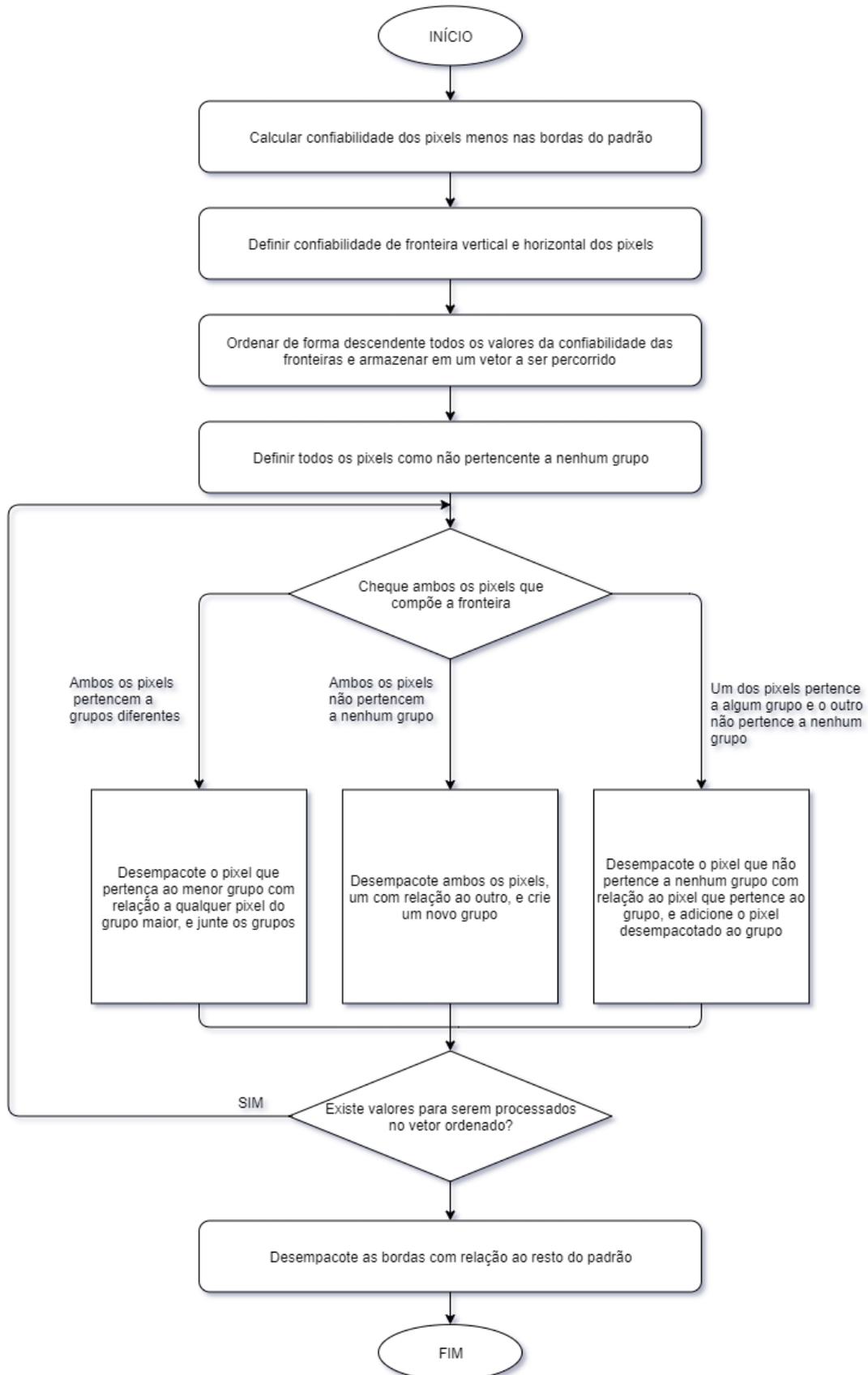
A partir da primeira posição do vetor, o mesmo é percorrido, realizando o processo de desempacotamento dos *pixels* que formam o valor de fronteira escolhido no vetor, gerando grupos de *pixels* desempacotados. Neste procedimento três situações possíveis podem ocorrer:

- Ambos os *pixels* conectados à fronteira podem não estar desempacotados, criando um novo grupo de *pixels* desempacotados;
- Um *pixel* pode pertencer a um grupo e outro ainda não estar desempacotado, desempacotando e adicionando o último ao grupo já criado;
- Ambos *pixels* podem pertencer a grupos desempacotados diferentes, desempacotando e adicionando o menor grupo ao maior.

Desta forma o algoritmo não apresenta um caminho contínuo de desempacotamento, sendo que o maior valor de confiabilidade de fronteira pode estar numa posição diferente dos outros valores sequentes no padrão, gerando grupos de desempacotamento singulares que se desempacotam entre si até o final do processo.

Ao finalizar o processo de desempacotamento, os *pixels* da borda do padrão são desempacotados com relação à toda região desempacotada no procedimento anterior, finalizando o algoritmo. A Figura 4 exibe o fluxograma completo do processo de desempacotamento deste algoritmo.

Figura 4 – Fluxograma do algoritmo de desempacotamento.



