



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Guilherme da Silva Oliveira

Desenvolvimento de sistema interferométricos para análise de deslocamentos

Nova Friburgo

2019

Guilherme da Silva Oliveira

Desenvolvimento de sistema interferométricos para análise de deslocamentos



Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis
Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio

Nova Friburgo

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/BIBLIOTECA CTC/E

O48 Oliveira, Guilherme da Silva.

Desenvolvimento de sistema interferométricos para análise de deslocamentos / Guilherme da Silva Oliveira. - 2019.
66 f. : il.

Orientadores: Joaquim Teixeira de Assis e Eduardo Martins Sampaio.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Interferometria - Teses. 2. Testes não-destrutivos - Teses. 3. Speckle - Teses. 4. Ondas (Física) – Medição - Teses. 5. Simulação (Computadores) - Teses. I. Assis, Joaquim Teixeira de. II. Sampaio, Eduardo Martins. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. IV. Título.

CDU 620.172/.179:531.715

Bibliotecária: Sandra Mueller CRB7/3633

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citado a fonte.

Assinatura

Data

Guilherme da Silva Oliveira

Desenvolvimento de sistema interferométricos para análise de deslocamentos

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 29 de agosto de 2019.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis (Orientador)
Instituto Politécnico – UERJ

Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio (Coorientador)
Instituto Politécnico - UERJ

Prof. Dr. Armando Dias Tavares Junior
Instituto de Física – UERJ

Prof. Dr. Aricelso Maia Limaverde Filho
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Nova Friburgo

2019

A minha família, em particular a minha esposa
Shyanne pela amizade, paciência e amor em meu lar.
A Deus por me fazer companhia em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Joaquim Teixeira de Assis - meu orientador, pelo apoio, ajuda e estímulo, sem sua ajuda não teria conseguido, não tenho como descrever minha gratidão.

Ao Professor Dr. Armando Dias Tavares Junior – pelo apoio, dedicação e acolhimento que me forneceu, sempre disposto a ultrapassar as dificuldades.

Aos professores do IPRJ – colegas de trabalho – pela confiança, apoio e reflexões críticas.

A minha esposa Shayanne da Costa Mendonça Oliveira e meu filho Matheus Guilherme Ribeiro de Oliveira, pelo apoio incondicional.

RESUMO

OLIVEIRA, Guilherme da Silva. Desenvolvimento de sistema interferométricos para análise de deslocamentos. 2019. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2019.

Com o intuito de encontrar uma configuração ideal para ser replicada em Laboratórios Ópticos de Universidades, neste trabalho foram testadas quatro configurações de experimentos para Ensaio Não Destrutivo por Interferometria Óptica. Estas configurações foram baseadas no método *Digital Speckle Pattern Interferometry* (DSPI), que utiliza um feixe de luz coerente produzida por laser HeNe. As configurações sofreram diversos ajustes nas formas de montagens, tipos de carregamentos (angular e por compressão) e corpos de provas utilizados (acrílico, placa de circuito interno e concreto), até que se identificou uma configuração, a quarta, como a mais apropriada, tendo em vista o custo e a simplicidade para ser reproduzida em relação a outros equipamentos comercializados. Essa configuração possibilitou verificar melhor o efeito da interferência óptica, tanto para observação do fenômeno *speckle* quanto na formação de franjas indicativas de descontinuidades, relacionados ao efeito de carregamentos externos. Também foram realizados testes comprobatórios onde se confirmou a eficiência da configuração do experimento selecionado. Os testes comprobatórios constituíram em se inserir uma descontinuidade (furo circular) de 3,4 mm de diâmetro e profundidades variadas (0 mm, 2,5 mm, 10 mm, 13 mm e 15,5 mm) em uma amostra de concreto (24 mm x 30 mm x 51 mm). Os resultados comprovaram existir uma correlação entre o aumento da descontinuidade/furo e os resultados do ensaio não destrutivo (DSPI).

Palavras-chave: Ensaio não destrutivos. Interferometria óptica. Experimento. Carregamento compressão. Franjas. *Speckle*. Simulação (Computadores).

ABSTRACT

OLIVEIRA, Guilherme da Silva. Development of infometric systems for displacement analysis. 2019. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2019.

In order to find an ideal experiment to be replicated in Optical Labs in Universities, four different settings of Non Destructive Interferometric Optical Essay were tested in this in this research. These settings were based on Digital Speckle Pattern Interferometry (DSPI) method, which uses a coherent light beam produced by a HeNe laser. The setting have undergone several changes on the mounting shapes, loading types (angular and by compression) and specimens used (acrylic, a piece of circuit board and concrete). The fourth setting was identified as the most appropriate, because of its cost and simplicity to be reproduced in comparison to the other owes and with commercialized equipment. This setting has made possible to better check the optical interference effects, both in the observation of the speckle phenomenon and in the fringes which aidicute discontinuity formation related to the external loadings effect. Besides that, supporting tests were realized and the efficiency of the selected setting was confirmed. The supporting tests consisted of inserting a discontinuity (circular hole) of 3,4mm in diameter and desw out depths (0 mm, 2,5 mm, 10 mm, 13 mm e 15,5 mm) in a sample of concrete (24 mm x 30 mm x 51 mm). The results proved that there is a correlation between the increase of discontinuity/hole and the results of the Non Destructive Essay (DSPI).

Keywords: Non destructive interferometric. Optical essay. Optical interferometry. Experiment. Compression loading. Fringes. Simulation (Computers).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Tabela 1- Custo por tipo de manutenção | 14 |
| Figura 1- Descontinuidades Superficiais e subsuperficiais e seus diferentes métodos de detecção | 18 |
| Figura 2 - Descontinuidades internas e seus diferentes métodos de detecção. ... | 19 |
| Figura 3 - Métodos Interferometria | 20 |
| Figura 4 - Sistema Interferometria..... | 23 |
| Figura 5 - Interferência construtiva e interferência destrutiva..... | 24 |
| Figura 6 - Potência óptica de saída versus diferença de comprimento do caminho para um interferômetro de duas frentes de onda..... | 27 |
| Figura 7 - Campo de intensidade de um padrão de speckle criado por uma superfície rugosa e difusa quando iluminada ou luz coerente..... | 29 |
| Figura 8 - Percurso aleatório no plano complexo | 31 |
| Figura 9 - Determinação do raio médio dos grãos constituintes do padrão, onde p_s corresponde ao raio do disco de Airy | 31 |
| Figura 10 - Caminho do feixe de luz, troca de fase | 37 |
| Figura 11 - Mapa de franjas típico | 40 |
| Figura 12 - Mapa de franjas típico | 41 |
| Figura 13 - Imagem padrão intensidade de franjas..... | 42 |
| Figura 14 - Goniômetro | 45 |
| Figura 15 - Equipamento para compressão por micrômetro | 45 |
| Figura 16 - Amostra de concreto (51 mm x 30 mm) | 46 |
| Figura 17 - Amostra Acrílico (40 mm x 40mm) | 46 |
| Figura 18 - Amostra Placa de circuito impresso (70 mm x 30 mm)..... | 47 |
| Figura 19 - Fluxograma algoritmo Matlab..... | 48 |
| Figura 20 - Tela MATLAB..... | 49 |
| Figura 21 - Montagem configuração 1° configuração..... | 50 |
| Figura 22 - Resultado da diferença da primeira configuração | 50 |
| Figura 23 - Montagem configuração 2 | 51 |
| Figura 24 - Resultado da diferença da segunda configuração | 52 |
| Figura 25 - Montagem configuração 3 | 53 |
| Figura 26 - Resultado da diferença da terceira configuração | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 27 - Montagem configuração 4 | 55 |
| Figura 28 - Resultado da diferença da quarta configuração..... | 55 |
| Figura 29 - Amostra de Concreto utilizada no experimento comprobatório..... | 56 |
| Figura 30 - Resultado da análise comprobatória - Sem Furo | 57 |
| Figura 31 - Resultado da análise comprobatória - Profundidade 25 mm | 57 |
| Figura 32 - Resultado da análise comprobatória - Profundidade 100 mm | 57 |
| Figura 33 - Resultado da análise comprobatória - Profundidade 130 mm | 57 |
| Figura 34 - Resultado da análise comprobatória - Profundidade 155 mm | 58 |
| Figura 35 - Resultado da análise comprobatória..... | 59 |
| Figura 36 - Resultado da análise comprobatória - Formação de Franjas..... | 60 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|--|----|
| Equação 1 - O campo elétrico de uma onda de luz linearmente polarizada | 25 |
| Equação 2 - Onda de luz de uma única frequência (Luz Monocromática) | 25 |
| Equação 3 - Intensidade Luminosa | 25 |
| Equação 4 - Intensidade em qualquer ponto devido à interferência de duas ondas | 25 |
| Equação 5 - Campo elétrico de uma onda luminosa monocromática | 29 |
| Equação 6 - Amplitude do fasor do campo | 30 |
| Equação 7 - A intensidade (irradiação) da onda | 30 |
| Equação 8 - Amplitude do fasor | 30 |
| Equação 9 - a mudança de caminho ΔL_1 devido ao caminho 1:..... | 38 |
| Equação 10 - Para todos os arranjos práticos, $SP \gg d $ | 38 |
| Equação 11 - Se a direção de ,SP, é dada por um vetor unitário n_0 | 38 |
| Equação 12 - Mudança no caminho L_2 associada a mudança de caminho do feixe..... | 38 |
| Equação 13 - Se esta direção for dada por n_s | 38 |
| Equação 14 - Mudança total de fase devido ao deslocamento | 39 |
| Equação 15 - Ordem de Franja | 39 |
| Equação 16 - Intensidade média do padrão do Speckle | 40 |
| Equação 17 - Intensidade do padrão de Speckle após deformação | 40 |
| Equação 18 - Diferença da intensidade de dois padrões Speckle | 41 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 13 |
| 1.1 | Manutenção | 13 |
| 1.2 | Inspeção | 14 |
| 1.2.1 | Ensaio destrutivo | 15 |
| 1.2.2 | Ensaio não destrutivo (END) | 16 |
| 2 | ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR SHEAROGRAFIA | 20 |
| 2.1 | Conceitos iniciais | 20 |
| 3 | PRINCÍPIO FÍSICO | 23 |
| 3.1 | Interferometria | 23 |
| 3.2 | Interferência | 24 |
| 4 | FENÔMENO SPECKLE | 27 |
| 5 | TIPO DE SPECKLE | 35 |
| 5.1 | Speckle subjetivo | 35 |
| 5.2 | Speckle objetivo | 36 |
| 5.3 | Determinação da fase | 36 |
| 5.4 | Princípios de formação de franja | 39 |
| 5.5 | Vantagens e desvantagens do ensaio por shereografia..... | 43 |
| 5.6 | Materiais | 44 |
| 6 | METODOLOGIA | 45 |
| 6.1 | Ambiente computacional | 47 |
| 6.2 | Primeira configuração..... | 49 |
| 6.3 | Segunda configuração | 51 |
| 6.4 | Terceira configuração | 52 |
| 6.5 | Quarta configuração | 54 |
| 6.6 | Resultados e discussões..... | 56 |
| | CONCLUSÕES | 61 |
| | SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS | 62 |
| | REFERÊNCIAS | 63 |
| | ANEXO A - Custos aproximados de componentes | 65 |
| | ANEXO B - Alguns Fabricantes de Equipamento para Ensaio Não Destrutivos..... | 66 |

INTRODUÇÃO

Desde o início da sociedade, desenvolver tecnologias e ferramentas para facilitar a vida humana possui grande importância. Quando observamos a história identificamos várias civilizações que se desenvolveram por esse motivo. Na atualidade, com o avanço tecnológico e a diversidade de equipamentos fabricados, estão sendo exigidos dos projetos de engenharia, níveis cada vez maiores de eficiência e segurança, tornando necessário o desenvolvimento de novos processos e meios de monitoramento para os produtos. Sempre tendo em vista o fato de que, para um projeto de determinado equipamento ser economicamente viável, o projetista deve prever várias condições de uso, não se limitando apenas à construção, mas também à sua manutenção corretiva, preventiva e preditiva.