Fonte: Adaptado de Herráez et al. (2002)

APÊNDICE D – Obtenção da fase empacotada através da transformada de Fourier

Takeda, Ina e Kobayashi (1982) definiram uma técnica para obtenção da fase empacotada de padrões com presença de portador espacial, tal como os obtidos na técnica Moiré, que trabalha com operações no domínio da frequência através da transformada de Fourier do padrão estudado. Futuramente, Bone, Bachor e Sandeman (1986) definiram as mesmas operações no domínio da frequência para obtenção da fase empacotada, mas com adaptações através da utilização da transformada de Fourier bidimensional, obtendo melhores resultados. Neste trabalho, foi utilizada a versão por transformada de Fourier bidimensional.

Para entender o procedimento para obtenção da fase empacotada $\phi(x, y)$, primeiramente obtemos a forma de Euler da equação do padrão de projeção de Moiré, representado em 2, obtendo assim:

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos(\phi(x, y) + w_x x + w_y y) = \quad (13)$$

$$I(x, y) = A(x, y) + \frac{B(x, y)}{2} [e^{j\phi(x, y)} e^{jw_x x + jw_y y} + e^{-j\phi(x, y)} e^{-jw_x x - jw_y y}] = \quad (14)$$

$$I(x, y) = A(x, y) + C(x, y)e^{jw_x x + jw_y y} + C^*(x, y)e^{-jw_x x - jw_y y} \quad (15)$$

em que $I(x, y)$ é o padrão de projeção, $A(x, y)$ e $B(x, y)$ os ruídos aditivo e modulante, $\phi(x, y)$ a fase procurada, $C = \frac{1}{2}B(x, y)e^{j\phi(x, y)}$, w_x e w_y os portadores espaciais nas direções horizontal e vertical, e $(*)$ o conjugado. Ao obtermos a transformada bidimensional de Fourier da expressão resultante 15 obtemos assim:

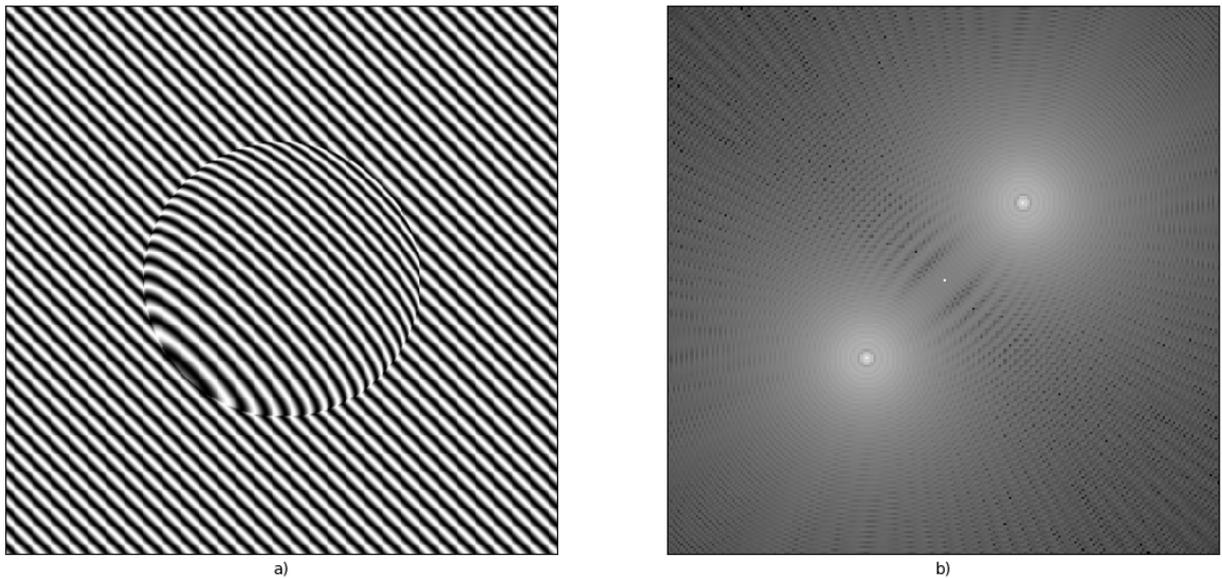
$$I(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + C(f_x - f_{0x}, f_y - f_{0y}) + C^*(f_x + f_{0x}, f_y + f_{0y}) \quad (16)$$

A Figura 5 apresenta um exemplo de padrão de projeção de Moiré e a magnitude da transformada de Fourier bidimensional. É possível visualizar três pontos destacados na magnitude: O central corresponde ao componente de baixa frequência $A(f_x, f_y)$, e os pontos igualmente espaçados do centro indicam as frequências $C(f_x, f_y)$ e $C^*(f_x, f_y)$. A próxima etapa consiste na escolha da frequência C ou C^* , aplicação de um filtro passa banda e translação da frequência escolhida para o centro do espectro, tal como demonstrado na Figura 6. Após realizarmos tais operações de filtragem e translação no domínio da frequência e retornarmos para o domínio espacial, obtemos a equação 17 resultante:

$$I_{filt}(x,y) = B(x,y)\cos(\phi(x,y)) + jB(x,y)\sen(\phi(x,y)) \quad (17)$$

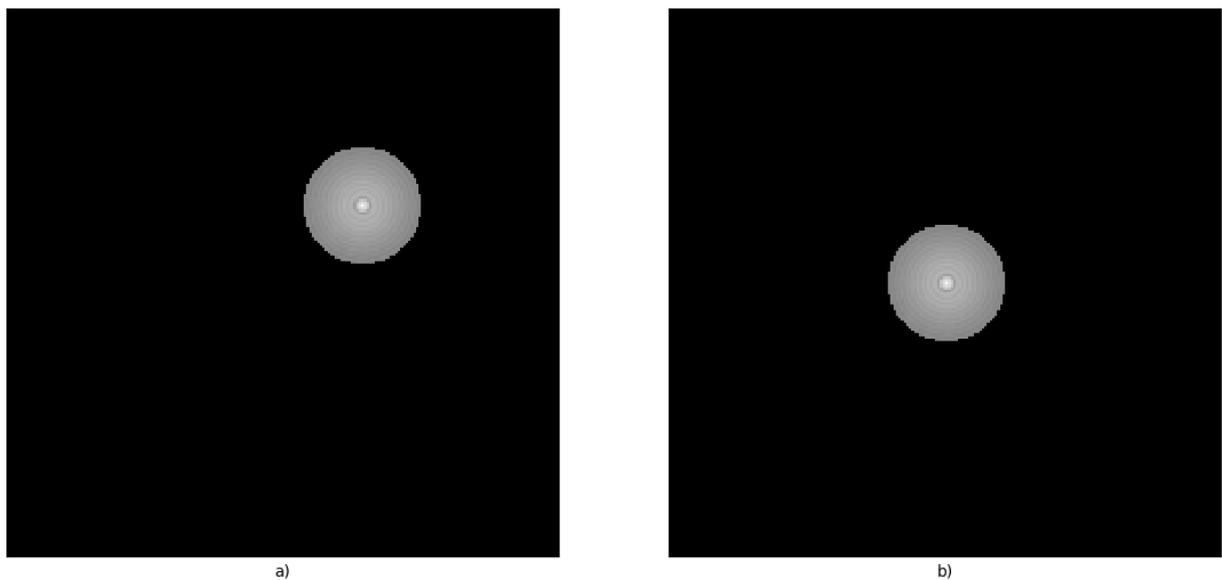
dados que I_{filt} é o padrão filtrado, $B(x,y)$ o ruído modulante e $\phi(x,y)$ a fase procurada.

Figura 5 – Padrão de Moiré e magnitude da transformada bidimensional de Fourier



Fonte: Autor

Figura 6 – Filtragem e operação de shift no espectro de frequência.

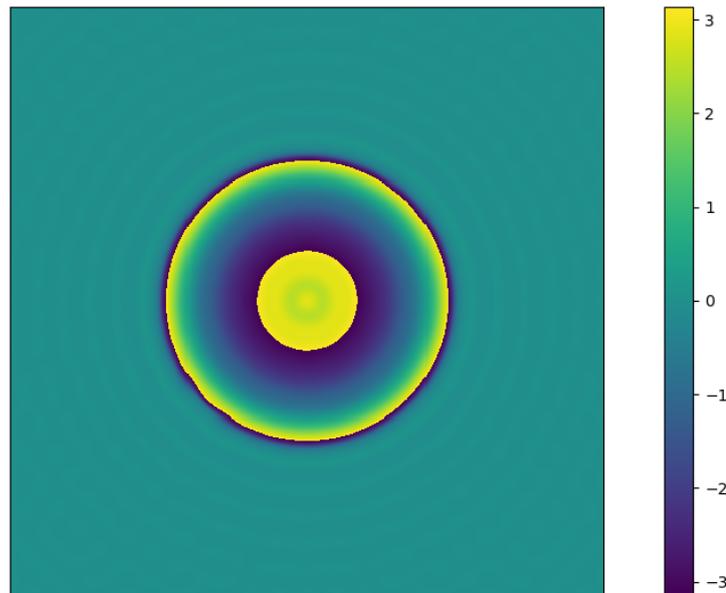


Fonte: Autor

Ao aplicarmos a operação de arco tangente à parte imaginária e real da equação 17 obtemos a fase empacotada desejada, tal como demonstrada na Figura 7 e representada matematicamente na equação 18.

$$\phi(x,y)_{empac} = \arctan\left(\frac{\text{imag}(I_{filt})}{\text{real}(I_{filt})}\right) = \arctan\left(\frac{B(x,y)\text{sen}(\phi(x,y))}{B(x,y)\text{cos}(\phi(x,y))}\right) \quad (18)$$

Figura 7 – Padrão de fases empacotadas obtido.



Fonte: Autor

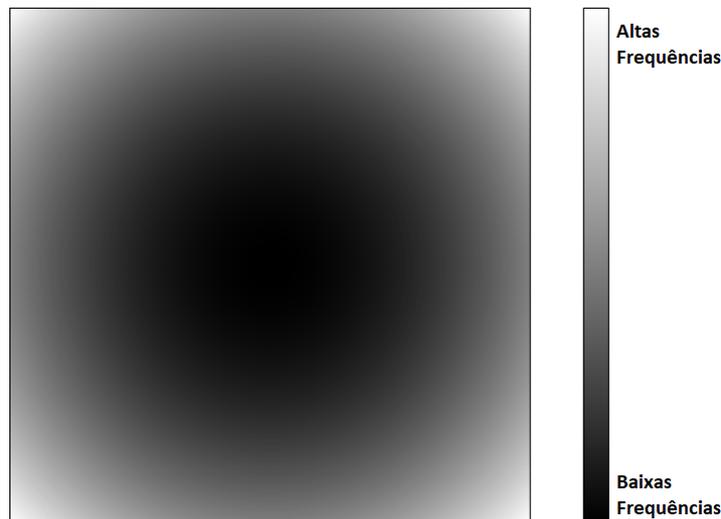
tendo $\phi(x,y)_{empac}$ como a fase empacotada obtida, I_{filt} o padrão filtrado, $\arctan(\cdot)$ a operação de arcotangente, $\text{real}(\cdot)$ e $\text{imag}(\cdot)$ a obtenção da parte real e imaginária, e $B(x,y)$ o ruído modulante.

As equações aqui demonstradas foram com base no padrão de projeção de moiré, que possui informação de fase e presença do portador espacial, mas esta técnica pode ser utilizada para qualquer padrão que apresente fase e portador espacial linear, permitindo a obtenção rápida e simples da fase empacotada.

APÊNDICE E – Filtros passa-alta e passa-baixa

A aplicação da transformada de Fourier bidimensional em conjunto de uma operação de *shift* faz com que os termos do espectro correspondentes às baixas frequências se concentrem no centro do espectro, e que a frequência aumente conforme se distanciam para as bordas, tal como representado na Figura 8. Isto permite fácil manipulação e filtragem das frequências desejadas, a partir da multiplicação de máscaras sobre os termos do espectro da transformada bidimensional. Para ambos os filtros serão utilizadas máscaras de formato de superfícies gaussianas e de mesma dimensão do padrão a ser filtrado, já que conforme o filtro, estas valorizam ou eliminam a frequência no centro da mesma e ponderam as frequências em direção às extremidades.

Figura 8 – Representação das frequências no espectro bidimensional de fourier após a operação de *shift*.



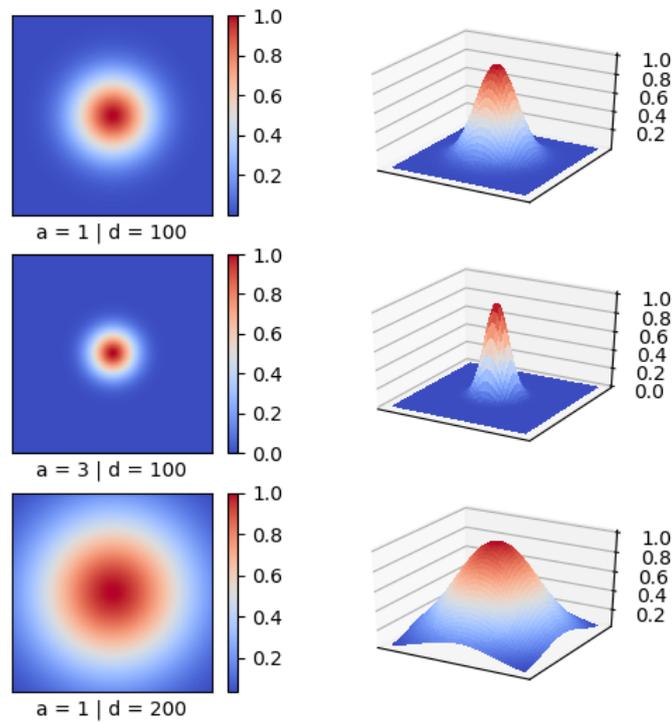
Fonte: Autor

O filtro passa baixas é definido como a multiplicação de uma superfície gaussiana com seu pico de valor unitário centrado no centro da imagem pelos valores espectrais de Fourier, com frequência de corte selecionável e taxa de atenuação unitária. Isto significa que ele valoriza a região de baixa frequência e elimina gradualmente as frequências altas. A Figura 9 apresenta o filtro passa-baixa com diferentes valores de frequência de corte e taxa de atenuação. A equação que define a superfície gaussiana aplicada no domínio de Fourier para o filtro passa baixa é definida na equação 19.

$$F_{pb} = \exp\left(\frac{-a * (x^2 + y^2)}{d^2}\right) \quad (19)$$

sendo a o fator de atenuação do filtro, x e y as posições espaciais do mapa com valores $(0,0)$ posicionados no centro e d a frequência de corte.

Figura 9 – Filtro passa baixa com diferentes valores de atenuação e frequência de corte.