Assim, a seleção do material para fabricação do equipamento, deve levar em consideração as vantagens e desvantagens que um material em específico possui em relação ao outro. Nesse sentido, em relação à manutenção corretiva e preventiva foram desenvolvidas tecnologias confiáveis e economicamente viáveis, para acompanhar a vida útil do equipamento e ao mesmo tempo, diminuir os custos de manutenção e riscos de acidentes. Entre as tecnologias desenvolvidas, esse trabalho tem o objetivo de dissertar sobre a interferometria que é um método de inspeção não destrutivo, baseado na interferometria óptica para análise de deslocamento e defeitos.

Os métodos que envolvem inspeções não destrutivas estão sendo estudados e desenvolvidos em diversos trabalhos, pois possuem, como vantagem, a em relação aos ensaios destrutivos a característica de não submeterem a amostra solicitações ou esforços que possam comprometer sua integridade. Na atualidade no Brasil segundo a ABENDI (Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeções) os principais métodos que fazem parte deste grupo são: os ensaios térmicos, ensaios por ultrassom, correntes parasitas, emissão acústica, radiografia, radioscopia, gamagrafia, ensaio visual, estanqueidade, líquido penetrante e partículas magnéticas, que são amplamente reconhecidos como métodos consolidados de Ensaios Não Destrutivos (END), para monitorar a estrutura de equipamentos sem a necessariamente paralisar suas operações. Também existe o

reconhecimento de que os ensaios de interferometria óptica que utilizam a técnica de *speckle*, como métodos em desenvolvimento e que não foram disseminados, pois se comparados aos outros métodos, já consagrados, o ensaio por interferometria óptica é relativamente recente.

Desta forma, em complemento à contribuição que o Laboratório de Óptica do Departamento de Eletrônica Quântica do Instituto de Física da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Forneceu com o trabalho Interferometria Óptica Para Ensaios Não Destrutivos, esse trabalho pretende verificar a viabilidade de desenvolver sistemas interferométricos para análises de deslocamentos, simples e de fácil montagem para END, o que permitirá que este método seja reproduzido em laboratórios universitários e, por consequência, aumentar sua divulgação e conhecimento entre estudantes universitários.

OBJETIVO

Desenvolver uma configuração para Ensaio Não Destrutivo por Métodos Ópticos utilizando como método a Interferometria Digital de Padrões de Speckle – do inglês Digital Speckle Pattern Interferometry (DSPI), tendo como parâmetros o custo e simplicidade para ser reproduzida em relação a outros equipamentos comercializados, de tal modo que possa ser elaborado em laboratórios universitários, familiarizando os estudantes com essa técnica.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Manutenção

A manutenção é a ação necessária para manter e até melhorar a eficiência de algum sistema. Ela deve garantir as funções dos equipamentos e instalações (ativos), de modo a assegurar um processo de produção englobando a segurança, a preservação do meio ambiente e mantendo custos adequados. A manutenção pode ser classificada de diversas maneiras; quanto ao momento da ação e quanto a política da ação, dentre outros. Neste trabalho abordaremos três categorias, manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva, onde cada subdivisão possui suas próprias características e custos, conforme pode ser notado na Tabela 1, o que interfere diretamente na eficácia do sistema. (OLIVEIRA, 2017).

A manutenção pode ser entendida como a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo a supervisão e modificações, necessária com o intuito de manter ou restabelecer as funções de determinado item ou equipamento (ABNT-NBR 5462,2004).

Neste sentido, na literatura, Júlio de Aquino Nascif Xavier, engenheiro mecânico, diretor da TECÉM TECNOLOGIA EMPRESARIAL LTDA, professor de cursos de pós-graduação e MBA em Engenharia de Manutenção e Gestão de Ativos, define dois novos conceitos de subdivisão de manutenção. Em seu livro *Manutenção Função Estratégica*, 4ª edição, 2015, ele conceitua a manutenção reativa e a proativa. Estabelece ainda que atualmente no Brasil se pratica, em grande parte, a manutenção reativa, comprovadamente mais custosa, menos eficiente e sem vantagens adicionais, o que prejudica desempenho econômico e produtivo do país. Nessa subdivisão, a manutenção corretiva é caracterizada como “reativa”, isto é, reage aos acontecimentos, em sua grande maioria não planejados. Nesse contexto, quem comanda a manutenção são os equipamentos que dela dependem. Esse é o principal motivo pelo qual a manutenção corretiva é indesejada, pois quando ela torna-se necessária, concluímos ter alguma falha já ocorrido no sistema. Em outras palavras, não existiu um planejamento, prejudicando o controle

produtivo e, em casos extremos, tendo por consequência acidentes ou impactos irreparáveis. Na atualidade a existência deste tipo de manutenção é considerada um indicador da sua ineficácia.

A manutenção preventiva, por sua vez, é feita através de política proativa, que causa menor impacto no sistema como um todo, por ser totalmente planejada, com períodos pré definidos pelo fabricante do sistema (que considera o desgaste previsto). Pode ocorrer também nas paradas programadas, antecipando as falhas, evitando desperdícios e sendo por consequência mais barata e rápida. Além disso, esse tipo de manutenção abre uma janela de oportunidade para que se atualize o sistema e seus componentes.

A ABNT (2004, p.7) conceitua a manutenção preditiva como a “manutenção que permite garantir uma qualidade do serviço desejado, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva”. Essa manutenção exige controle preciso de todos os parâmetros do sistema, para dominar a situação (considera o desgaste real dos componentes em uso). Neste tipo de manutenção é necessário o monitoramento dos parâmetros e condições de uso dos sistemas e, para realizar a coleta desses dados de forma eficiente, são feitas inspeções periódicas de controle.

Tabela 1- Custo por tipo de manutenção

| Custo por Tipo de Manutenção | US\$/HP instalado/ano |
|---|------------------------------|
| Manutenção Corretiva não planejada | 17 a 18 |
| Manutenção Preventiva | 11 a 13 |
| Manutenção Preditiva (+ correção se necessário) | 7 a 9 |

Fonte: XAVIER, 2015.

1.2 Inspeção

Existem diversas técnicas de inspeção para coleta e monitoramento de dados, divididas em técnicas de ensaios destrutivas e não destrutivas. Estas podem

ainda serem subdivididas em outro conjunto de técnicas. A seleção da técnica utilizada no recolhimento de dados que permitirão a análise do sistema, dependem de diversos fatores tais como:

- a) Parâmetros a serem monitorados;
- b) Custos;
- c) Disponibilidade de profissionais qualificados;
- d) Localização dos equipamentos;
- e) Precisão dos dados exigidos;
- f) Tempo de análise;
- g) Segurança do inspetor.

1.2.1 Ensaio destrutivo

Esses ensaios constituem em submeter o corpo de prova a solicitações ou esforços controlados até provocar na amostra deformação de algum tipo, o que, por consequência, inutiliza o corpo de prova. São técnicas muito utilizadas na indústria e que possuem por finalidade detectar características e propriedades mecânicas. Quando se realiza esse tipo de ensaio, deve ser levado em consideração que a microestrutura do material pode ser heterogênea e o resultado do ensaio pode depender do local a ser ensaiado.

Apesar dos ensaios destrutivos serem reconhecidos e apoiados em normas bem estabelecidas, fornecendo dados como: ductilidade, limite de resistência mecânica, limite de escoamento, resistência à fadiga, dentre outros, com o avanço das tecnologias esses tipo de ensaios tendem a ser progressivamente substituídos e/ou complementado por técnicas de ensaios não destrutivos.

Esse movimento está acontecendo devido as desvantagens que os ensaios destrutivos apresentam em relação aos ensaios não destrutivos, como custo elevado de confecção de corpos de prova, o fato de não permitir que o ensaio seja repetido no mesmo corpo de prova, horas de maquinário envolvido e o fato do ensaio não ser

necessariamente executado diretamente na peça que vai ser utilizada em operação, o que pode acarretar em resultados não confiáveis.

1.2.2 Ensaio não destrutivo (end)

Ensaio Não Destrutivo (END) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, e podem ser executados nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção. Os END estão entre as principais ferramentas de controle da qualidade de materiais e produtos, sendo amplamente utilizados nos setores petroquímico, militar, aeroespacial, siderúrgico, naval, eletromecânico, de papel e celulose, dentre outros. Eles contribuem para a qualidade dos bens e serviços, redução de custos, preservação da vida e do meio ambiente, sendo fator de incremento de competitividade para as empresas que os utilizam.

Os Ensaio Não Destrutivo (END) apresentam algumas características que podem ser consideradas vantajosas se comparadas àquelas dos Ensaio Destrutivo. São menos custosos e utilizam, como princípios básicos, a aplicação de alteração de parâmetros físicos, de modo a não causar danos aos produtos inspecionados. Portanto se admite que eles sejam realizados na variável física exata que será utilizado no sistema. Assim, será ampliado o grau de confiabilidade do componente. Pode ser utilizada mais de uma técnica de END consecutiva e, na maioria dos casos, isso pode ser feito com o sistema em operação, o que diminui o custo de manutenção e possibilita o aumento de frequência das inspeções.

Dentre os principais motivos para utilização dos END, destacam-se, a sua capacidade de detecção de descontinuidades ou defeitos em diferentes dimensões, posições e formatos. Outra característica do END é sua capacidade de determinação das propriedades físicas dos materiais, tais como: propriedades ópticas, elétricas, magnéticas e mecânicas, através da avaliação estrutural de componentes (microestrutura e estrutura da matriz) (OLIVEIRA, 2014).

Os END são avaliados como processos especiais pelos sistemas que regulamentam qualidade como, a ISO-9001. Todos os profissionais que atuam

nesse segmento devem ser treinados, qualificados e certificados em função da qualidade exigida. Entidades nacionais, como a ABENDI (Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção) e internacionais como a ASME (Sociedade Norte Americana de Engenheiros Mecânicos) são capazes de validar tais exigências.

Na atualidade as principais técnicas de Ensaio Não Destrutivos segundo a ABENDI são:

- a) Correntes Parasitas;
- b) Emissão Acústica;
- c) Radiografia, Radioscopia e Gamagrafia;
- d) Ensaio Visual;
- e) Estanqueidade;
- f) Líquido Penetrante;
- g) Partículas Magnéticas;
- h) Ultrassom;
- i) Termografia.

Na atualidade a ABENDI não classifica os métodos interferométricos entre os principais de END, inclusive, em consulta realizada pelo autor deste trabalho, em fevereiro de 2019, informou que “ainda não foram publicadas normas nacionais sobre o tema”.

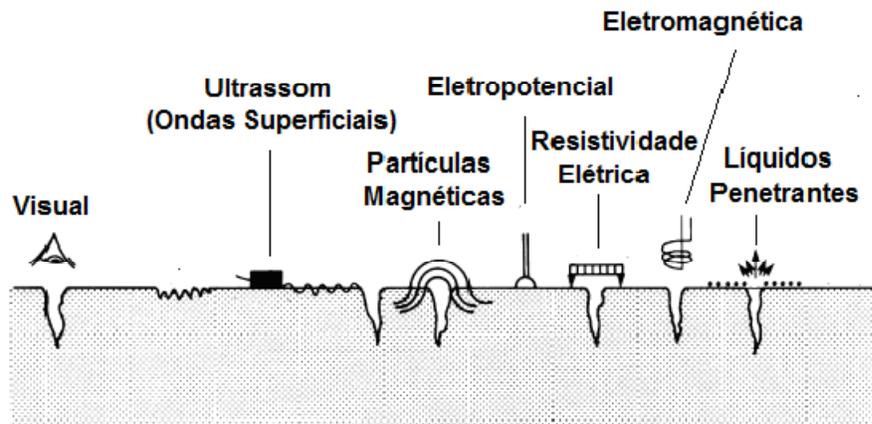
Os vários métodos de ensaios não destrutivos apresentam características distintas, e a escolha de determinada técnica em detrimento de outra deve levar em consideração, principalmente: os parâmetros que a técnica é capaz de fornecer, a velocidade da inspeção, a precisão dos parâmetros a ser monitorada e a disponibilidade do equipamento.

Vale ressaltar que com o desenvolvimento tecnológico crescente que proporciona uma evolução dos equipamentos, os ensaios não destrutivos são cada vez mais estudados, eficazes e menos custosos. Esse estudo é um exemplo, e está sendo desenvolvido para analisar a viabilidade técnica de se utilizar o ensaio não destrutivo por interferometria óptica.

Os métodos de avaliações não destrutivas, são classificados em dois grupos distintos que são determinados de acordo com a localização da descontinuidade que se deseja identificar (OLIVEIRA, 2014):

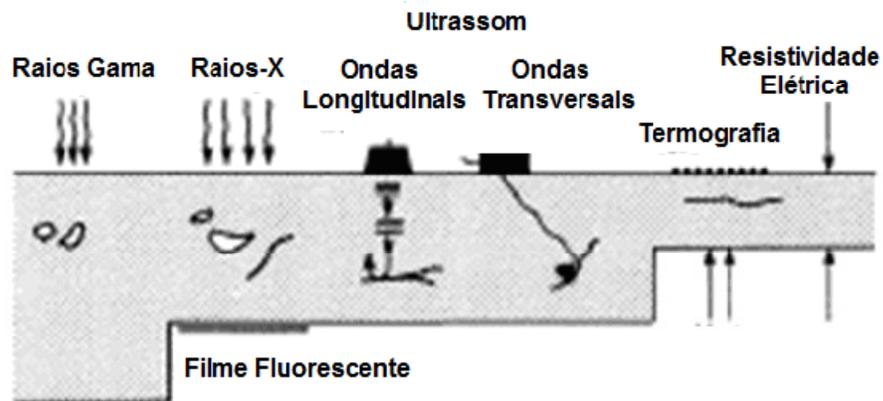
- a) Método de inspeção nas superfícies onde as descontinuidades são observadas na superfície externa ou subsuperficial (Figura 1). Exemplos de ensaios deste grupo: o ensaio visual, líquidos penetrantes e partículas magnéticas.
- b) Método de inspeção volumétrica onde as são descontinuidades observadas no interior dos materiais (Figura 2). Exemplos de ensaios deste grupo: o ensaio por ultrassom, ensaio radiográfico e a termografia.

Figura 1- Descontinuidades Superficiais e subsuperficiais e seus diferentes métodos de detecção



Fonte: Adaptada de OLIVEIRA, 2014.

Figura 2 - Descontinuidades internas e seus diferentes métodos de detecção



Fonte: Adaptada de OLIVEIRA, 2014.

É importante pontuar que, em alguns casos, as técnicas de ensaios não destrutivos, são utilizadas juntamente ou antes de técnicas de ensaios destrutivos, com a vantagem de poderem ser utilizadas nos componentes semiacabados, de maneira que permitam, acompanhar e garantir sua construção com a qualidade exigida diretamente no componente que irá ser utilizado no sistema. Também vale ressaltar que as técnicas de ensaios não destrutivos, podem ser utilizadas na sequência, desta maneira o usuário poderá selecionar mais de uma técnica e obter uma composição de dados. O objetivo principal dos ensaios não destrutivos, é gerar dados de modo qualitativo e quantitativo das descontinuidades em determinado componente.

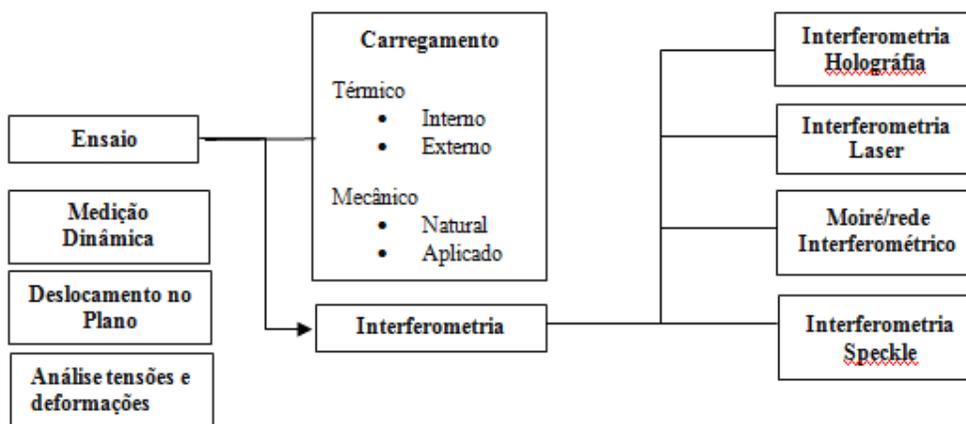
2 ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR INTERFEROMETRIA ÓPTICA

2.1 Conceitos iniciais

A inspeção visual a olho nu, com certeza é o método mais antigo e ainda o mais utilizado, para ensaios não destrutivos que utilizam princípios da óptica para avaliação de materiais. Esse método é tão difundido, que todos nós o utilizamos, em muitos casos sem percebemos. E obviamente é limitado, pela capacidade do olho humano em detectar microfissuras ou descontinuidades não superficiais.

Atualmente, existem equipamentos eletrônicos e ópticos que permitem ultrapassar barreiras impostas pelo olho humano, na detecção e interpretação da estrutura do material. A partir desses equipamentos foram criados ensaios não destrutivos que utilizam princípios de interferometria óptica, como citados na Figura 3, dos quais destacamos: a Holografia, o Moiré e o ensaio de interesse desse trabalho a Interferometria Óptica.

Figura 3 - Métodos Interferometria



Fonte: Adaptada de MONTEIRO,2012.

A interpretação dos chamados “anéis de Newton”, por Boyle (1627-1691), e por Hooke (1635-1703), é aceita pela comunidade científica, como o ponto de partida para o estudo de interferometria óptica. Estes anéis coloridos, correspondiam

a figuras de interferências observadas visualmente num filme de ar bastante delgado estabelecido entre duas lâminas de vidro em contato entre si.

Mas foi apenas com a invenção do laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) por volta de 1960. Que é um dispositivo que produz radiação eletromagnética, monocromática (possui frequência e comprimento de onda bem determinados), elevada coerência (relação de fase muito bem definida), além de, geralmente, ser naturalmente colimada (propaga-se como um feixe paralelo). Os métodos que utilizam a interferometria deram um salto de desenvolvimento, pois foram superadas a maioria das limitações impostas pelas fontes térmicas, luz natural ou por descarga de energia. Como resultado naquele momento, restou apenas mais uma barreira impeditiva que era o processamento da imagem (SCHÖNTAG, 2009).

Nos dias atuais, o desenvolvimento tecnológico de fotodetectores e semicondutores, permitiu ao processamento de imagens superar o que um dia foi a última limitante para o desenvolvimento dos ensaios baseados em interferometria ópticas. O desenvolvimento tecnológico está tornando os ensaios mais rápidos, baratos e confiáveis.

O ensaio por interferometria óptica digital, é uma técnica de ensaio não destrutivo considerada em desenvolvimento e recente, se comparada a outras técnicas de ensaios não destrutivos. As suas principais vantagens são: o fato de ser uma técnica de inspeção relativamente rápida, confiável, quando aplicada em componentes estruturais e as experiências realizadas até o momento, indicam que esta técnica pode ser levada a campo, pois dispensa o elevado grau de controle do ambiente, o que representa um avanço em relação a Holografia. Vale ressaltar que sistemas portáteis estão em franco desenvolvimento e são aplicados especialmente nas indústrias aeronáuticas, aeroespaciais, militar e petroquímica.

Por ser uma técnica interferométrica e capaz de perceber pequenas deformações ocorridas nas superfícies dos materiais, ocasionadas após a aplicação de um determinado carregamento. É uma técnica que mensura discontinuidades por intermédio de luz laser (coerente), baseada no processamento de dados, obtidos a partir de técnicas de deslocamento de fase, e está cada vez mais consolidada entre técnicas de END.

Um ramo da interferometria utiliza um dispositivo especial de cisalhamento (*shearing*), a *shearografia* possibilita a mensuração de gradientes de deslocamento,

gerando, a partir destas informações detalhes sobre a deformação experimentada pelo objeto inspecionado quando ele é submetido a uma determinada excitação externa (carregamento). Como os danos e os defeitos em corpos sólidos usualmente induzem concentração de tensões e deformações, torna-se mais fácil revelar defeitos exibindo anormalidades em nível de deformação em termos de deslocamento. É uma técnica bastante complexa e ainda em desenvolvimento. (MIRANDA, 2011)

O princípio básico da interferometria óptica é a comparação (processamento) de imagens subsequentes do objeto investigado, onde no mínimo são utilizadas duas imagens, uma imagem sem carregamento (referência) e outra imagem capturada do momento em que o objeto inspecionado sofre excitação externa (carregamento), utilizando-se iluminação por uma fonte de luz coerente, o laser. Esse processamento permite identificar pequenas diferenças de deslocamento, utilizando a mudança de fases, que podem ser correlacionadas ao deslocamento de cisalhamento e assim identificar descontinuidades pontuais. As imagens geradas por essa técnica, apresentam franjas na intensidade luminosa que podem ser homogêneas em caso de peças sem defeito ou não homogêneas em casos onde a peça apresente alguma descontinuidade.