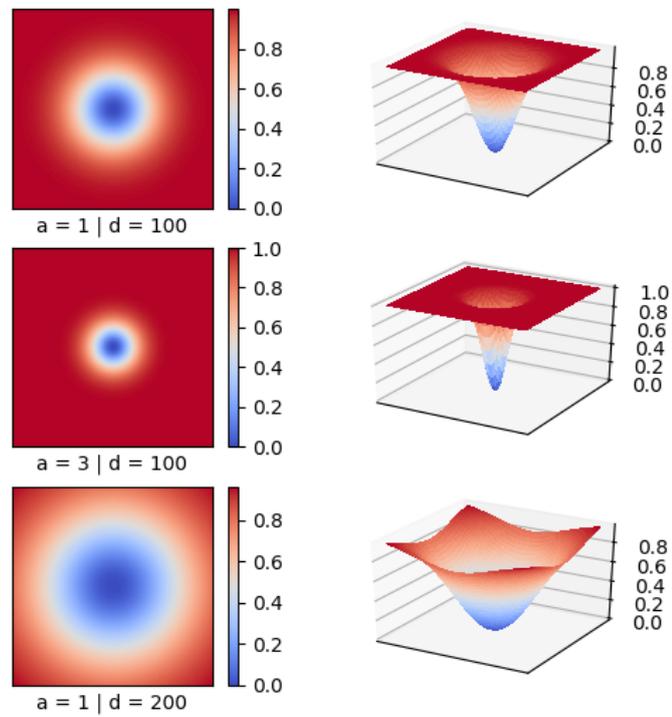
Fonte: Autor

O filtro passa-alta é definido de forma similar ao filtro passa-baixa, mas com a superfície gaussiana inversa, ou seja, está centrada no centro do espectro, mas com valor central nulo, tornando-se unitária conforme se afasta do centro. Este comportamento faz com que as baixas frequências sejam ponderadas, enquanto que as frequências mais altas sejam mantidas. A equação 20 define este filtro e a Figura 10 demonstra diferentes configurações para frequências de corte e taxa de atenuação.

$$F_{pa} = 1 - \exp\left(\frac{-a * (x^2 + y^2)}{d^2}\right) \quad (20)$$

A implementação destes filtros é importante pois parte das técnicas utilizadas na obtenção dos mapas de fases empacotados exigem a eliminação da interferência luminosa do ambiente, definida como o termo “A” nas equações de Moiré e Shearografia, que são caracterizadas como influência de baixa frequência. Desta forma, enquanto os filtros passa-alta eliminam tal influência, os filtros passa-baixa eliminam os ruídos de alta frequência, algo presente principalmente nos experimentos shearográficos. Ambos os filtros estão presentes em ambos experimentos ópticos.

Figura 10 – Filtro passa alta com diferentes valores de atenuação e frequência de corte.



Fonte: Autor

APÊNDICE F – Orientação de franjas lineares - PCA

Em padrões que exibem franjas abertas e lineares, ou com pouca deformação, podemos definir uma orientação geral para as franjas, sejam elas verticais, horizontais ou uma combinação de ambas direções. A obtenção da mesma se dá através da identificação da direção de maior variância dentro do padrão. A técnica PCA (análise dos componentes principais) é utilizada em aplicações de aprendizado de máquina com o objetivo de reduzir dimensionalidade dos dados, realizando uma transformação linear dos dados de forma a encontrar componentes independentes que apontem para as direções de maior variação destes, transformando e concentrando a representatividade do mesmo em poucos componentes.

Na análise do PCA aplicado a padrões de franjas a ideia geral é a mesma: encontrar os componentes que representam as direções de maior variação dentro do padrão de franjas. Para padrões de franjas, as etapas consistem na definição da matriz de covariância, e em encontrar os autovetores e autovalores da mesma, que indicarão as direções de maior e menor variação do padrão, ou seja, as direções paralelas e perpendiculares às franjas.

Para obtenção da matriz de covariância, são obtidos primeiramente os gradientes nas direções x e y , definidos como I'_x e I'_y . Em posse dos gradientes, ambos são colocados em forma de vetores com uma linha e número de colunas iguais ao número de pixels dos padrões, montando em seguida a matriz F , representada em 21, com duas linhas e o número de pixels de colunas. A matriz de covariância C é dada pela multiplicação da matriz F pela sua transposta e divisão pelo dobro do número de pixels presente no padrão, tal como definido em 22, gerando uma matriz 2x2, sendo σ_x^2 a variância na direção x , σ_y^2 a variância na direção y e σ_{xy}^2 variância em ambas direções.

$$F = \begin{bmatrix} \text{linha}(I'_x) \\ \text{linha}(I'_y) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$C = \frac{F \times F^T}{2 \cdot n_{pixels}} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy}^2 \\ \sigma_{xy}^2 & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Apenas a matriz de covariância é suficiente para determinação de qual das direções horizontal e vertical possui a maior e menor variância, tal como indicado explicitamente pelos termos da diagonal principal da matriz. A obtenção dos autovetores nos dá as direções perpendiculares e paralelas às franjas do padrão linear, sendo os autovalores as medidas responsáveis por quantificar a variância das direções obtidas.

A aplicação do PCA em padrões de franjas é necessária em alguns algoritmos para obtenção do mapa de fases empacotados de padrões com franjas lineares e fechadas. Alguns artigos publicados que utilizam tal técnica são encontrados em (DU et al., 2012),(ZHANG; GUO, 2014) e (TRUSIAK; SŁUŻEWSKI; PATORSKI, 2016), sendo o último utilizado de base para desenvolvimento do algoritmo PCA deste trabalho.