Os interferômetros ópticos podem se apresentar em diferentes configurações agrupadas em quatro categorias. (GALETI, 2012)

- a) Duas ondas, ex.: Michelson, Mach-Zender;
- b) Múltiplas ondas, ex.: Fabri-Perot;
- c) Diferencial, ex.: Polarimétrico;
- d) Trajetória recíproca, ex.: Sagnac.

3 PRINCÍPIO FÍSICO

3.1 Interferometria

Baseado na interferência da luz, que consiste na redistribuição espacial da intensidade luminosa condicionada pelas diferenças de fases, é atualmente utilizado em diversos sistemas de medição, o sistema de interferometria é essencialmente constituído por uma fonte de luz, um sistema óptico (interferómetro) e um detector que converte as variações de intensidade luminosa num sinal mensurável, conforme pode ser observado no fluxo apresentado na Figura 4. (MONTEIRO, 2012).

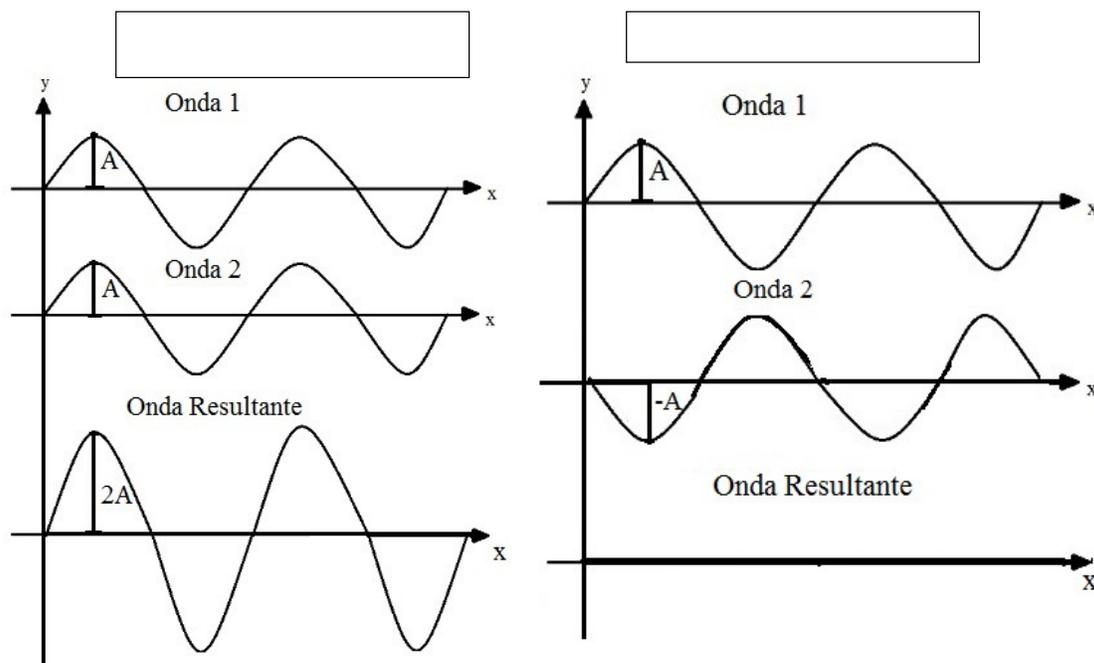
Figura 4 - Sistema Interferometria



Fonte: O autor, 2019.

Um interferómetro é simplesmente um sistema óptico para observar interferência entre duas ou mais frentes de onda. Por interferência óptica designa-se a interação ou sobreposição de feixes de luz da qual resulta uma intensidade que não é simplesmente igual à soma da intensidade das componentes. A intensidade resultante é criada pela interferência construtiva e destrutiva, sendo estas, por sua vez, definidas pela relação de fase entre as ondas. No caso particular da interferência de duas ondas com a mesma amplitude, a interferência construtiva surge quando ambas estão em fase, sendo a amplitude resultante o dobro da inicial e a intensidade aí será quatro vezes maior, muito mais brilhante. Quando estão em oposição de fase, podendo a amplitude da onda resultante ser nula, existirá interferência destrutiva dando origem a uma região escura (Figura, 5). Para que ocorra interferência é necessário que os feixes de luz envolvidos possuam coerência, quer em termos de frequência, quer em termos de fase. (MONTEIRO, 2012).

Figura 5 - Interferência construtiva e interferência destrutiva



Fonte: adaptada de MONTEIRO, 2012.

Os poucos sistemas de interferometria disponíveis no mercado são comercializados por preços muito elevados, cujas principais razões residem nos custos associados ao desenvolvimento das tecnologias destes equipamentos. (SCHÖNTAG, 2009).

3,2 Interferência

Como já citado, por interferência óptica, designa-se a interação ou sobreposição de feixes de luz da qual resulta uma intensidade que não é simplesmente igual à soma da intensidade das componentes.

O campo elétrico de uma onda de luz linearmente polarizada que varia no tempo e pode ser descrita pela Eq. 1 (MONTEIRO, 2012):

Equação 1- O campo elétrico de uma onda de luz linearmente polarizada

$$V(t) = \int_0^{\infty} a(\nu) \cdot e^{[-i\varphi(\nu)]} \cdot e^{(i2\pi\nu t)} d\nu \quad (1)$$

Onde:

- $a(\nu)$ é a amplitude
- $\varphi(\nu)$ a fase de uma componente com frequência ν .

Para ondas de luz de uma única frequência (luz monocromática) a equação reduz-se a Eq. 2:

Equação 2 - Onda de luz de uma única frequência (Luz Monocromática)

$$V(t) = |a|e^{(-i\varphi)}e^{(i2\pi\nu t)} \quad (2)$$

Em que o fator $a = |a|e^{(-i\varphi)}$ representa a amplitude complexa da onda gerada.

A intensidade luminosa, I , num dado ponto, é definida como a média temporal da quantidade de energia gerada por unidade de tempo numa área unitária perpendicular ao fluxo de energia. Esta pode ser calculada multiplicando a amplitude complexa nesse ponto pelo seu complexo conjugado (Eq. 3), assim:

Equação 3 - Intensidade Luminosa

$$I = |a|^2 = a \cdot a^* \quad (3)$$

Em qualquer ponto, a amplitude complexa é obtida somando a amplitude complexa das ondas individuais, devido a várias ondas com a mesma frequência. Assim, em qualquer ponto a intensidade é dada pela (Eq. 4), isso ocorre devido à interferência de duas ondas:

Equação 4 - Intensidade em qualquer ponto devido à interferência de duas ondas

$$\begin{aligned} I &= |a_1 + a_2|^2 = a_2 a_1^* + |a_1|^2 + a_1 a_2^* + |a_2|^2 \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \end{aligned} \quad (4)$$

Onde:

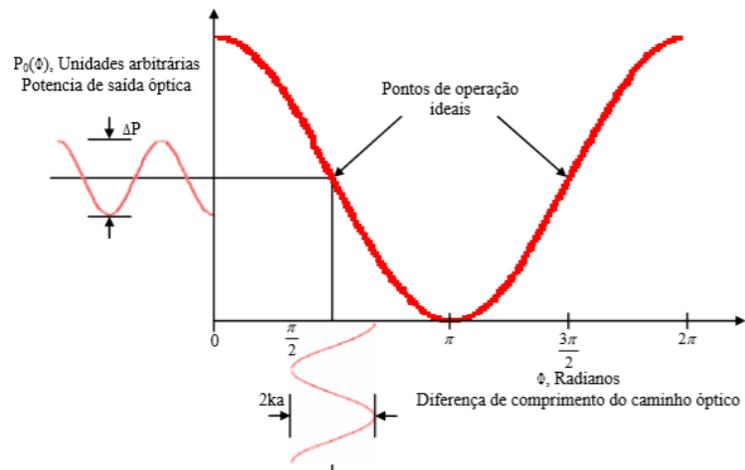
- I é a intensidade resultante da interferência,
- I_1 é feixe de luz1
- I_2 é feixe de luz2 e $(\varphi_1 - \varphi_2) = \Delta\varphi$ é a diferença de fase entre os feixes 1 e 2.

A (Eq. 4), descreve um padrão de franjas em que a distribuição espacial da intensidade, que é resultante proporcional ao quadrado da amplitude e depende ainda da diferença de fase ($\Delta\varphi$) entre as duas ondas.

O termo $2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$ é denominado de termo de interferência. Onde a fase da onda pode variar infinitamente, mas o efeito visual é o mesmo para ângulos côngruos e por isso é comum restringir a análise aos limites de π e $-\pi$. Durante a análise de interferência, se a diferença de fase for de 180° (π radianos) ou qualquer ângulo côngruo de 180° tem-se que $\Delta\varphi = (2 \cdot n + 1) \cdot \pi$ para $n = 1, 2, 3, \dots$, onde $\cos\Delta\varphi = -1$ é a intensidade mínima. As regiões onde a interferência é destrutiva formam as franjas de interferência escuras. (SCHÖNTAG, 2009)

Se a diferença de fase for 0 ou qualquer ângulo congruente tem-se que $\Delta\varphi = 2 \cdot n \cdot \pi$ para $n = 1, 2, 3, \dots$ e o $\cos\Delta\varphi = 1$, onde a intensidade é máxima. Neste caso, as duas ondas estão em fase e interferem construtivamente, formando as regiões claras na imagem, denominadas de franjas claras. Qualquer outra fase atinge uma intensidade intermediária. As regiões claras e escuras que representam as interferências construtivas e destrutivas respectivamente, são conhecidas como franjas de interferência (Figura 6).

Figura 6 - Potência óptica de saída versus diferença de comprimento do caminho para um interferômetro de duas frentes de onda



Fonte: Adaptado de MONTEIRO, 2012.

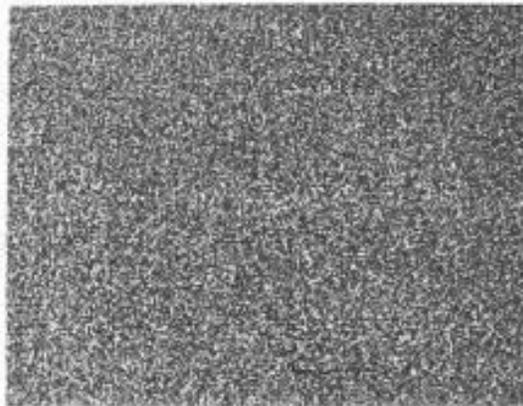
4 FENÔMENO SPECKLE

O termo *Speckle*, que significa “mancha” em Inglês, é a denominação atribuída ao resultado da interferência construtiva e destrutiva da luz coerente de um laser refletida aleatoriamente por uma superfície rugosa, formando um padrão estocástico de pontos claros e escuros.

O fenômeno de *speckle* refere-se à aparência granulada da projeção da luz refletida por uma superfície difusa, iluminada por um feixe de laser. Isto ocorre devido a interferência entre feixes completamente coerentes, difratados a partir de elementos individuais dessa superfície. No início, o *speckle* foi tratado como um incômodo, contudo, posteriormente, observou-se que poderia ser usado como uma portadora de informações, e aplicações para análise de deslocamentos e vibrações de superfície demonstraram ser bastante atraente.

O efeito *speckle* é um dos principais fenômenos resultantes da interação de uma iluminação coerente com uma superfície opticamente rugosa. Por efeito *speckle*, entendemos o fenômeno de interferência de ondas mutuamente coerentes com uma variação ao acaso de fase. O resultado deste tipo de interferência é uma distribuição de máximos e mínimos na intensidade da luz que é estacionária no tempo, mas aleatória no espaço. Os picos individuais de intensidade representando pequenas manchas claras ou escuras são chamados de *speckle* conforme demonstrado na Figura 7.

Figura 7 - Campo de intensidade de um padrão de speckle criado por uma superfície rugosa e difusa quando iluminada ou luz coerente



Fonte: O autor, 2019.

A análise da imagem revela uma estrutura detalhada da granulosidade de aspecto caótico e desordenado, com um padrão irregular, o que limita sua interpretação a apenas ser descrita por métodos estatísticos. A este tipo de granulosidade dá-se o nome de granitado laser (tradução do inglês “*laser speckle*”). O padrão de *speckle* só é formado quando a superfície do objeto é iluminada com uma fonte de luz de elevada coerência e o comprimento de correlação da rugosidade da superfície é da mesma ordem ou superior ao comprimento de onda da luz usada. (MONTEIRO, 2012).

O fenômeno *speckle* acontece devido a diferença de deslocamento das ondas ópticas, onde a imagem apresenta pontos de interferência construtiva ou destrutiva ocorrerá a formação de grãos claros e escuros, respectivamente.

Supondo que $u(x,y,z,t)$ é a componente do campo elétrico de uma onda luminosa no ponto (x,y,z) no instante t com polarização linear. Para uma onda monocromática, a equação de onda (Eq. 5) toma a seguinte forma. (MONTEIRO, 2012)

Equação 5 - Campo elétrico de uma onda luminosa monocromática

$$u(x, y, z, t) = A(x, y, z). \exp [i2\pi vt] \quad (5)$$

em que ν é a frequência óptica e A é a amplitude do fase do campo, a qual é uma função complexa descrita por:

Equação 6 - Amplitude do fasor do campo

$$A(x, y, z) = |A(x, y, z)| \cdot \exp [i\theta(x, y, z)] \quad (6)$$

Equação 7 - A intensidade (irradiação) da onda

$$I(x, y, z) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |u(x, y, z)|^2 dt = |A(x, y, z)|^2 \quad (7)$$

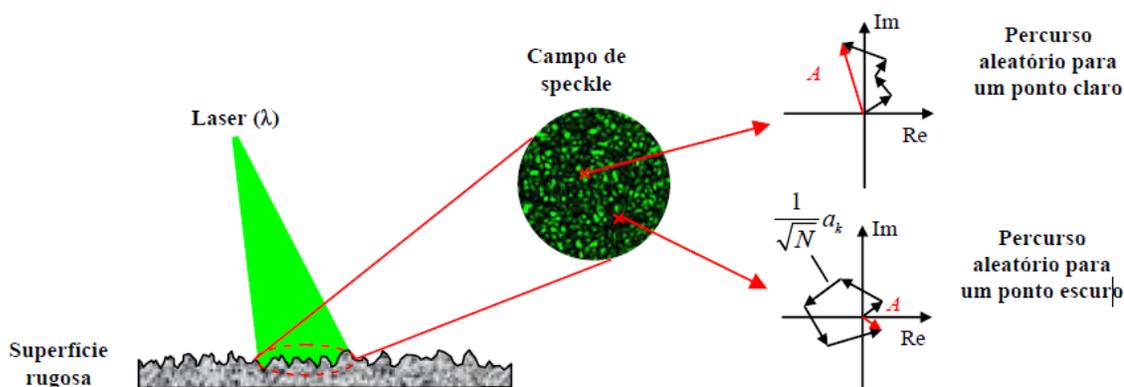
Quer o padrão de *speckle* seja formado por propagação livre no espaço ou por um sistema formador de imagem, a amplitude do campo elétrico num dado ponto do plano de observação (x, y) , consiste numa grande quantidade de contribuições defasadas de diferentes regiões de dispersão da superfície rugosa. Deste modo, a amplitude do fase $A(x, y, z)$ é representada como uma soma de várias contribuições elementares de fases $(\sqrt{N})^{-1} a_k(x, y, z)$, $k=1, 2, \dots, N$.

Equação 8 - Amplitude do fasor

$$A(x, y, z) = \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sqrt{N}} a_k(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| e^{i\varphi_k} \quad (8)$$

A ilustração abaixo contém a adição complexa das várias contribuições das fases elementares para produzirem a resultante (ALMEIDA, 2016)

Figura 8 - Percurso aleatório no plano complexo



Fonte: ALMEIDA, 2016.

O diâmetro do grão de *speckle* no plano de observação é definido como a distribuição média da distância entre regiões adjacentes de intensidade máxima e mínima, o qual está sempre relacionado com o ângulo de abertura que a radiação dá origem no plano que define o campo de *speckle*. (MONTEIRO, 2012).

O tamanho dos grãos médio do *speckle* depende, basicamente, de três fatores: comprimento de onda (λ), distância entre o ponto de observação e o objeto espalhador (Z), e diâmetro da área iluminada do difusor (D) conforme descrito na Eq. 9. (ATILA, 2016)

Equação 9 - A mudança de caminho ΔL_1 devido ao caminho 1

$$\rho_s = 1,22 \frac{\lambda z}{D} \quad (9)$$

Esta equação revela que na prática o diâmetro do *speckle* pode ser controlado pela abertura da lente D formadora da imagem. Assim, justifica-se que diferentes aberturas produzem diferentes diâmetros de *speckles*. Da adição coerente de um feixe especular alinhado com o eixo do sistema óptico, com o padrão de *speckle* inicial, resulta um padrão de *speckle* cujo tamanho do grão é o dobro do obtido no padrão inicial. A intensidade resultante em cada ponto depende da diferença de fase entre os feixes. (MONTEIRO, 2012).

Tipicamente, as rugosidades das superfícies são caracterizadas por micro superfícies, que na maioria dos materiais, são pelo menos da ordem de um comprimento de onda da luz laser ($0,6 \mu\text{m}$). Quando uma superfície é iluminada com luz laser, cada um dos elementos microscópicos que constitui a superfície dá origem a uma onda difratada coerente. No entanto, os caminhos ópticos de elementos vizinhos exibem diferenças aleatórias, as quais podem chegar a vários comprimentos de onda. Assim, quando as ondas difratadas desses elementos interferem uns com os outros forma-se um padrão granular estacionário, denominado padrão de *speckle*. Quando a superfície de um objeto reflete (ou transmite) difusamente sob luz laser, sua imagem tem um aspecto granular. O aspecto é de estar coberto por um padrão aleatoriamente distribuído de manchas brilhantes e escuras. Esse fenômeno de *speckle* é próprio de se usar luz coerente (laser), onde todos os pontos da superfície rugosa do objeto iluminado espalham a luz que neles incide. Para um dado ponto de observação no espaço, sua iluminação se dará pela superposição de todas as ondas (provenientes do espalhamento de cada ponto do objeto iluminado tornam-se emissores de ondas esféricas, segundo o princípio de Huygens) que nele incidem. Como resultado, temos um padrão de interferência no espaço chamado de “padrão *speckle*” ou “padrão granular”, com fase e intensidade variando aleatoriamente. (ATILA, 2016)

A diferença de fase aleatória entre as ondas que interferem dos centros de espalhamento permanece constante no tempo e é praticamente independente das características do objeto, tanto que este padrão pode ser observado por um sistema fotográfico ou mesmo com os olhos. Se o objeto difuso for colocado em movimento lento, a fase de cada ponto emissor irá mudar devido a este movimento, e com isso iremos observar uma mudança gradual na estrutura detalhada do padrão de *speckle*. Isto sugere que a imagem resultante deste padrão aleatório seja portadora de informações e pode ser utilizada para quantificar perfis, vibrações, tensões, deformações, translações, rotações, ou mesmo mudanças de fase de um determinado objeto áspero ou translúcido. Contudo, o padrão varia muito de ponto a ponto e depende fortemente das propriedades ópticas do sistema de visualização, isto é, do sistema óptico usado para observar. Por esse motivo o padrão *speckle* precisa ter uma função de espalhamento pontual suficientemente ampla para garantir muitas regiões individuais do objeto. (OLIVEIRA, 2012).

No início dos anos setenta foi introduzido, por diversos grupos e mais ou menos em simultâneo, o registro eletrônico dos padrões de interferência usando câmaras de vídeo para registrar os interferogramas. A designação desta técnica varia de acordo com os grupos de investigação que participaram no seu desenvolvimento, sendo as mais conhecidas o ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*), DSPI (*Digital Speckle Pattern Interferometry*), Holografia-TV (MONTEIRO, 2012).

Neste aspecto as técnicas utilizadas, ESPI e DSPI, diferem apenas no fato de que na primeira, uma das frentes de onda é especular, isto é, tem fase constante, enquanto na segunda ambas correspondem a padrões de *speckle*. Combinando dois destes registros, obtidos com o objeto em diferentes situações de carga, obtém-se padrões de interferência que se encontram relacionados com o comportamento dos objetos. (ALMEIDA, 2016).

A correlação *speckle* consiste na superposição coerente, no plano de gravação, de ondas de luz existentes simultaneamente. Neste caso, são consagrados os usos de interferômetros na obtenção do padrão de *speckle* resultante. Como o objeto é iluminado com luz laser, duas imagens obtidas interferem entre si, formando uma imagem interferométrica contendo um padrão de interferência conhecido como padrão *speckle* (HUNGA, 2005)

Quando o negativo exposto é revelado é iluminada por uma frente de onda plana e a luz difratada é observada no plano de Fourier, haverá a formação de um círculo cujo diâmetro é determinado pela frequência espacial máxima. Isso é conhecido como halo de difração. Com o desenvolvimento tecnológico a técnica evoluiu do filme fotográfico convencional (negativo) para o “mundo digital” das câmeras CCDs e do computador, incorporando assim as modernas formas de processamento de imagem, além da automação na obtenção de resultados. Com essa evolução, a técnica passou a se chamar então Interferometria Digital de Padrões de *Speckle* (DSPI).

Conforme exposto anteriormente, para a realização deste experimento foram gravadas as figuras de *speckle* da superfície em 3 momentos distintos, cada um com diferente carregamento.