APÊNDICE G – Algoritmo de obtenção de fase empacotada de padrões com franjas fechadas

O algoritmo utilizado para obtenção do mapa de fases empacotados de franjas que apresentam curvas fechadas e/ou não lineares é denominado obtenção rápida da fase a partir de um padrão de franjas fechadas (DALMAU-CEDEÑO; RIVERA; LEGARDA-SAENZ, 2008). Tal algoritmo foi escolhido devido à velocidade de processamento e boa qualidade do mapa de fases empacotadas recuperado.

Este algoritmo envolve o processo de obtenção de mapa de qualidade e formulação de estratégia de caminho por crescimento de região, além de algumas técnicas utilizadas neste trabalho, tais como o PCA e transformada de Hilbert, explicados nos apêndices F e B. As etapas envolvidas neste algoritmo são definidas abaixo e explicadas posteriormente:

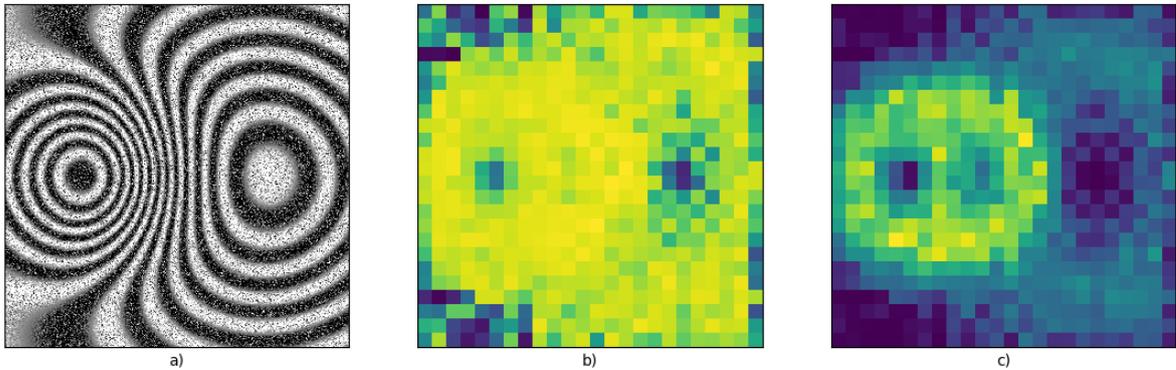
- 1º etapa: Janelamento de regiões de interesse no padrão de curvas fechadas, sendo tais janelas denominadas *tiles*;
- 2º etapa: Obtenção da orientação das franjas na janela selecionada através do PCA;
- 3º etapa: Obtenção do sinal de quadratura com base na melhor orientação das franjas na janela;
- 4º etapa: Definição de caminho e correção do mapa de fases;
- 5º etapa: Refinamento da fase corrigida (opcional).

Na 1º etapa todo o padrão de franjas é dividido em janelas de igual dimensão e que não se sobrepoem, podendo ser necessário o redimensionamento do padrão. O autor indica a utilização de janelas de 16x16, o que funciona bem para um grande conjunto de padrões, mas pode-se utilizar outras dimensões.

Na 2º etapa, não é obtida apenas a orientação geral das franjas, mas também os autovalores e autovetores de cada janela, sendo utilizado apenas o maior autovalor na multiplicação com a medida de orientação local, obtida através da equação 23, gerando assim o mapa de qualidade da orientação. Os valores da medida de orientação local de cada janela geram o mapa de coerência. O mapa de coerência e o mapa de qualidade da orientação do padrão da Figura 11-(a) são demonstrados na mesma Figura em (b) e (c).

$$C = \frac{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^2} \quad (23)$$

Figura 11 – Exemplo de padrão processado pelo algoritmo. a) Padrão de franjas fechadas, b) Mapa de coerência e c) Mapa de qualidade da orientação.

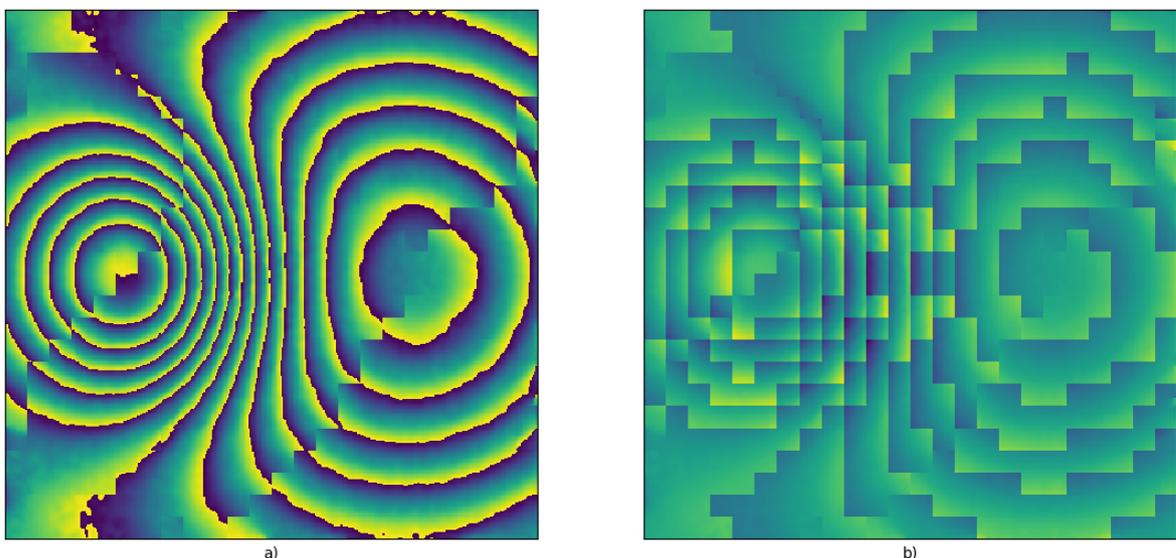


Fonte: Autor

Sendo C o mapa de coerência e σ_x , σ_y e σ_{xy} as variâncias direcionais da matriz de covariância obtida em 22.