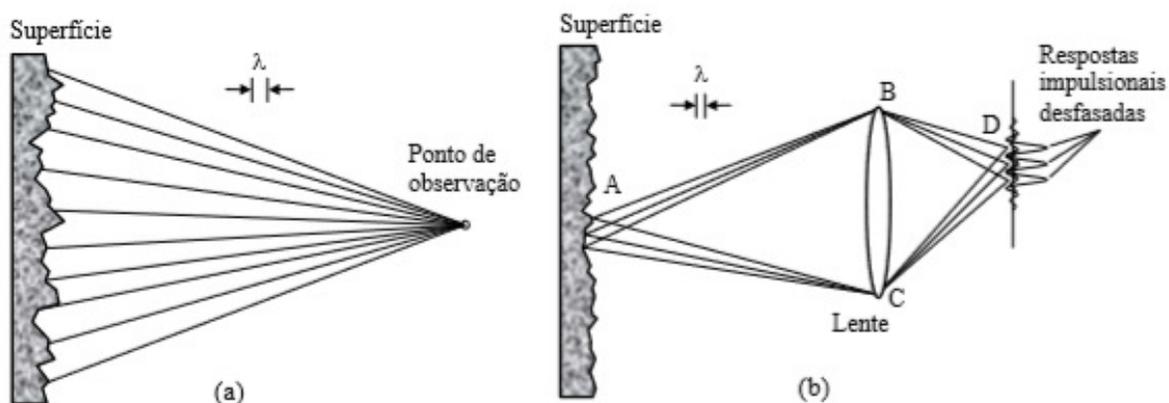
Apesar da evolução que ensaios ópticos apresentam na atualidade ainda existem algumas limitações na implementação das técnicas interferométricas. O *speckle*

individual revelado pela câmara CCD, necessita de aberturas numéricas relativamente grandes (*F-number*). Consequentemente, os *speckles* são claramente visíveis, o que degrada a qualidade das franjas, desta forma é necessário recorrer ao processamento digital para remover o ruído. Outra limitação dos sistemas de DSPI e HD é a resolução espacial das câmaras, o que causa transtorno para se revelar uma franja, que precisa de cerca de 20 pontos de *speckle*.

5 TIPO DE SPECKLE

O padrão *speckle* pode ser classificado de duas maneiras: *Speckle* objetivo, quando o padrão é registrado sem a inserção de qualquer elemento óptico entre o objeto e o detector e *Speckle* subjetivo, no qual o padrão é registrado com um sistema de formação de imagem (Figura 9).

Figura 9 - Origem física do speckle



Legenda: (a) - speckle subjetiva propagação no espaço livre; (b) - speckle objetiva um sistema de formação de imagem.

Fonte: TEIXEIRA, 2011.

5.1 Speckle subjetivo

O speckle objetivo é formado quando luz coerente é espalhada por uma superfície áspera e incide em outra superfície qualquer, sem que o sinal passe por qualquer elemento óptico.

Como foi visto na seção anterior, quando uma superfície é iluminada, pode-se considerar que cada ponto absorve e reemite a luz, atuando como uma fonte de ondas esféricas semelhantes às ondas secundárias de Huygens. A amplitude complexa das ondas espalhadas em qualquer ponto do espaço é dada pela soma das amplitudes das contribuições de cada ponto na superfície. A amplitude total tem

um valor que varia entre zero e um máximo determinado pela magnitude e fase das amplitudes individuais. À medida que se varia a posição de um ponto de observação pertencente ao campo de luz espalhada pela superfície, a amplitude resultante e conseqüentemente, a intensidade resultante, apresentam um valor aleatório. Esta variação aleatória de intensidade é que gera o padrão de *speckle* subjetivo.

5.2 Speckle objetivo

Quando a imagem de um objeto iluminado por luz laser é formada, sua intensidade varia aleatoriamente segundo um padrão de *speckle*. A intensidade de cada ponto da imagem varia devido à aleatoriedade do efeito *speckle*. Durante a formação das imagens, pelos efeitos de difração relacionados ao sistema óptico utilizado, o tamanho do *speckle* e a sua distribuição espacial são determinados por este sistema. (TEIXEIRA, 2012)

A distribuição espacial do *speckle*, entretanto, é determinada pelo limite de difração do sistema de óptico da imagem.

5.3 Determinação da fase

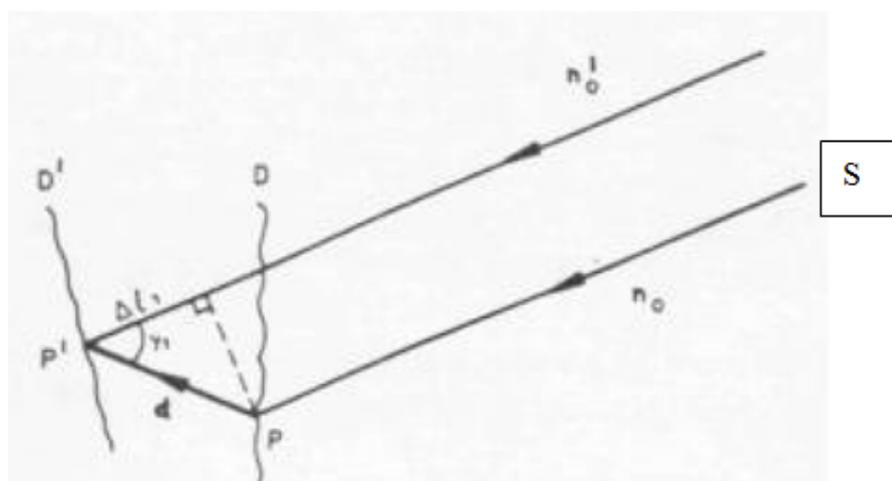
Conforme, G.P. Pires et al descrevem em “Interferometria Óptica Para Ensaio Não Destrutivo”, para o uso das técnicas interferométricas é necessário o conhecimento da fase e das amplitudes das ondas no plano de observação.

A medição do campo de deslocamento ou da deformação do objeto é realizada com base na variação do caminho óptico que a luz percorre em cada ramo do interferômetro antes de ser combinada. Geralmente, o caminho óptico de um dos ramos é fixo, sendo esse o feixe de referência, o que permite relacionar a variação do caminho óptico no segundo ramo com o movimento produzido na superfície do objeto pelo, feixe objeto.

Duas frentes de onda da mesma fonte de luz laser iluminam simultaneamente a superfície do objeto, ocorrendo interferência entre essas ondas. Desta resulta um padrão de *speckle* cuja fase está relacionada com a diferença de caminho óptico que a luz emitida por cada fonte percorre para chegar à superfície. O registro da fase da luz na imagem é realizado em dois momentos distintos: antes e após produzir deslocamentos/deformações na superfície do objeto. Nesta situação, os padrões de *speckle* sofrem uma variação da fase devido à alteração no novo caminho óptico percorrido pelos dois feixes. Este defasamento provoca alterações na intensidade do padrão *speckle*, o qual é registado pelo sensor de vídeo da câmera. Esta variação está relacionada com o deslocamento ocorrido na superfície do objeto, sendo a relação definida pela configuração do interferômetro, comprimento da luz coerente utilizada, entre outros fatores. (MONTEIRO, 2012).

O caminho óptico partindo da fonte S até Q passando por P é o que será analisado para obtenção da fase final. Quando o objeto é deslocado, de forma que o ponto P é deslocado de d para o ponto P' , o caminho óptico da fonte S para o ponto no plano de observação passando por um ponto no objeto é alterado (Figura 10). A mudança de fase associada com essa variação no caminho óptico é a base para as técnicas de correlação com holografia e com *speckle* para a medição de deslocamentos de superfícies.

Figura 10 - Caminho do feixe de luz, troca de fase



Fonte: PIRES. Et. al

Dessa forma o caminho óptico pode ser desmembrado em três componentes;

1. o caminho de S a P ;
2. o caminho lp associado com a variação de altura da superfície;
3. o caminho de P a Q .

De acordo com a Figura 10:

Equação 9 - a mudança de caminho ΔL_1 devido ao caminho 1:

$$\Delta L_1 = SP' - SP$$

Equação 10 - Para todos os arranjos práticos, $SP \gg |d|$

$$\Delta L_1 = SP' - SP = d \cos \alpha_1$$

Equação 11 - Se a direção de SP , é dada por um vetor unitário n_0

$$\Delta L_1 = n_0 d$$

Pode-se considerar que lp permaneça inalterado quando a superfície é deslocada. A mudança no caminho L_2 associada a mudança de caminho do feixe, de acordo com a figura 10 é dada pela:

Equação 12 - Mudança no caminho L_2 associada a mudança de caminho do feixe

$$\Delta L_2 = d \cos \alpha$$

Onde assume-se que as direções na qual a luz é espalhada de P a Q e de P' a Q' são aproximadamente paralelas, tem-se:

Equação 13 - Se esta direção for dada por n_s

$$\Delta L_2 = n_s d$$

Portanto, a mudança total de fase devido ao deslocamento é dada por

Equação 14 - Mudança total de fase devido ao deslocamento

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_s)d$$

Desta forma, a Ordem de Franja, OF, que é um número associado à variação de fase ocorrido num grão de speckle entre os dois estados de deformação da superfície do objeto, será definida por:

Equação 15 - Ordem de Franja

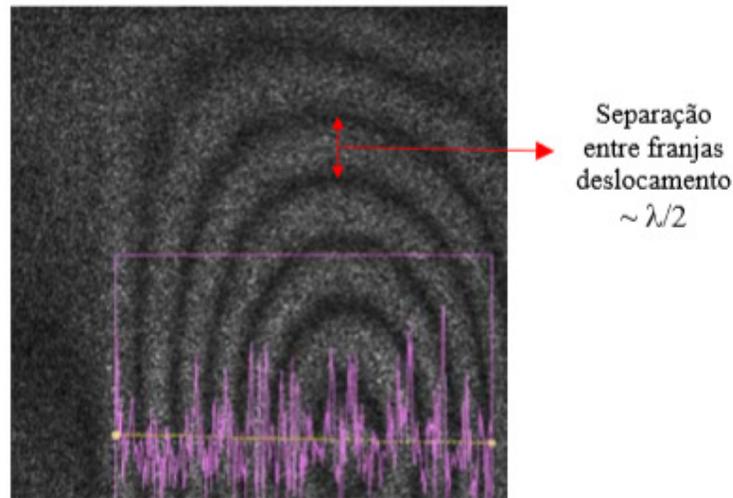
$$OF = \frac{\Delta\Phi}{2\pi}$$

Assim, podemos deduzir que quanto menor for o comprimento de onda λ do laser e maior o ângulo φ , maior será o número de franjas produzidas para um mesmo deslocamento d .

5.4 Princípios de formação de franja

Tal como foi referido anteriormente, para se obter franjas de interferência é necessário capturar os campos de intensidades entre dois instantes consecutivos de deformação na superfície do objeto, sendo que o primeiro instante é designado o estado de referência e o segundo o de estado de deformação. O valor absoluto referente à substituição das imagens nos dois instantes consecutivos originai imagem com franjas de interferência. As franjas obtidas neste processo, são chamadas de franjas em bruto (*raw fringes*). Na Figura 11 observam-se as faixas claras e escuras que são as ditas franjas de interferência. As franjas claras representam regiões de interferência construtiva e as faixas escuras representam as regiões de interferência destrutiva. (MONTEIRO, 2012).

Figura 11 - Mapa de franjas típico



Fonte: Adaptado de MONTEIRO, 2012.

Equação 16 - Intensidade média do padrão do Speckle

$$I = I_0 [1 + \mu \cos \Phi]$$

onde I é a distribuição de intensidade do padrão *speckle* recebido no plano da imagem da câmera, I_0 a intensidade das imagens cortadas lateralmente (que podem ser percebidas como o termo dc), μ a amplitude de modulação do padrão *speckle*, e Φ é um ângulo de fase aleatório. Depois que o objeto é deformado, a distribuição de intensidades do padrão *speckle* é alterada ligeiramente para I' , que é descrito pela seguinte equação:

Equação 17 - Intensidade do padrão de Speckle após deformação

$$I' = I_0 [1 + \mu \cos(\Phi + \Delta)]$$

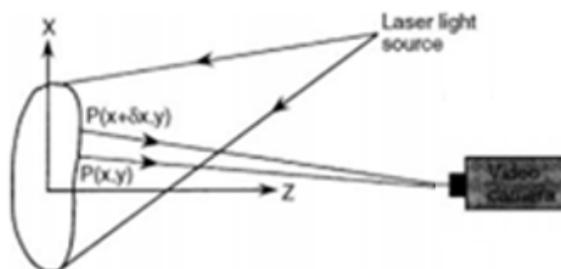
onde Δ denota mudança de fase devido à deformação da superfície. Note-se que ambas equações contêm o ângulo de fase aleatório Φ , portanto, não podemos deduzir informações interpretáveis apenas olhando para as imagens. No entanto, calcular a diferença das intensidades dos dois padrões de *speckle* produz franjas visíveis padrão descrito pela seguinte:

Equação 18 - Diferença da intensidade de dois padrões Speckle

$$I_d = 2I_0[\mu \text{sen}(\Phi + \frac{\Delta}{2}) \text{sen}(\frac{\Delta}{2})] \quad (19)$$

onde I_d é diferença de intensidade pixel a pixel, mostrando a formação de um padrão de franjas que representa a fase de franjas, na qual as franjas escuras correspondem a $D = 2n\Phi$, com $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ sendo a ordens de franjas. E as franjas brilhantes correspondem a ordens de meia franja (Figura 11), mostra um típico padrão de franja interferométrica para uma placa retangular totalmente fixada sob carga lateral uniforme, quando o cisalhamento da imagem é ao longo da direção x , e a (Figura 12) mostra o padrão de franjas correspondente quando o corte de imagem é ao longo da direção y . O valor absoluto de I_d é usado na exibição do padrões de franjas, já que as intensidades da imagem sua sempre positivas, não pode ter valor negativo.

Figura 12 - Mapa de franjas típico

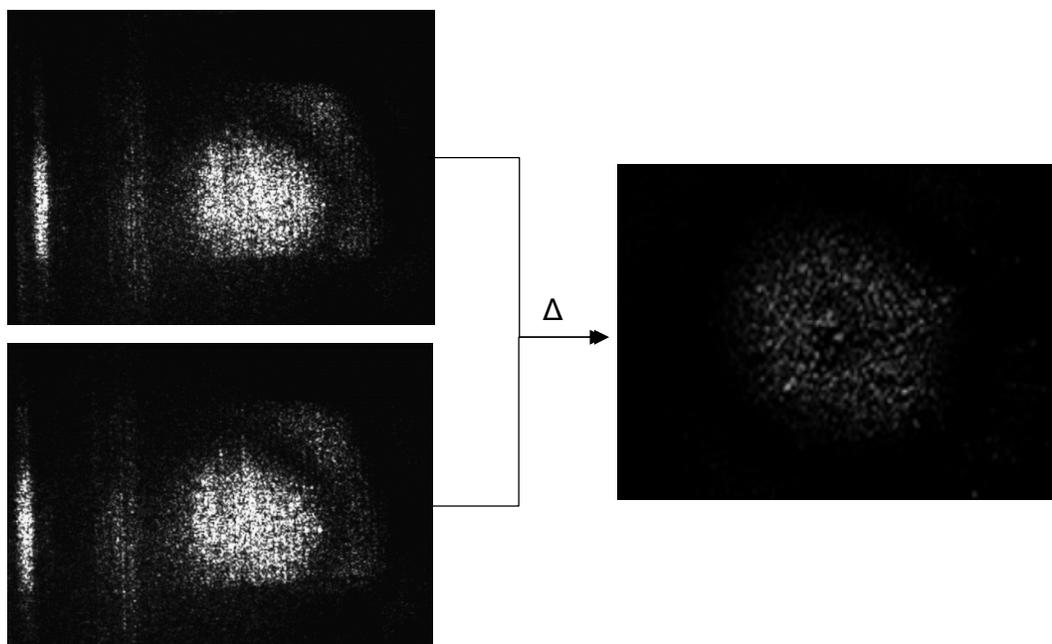


Fonte: Adaptado MONTEIRO, 2012

A técnica DSPI envolve o registo do padrão de *speckle* obtido por interferência entre o campo de *speckle* proveniente da reflexão do objeto, quando iluminado por uma fonte de luz coerente, e um campo de referência uniforme, obtido diretamente da luz coerente. Este padrão de interferência é designado por padrão de interferência primário. A intensidade do padrão de *speckle* resultante é capturada pelo sensor de uma câmara, sendo a imagem obtida transferida para uma placa de processamento de imagem num computador aonde é guardada em memória e

exibida num monitor. Depois do objeto sob estudo ter sido deformado, é registado um segundo padrão de intensidade (imagem com carregamento), o qual é transferido para o computador para depois ser subtraído do padrão previamente guardado, (imagem referência). Após sofrer um tratamento matemático a correlação entre dois registos obtidos para diferentes instantes de carregamento do objeto, a imagem um padrão de franjas de intensidade normalmente designado por padrão de interferência secundário (Figura 13). O interferograma resultante é então exibido no monitor como um padrão de franjas escuras designadas de franjas de correlação.

Figura 13 - Imagem padrão intensidade de franjas



Fonte: O autor, 2019.

Para ângulos iguais de iluminação em relação a normal à superfície, o sistema só apresenta sensibilidade para deformações transversais à superfície do objeto. Assim, e de modo simples, o campo das extensões ou deformações ortogonais ao plano da superfície podem ser determinadas através do cálculo do campo de deslocamentos ocorridos entre dois instantes de carregamento do objeto.

5.5 Vantagens e desvantagens do ensaio por shereografia

De acordo com Miranda (2011), as principais vantagens do ensaio por interferometria são:

- a) Inspeção global (não pontual);
- b) Ausência de contato do equipamento com a superfície a avaliar;
- c) Grande sensibilidade (da ordem de 10 nm);
- d) Rapidez (poucos segundos para o processamento de uma imagem);
- e) Capacidade de operação fora do ambiente laboratorial;
- f) Acesso a apenas um lado da peça;
- g) É insensível à geometria da peça;
- h) Elevado grau de automação;
- i) Acompanhamento da evolução por registro digital e comparação ao longo do tempo;
- j) Possibilidade de avaliação da extensão e severidade de danos/defeitos;
- k) Customização do sistema de acordo com a necessidade.

E as principais desvantagens de ensaiosinterferométricos são:

- a) Assim como a termografia infravermelha, não é uma metodologia de volume (como a são a ultrassonografia e a radiografia), mas sim capaz de detectar apenas defeitos superficiais e subsuperficiais;
- b) A aplicação de um carregamento externo é necessária para que sejam detectados os possíveis danos/defeitos na superfície do material sob inspeção.

5.6 MATERIAIS

- a) Laser modelo 1135P HELIUM-NEON, potência 20mW (UNIPHASE);
- b) Lente (Edmund);
- c) Diafragma Circular Ajustável;
- d) Prisma bipartido;
- e) Câmera fotográfica TCH-5.01CE 5.0MP;
- f) Câmera fotográfica CCD IR XC-E150;
- g) Mesa anti-vibratória (NEW-PORT);
- h) Goniômetro;
- i) Equipamento para compressão por micrômetro;
- j) Amostra de acrílico 40 mm x 40 mm;
- k) Amostra Placa de circuito impresso 70 mm x 30 mm;
- l) Amostra de concreto 51 mm x 30 mm;
- m) *Software* TCapture Imaging Application;
- n) Computador.

6 METODOLOGIA

A metodologia foi desenvolvida para a utilização da técnica por *Speckle* Automatizada / *Digital Speckle Pattern Interferometry* (DSPI), visando determinar o campo de deformações. Para tal, a metodologia foi subdividida em três etapas distintas, replicadas para todas as configurações dos experimentos, onde a primeira, etapa consistiu na realização da pesquisa bibliográfica, a segunda etapa, consistiu nas montagens físicas dos experimentos e das coletas de dados e a terceira etapa, consistiu em realizar uma série de rotinas matemáticas em ambiente computacional através do *software* MATLAB. A metodologia foi aplicada de forma que, a segunda e a terceira etapas foram realizadas em paralelo e testadas em quatro configurações de experimentos diferentes (as configurações foram variadas no intuito de identificar a que apresentaria, os melhores resultados).

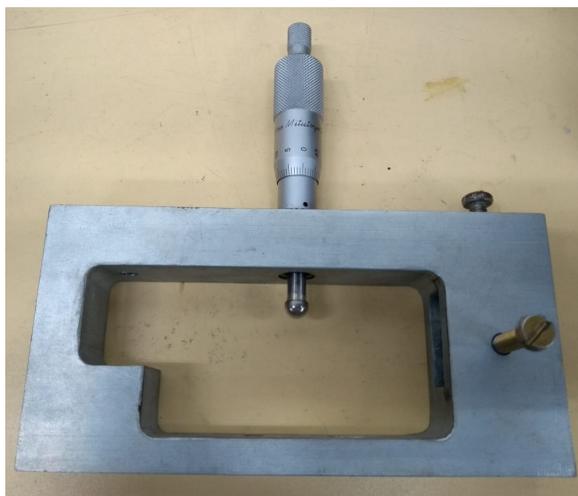
Para maximizar a coleta de dados, os testes foram realizados utilizando-se três amostras diferentes. Os três corpos de provas utilizados foram: um pedaço de acrílico pintado de branco, tornando sua superfície visualmente rugosa (Figura 17), uma amostra de concreto (Figura 16) e um pedaço de uma placa de circuito impresso (Figura 18).

Figura 14 - Goniômetro



Fonte: O autor, 2019.

Figura 15 - Equipamento para compressão por micrômetro



Fonte: O autor, 2019.

Figura 16 - Amostra de concreto (51 mm x 30 mm)



Fonte: O autor, 2019.

Figura 17 - Amostra Acrílico (40 mm x 40mm)



Fonte: O autor, 2019.

Figura 18 - Amostra Placa de circuito impresso (70 mm x 30 mm)



Fonte: O autor, 2019.