A 3ª etapa consiste na obtenção do sinal de fase empacotada de cada janela, através do sinal de quadratura da mesma. Para isto, a transformada de hilbert unidimensional é aplicada na direção da maior orientação das franjas da janela, obtida pelo PCA anteriormente. Como a janela é relativamente pequena, pode-se considerar as franjas presentes na janela como lineares, permitindo a obtenção de fase sem problemas. Desta forma, uma mapa de fases com as janelas de fases empacotadas das direções definidas é gerado, tal como exibido na Figura 12-(a). Além disto, outro mapa também é gerado com o desempacotamento de cada janela, tal como exibido na Figura 12-(b).

Figura 12 – Mapas iniciais não corrigidos. a) Mapa de fases empacotadas e b) Mapa de fases desempacotadas.



Fonte: Autor

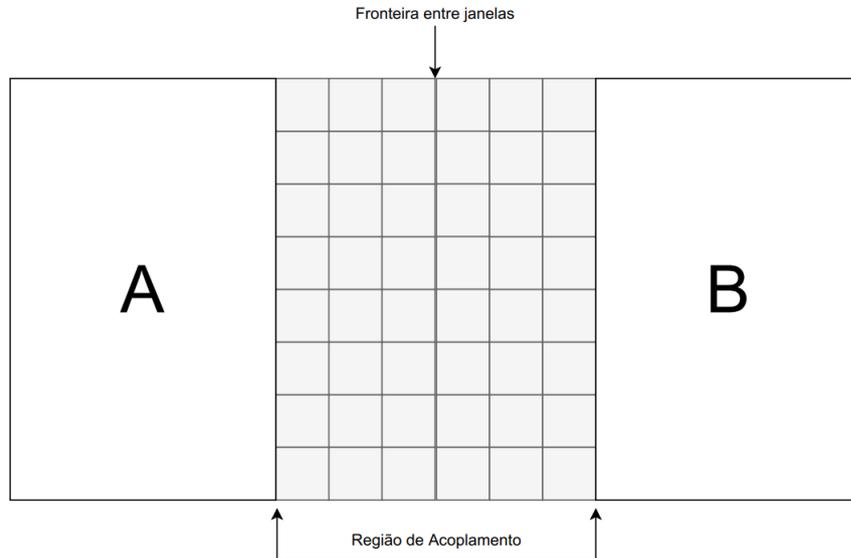
A 4^o etapa consiste na correção do mapa de fases empacotados demonstrado na Figura 12-(a). Para isto, utiliza-se o mapa de qualidade da orientação no processo de correção, iniciando a partir da janela com maior valor do mapa, que será considerada como a janela de orientação correta. A correção das proximas ocorre na janela superior, inferior, direita ou esquerda da janela central, sendo escolhida a que possuir o maior valor de qualidade. Assim que corrigida, será procurado na vizinhança das duas janelas corrigidas qual será a de maior valor de qualidade para ser corrigida, sendo sempre uma correção na direção vertical ou horizontal. O processo continua conforme a região de fases corrigidas cresce, até que todas as janelas sejam corrigidas. Neste processo, o mapa de fases com as janelas desempacotadas é o utilizado nas formulações para definição da necessidade de correção da janela do mapa empacotado.

O processo de correção é baseado no acoplamento da janela vizinha com a janela central, sendo este acoplamento vertical ou horizontal. Desta forma, é selecionada a região entre as janelas analisadas, definida como s , englobando um total de 6 linhas (vertical) ou 6 colunas (horizontal), tal como demonstrado no acoplamento horizontal da Figura 13. Para cada janela a ser corrigida será definido um valor contínuo para adição na janela desempacotada e a inversão ou não de fase, multiplicando a janela por -1 caso necessite inversão. Para obtenção dos valores DC e de inversão, cada linha ou coluna da região entre janelas é colocada nas funções custo 24 e 25, sendo que estas equações aqui demonstradas estão definidas para acoplamentos horizontais, sendo necessário apenas inverter a relação linhas e colunas para obter as equações de acoplamentos verticais.

$$\begin{aligned}
 F_1(\delta_1) = & \sum_{i=0}^{m-1} \{ \{s[i][0] - 3s[i][1] + 3s[i][2] - (s[i][3] + \delta_1)\}^2 \\
 & + \{s[i][1] - 3s[i][2] + 3(s[i][3] + \delta_1) - (s[i][4] + \delta_1)\}^2 \\
 & + \{s[i][2] - (3s[i][3] + \delta_1) + 3(s[i][4] + \delta_1) - (s[i][5] + \delta_1)\}^2 \}
 \end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
 F_2(\delta_2) = & \sum_{i=0}^{m-1} \{ \{s[i][0] - 3s[i][1] + 3s[i][2] + (s[i][3] - \delta_2)\}^2 \\
 & + \{s[i][1] - 3s[i][2] - 3(s[i][3] - \delta_2) + (s[i][4] - \delta_2)\}^2 \\
 & + \{s[i][2] + (3s[i][3] - \delta_2) - 3(s[i][4] - \delta_2) + (s[i][5] - \delta_2)\}^2 \}
 \end{aligned} \tag{25}$$

Figura 13 – Esquema da região de acoplamento horizontal entre duas janelas, sendo A a central e B a vizinha.



Fonte: Adaptado de (DALMAU-CEDEÑO; RIVERA; LEGARDA-SAENZ, 2008)

Sendo F_1 e F_2 a primeira e a segunda função custo e s a janela de acoplamento, sendo considerado uma janela de dimensões $m \times m$. Os valores δ_1 e δ_2 são dados pelas equações 26 e 27 abaixo:

$$\delta_1 = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^5 (-1)^j \binom{5}{j} s[i][j]}{6m} \quad (26)$$

$$\delta_2 = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^5 (-1)^{j+\delta_b} \binom{5}{j} s[i][j]}{6m} \quad (27)$$

Onde:

$$\delta_b = \begin{cases} 1 & \text{se } j > 2 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (28)$$

A fase da janela corrigida com o valor DC e o valor de inversão é dada pela equação 29.

$$\phi_b = \sigma_b \phi_b^* + \delta_b \quad (29)$$

Sendo ϕ_b a fase da janela vizinha corrigida, σ_b o valor de inversão, definido como 1 ou -1 , ϕ_b^* a fase da janela não corrigida e δ_b o valor DC adicionado. A obtenção dos valores DC e de inversão de fase é dada pelas equações 30 e 31.

$$\delta_b = \delta_i^* \quad (30)$$

$$\sigma_b = (-1)^{i+1} \quad (31)$$

Dado que:

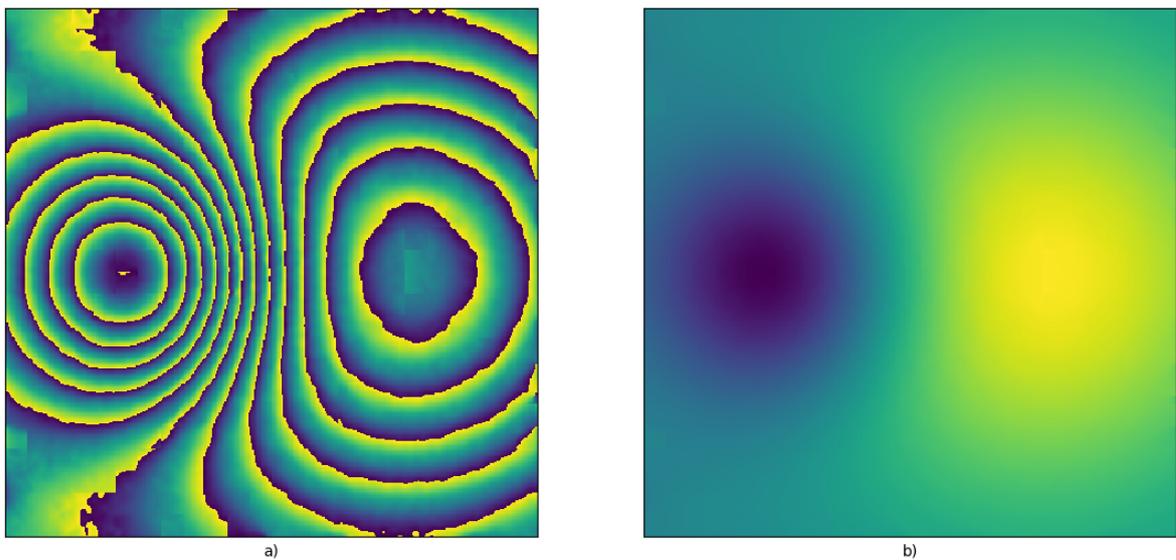
$$\delta_i^* = \operatorname{argmin} F_i(\delta) \quad (32)$$

$$i = \operatorname{argmin} F_i(\delta_i^*) \quad (33)$$

Sendo que $i \in [1, 2]$. As funções F_1 e F_2 são aproximações discretas por finitas diferenças de derivadas de terceira ordem, e definem a necessidade ou não de inversão da fase da janela seleccionada. Todo o desenvolvimento matemático das equações e razão de utilização são explicadas em detalhes no artigo baseado.

O resultado final após a correção de todo mapa de fases é demonstrado na Figura 14, em conjunto do desempacotamento do mapa obtido.

Figura 14 – Resultado do algoritmo. a) Mapa de fases empacotadas corrigido e b) Mapa de fases desempacotadas.



Fonte: Autor

A 5ª etapa é opcional e consiste na eliminação de ruídos e pequenos artefatos na fase corrigida, realizando um refinamento do mapa de fases empacotadas obtido. Apesar de tais

artefatos estarem bem presentes em alguns padrões, não influenciam na recuperação da fase desempacotada, permitindo a utilização da fase obtida sem problemas.