Para a realização da primeira e da segunda etapas, foram utilizadas as dependências do Laboratório de Óptica do Instituto de Física da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

6.1 Ambiente computacional

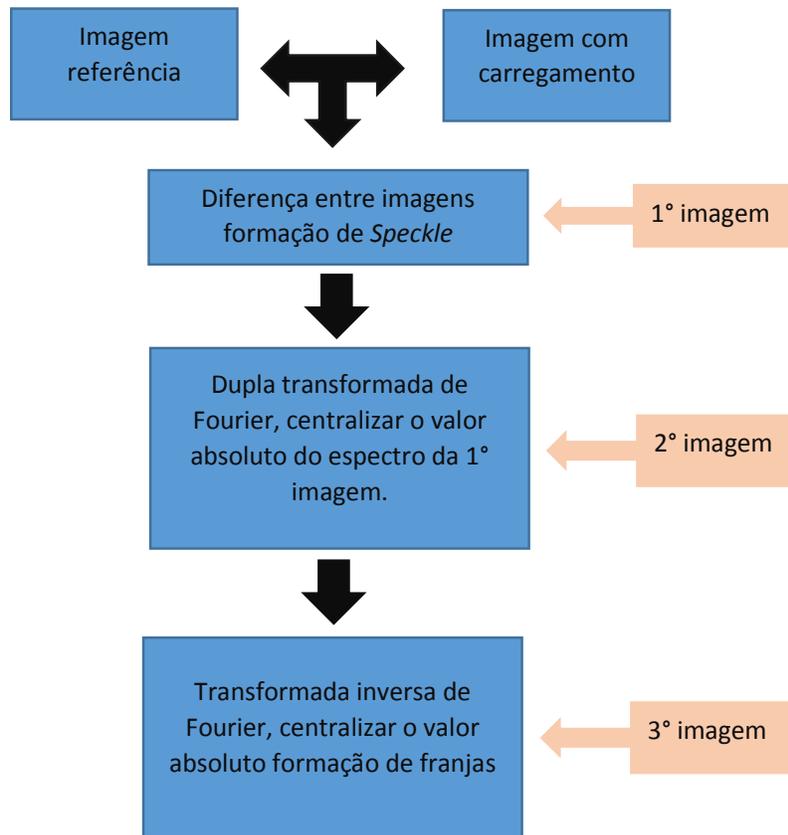
A técnica utilizada, conforme explicada anteriormente, consiste basicamente na correlação digital de duas imagens, adquiridos em dois momentos consecutivos, de *speckle* utilizando a mesma configuração de experimento, obtendo uma imagem referência e uma outra imagem após o carregamento. Estas apresentam dois padrões de granulados diferentes, gerados na superfície das amostras e capturados por uma câmera digital no formato de .jpg ou .tif (o *software* MATLAB permite o emprego dos dois formatos, desde que as comparações entre as imagens, sejam realizadas entre os mesmos formatos) e gravada no computador através do *software* TCapture Imaging Application (TCH-5.0).

O ambiente escolhido para o desenvolvimento computacional da terceira etapa, foi o MATLAB® (MATrixLABoratory), uma vez que este ambiente é otimizado para o cálculo de matrizes. Para realização da terceira etapa foram usadas as dependências do Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (IPRJ-UERJ).

As imagens coletadas, na segunda etapa, foram analisadas no decorrer da terceira etapa, através do algoritmo desenvolvido na ferramenta computacional MATLAB, conforme Figura 19 que seguiu o Fluxograma apresentado a seguir. Os resultados das análises, apresentados neste ambiente, nortearam as modificações

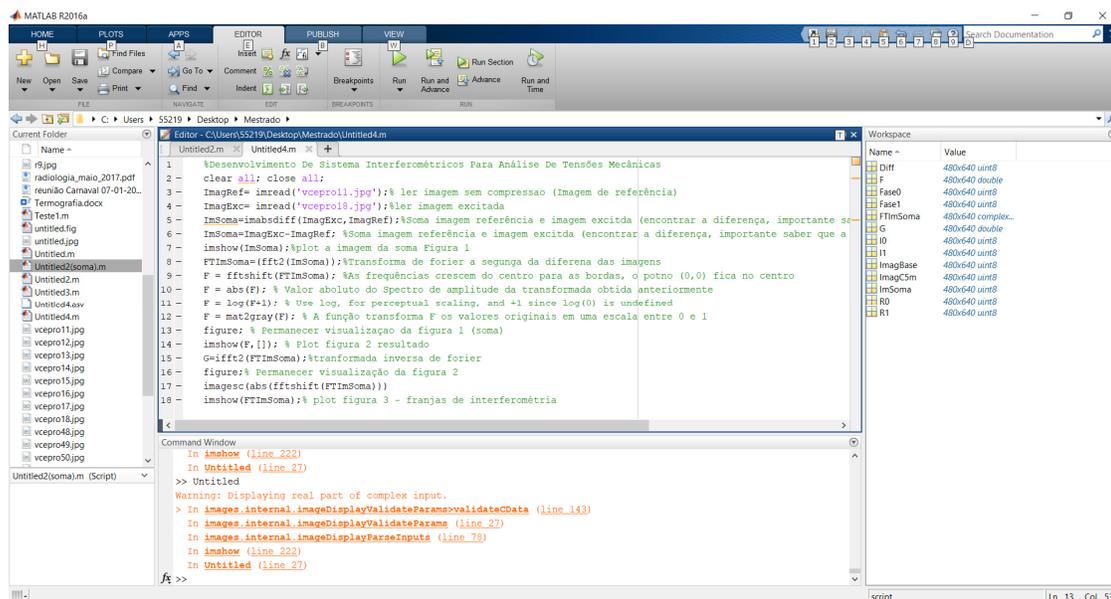
nas configurações das montagens físicas dos experimentos, sempre de forma a preservar a simplicidade e o custo do experimento.

Figura 19 - Fluxograma algoritmo Matlab



Fonte: O autor, 2019.

Figura 20 - Tela MATLAB



Fonte: O autor, 2019.

6.2 Primeira configuração

Conforme, Figura 21, nessa configuração a montagem do experimento foi realizada de maneira em que o feixe de luz coerente produzido pelo Laser (UNIPHASE He-Ne (Hélio-Neônio) modelo 1135P, potência 20mW) (A), incida na lente (Edmund) (B), que possui a finalidade de ampliar o diâmetro do feixe e, pelo Diafragma Circular Ajustável (C). Este diafragma é introduzido no experimento para retirar a imperfeições periféricas do feixe, antes que esse atinja a amostra de acrílico 40 mm x 40 mm (D). A amostra foi instalada em suporte apropriado para aplicar carregamento de compressão, este é aplicado através de micrômetro, onde foi inserida força correspondente a passos de 5 centésimos, sendo variados até 15 centésimos (E). A amostra irá refletir o feixe para o prisma bipartido (F), adaptado a lente da câmera fotográfica TCH-5.01CE 5.0MP (G). Toda a estrutura foi montada sobre a mesa anti-vibratória (NEW PORT);

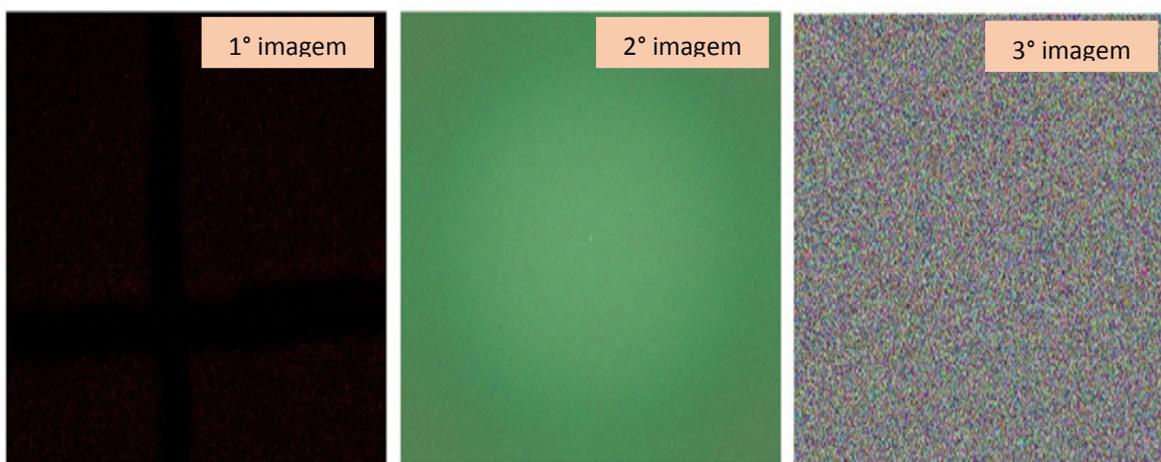
Figura 21 - Montagem configuração 1ª configuração



Fonte: O autor, 2019.

Os resultados apresentados na primeira configuração, foram considerados insatisfatórios, pois não foi possível observar o padrão *speckle* e o efeito das franjas conforme podemos observar na Figura 22.

Figura 22 - Resultado da diferença da primeira configuração



Fonte: O autor, 2019.

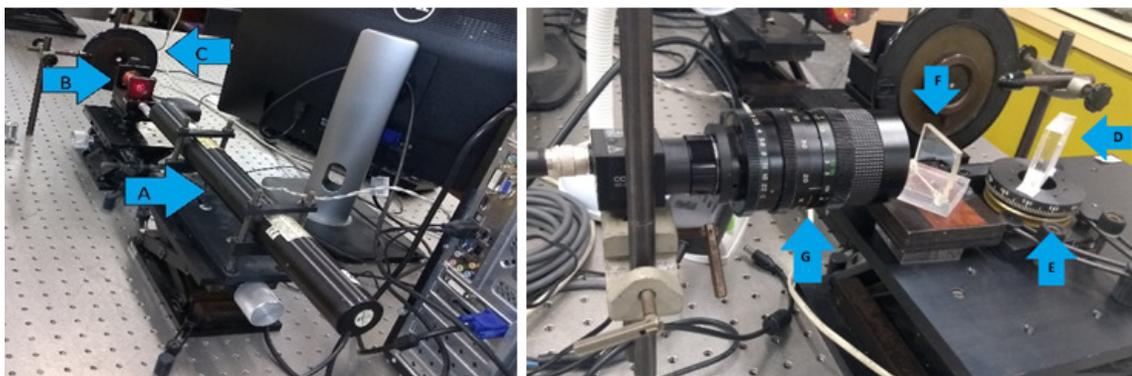
Após análise do desenho do experimento, foi identificado como possível causa do insucesso, o fato da captura de imagem ter ocorrido com padrão RGB (Red, Green, Blue).

6.3 Segunda configuração

Após análise dos resultados apresentados na primeira configuração, que foram considerados insatisfatórios, a princípio pela incorreta captura da imagem, foi identificada a necessidade de desenvolver uma segunda configuração. Assim, modificou-se a captura das imagens, registrando apenas imagens em escalas de cinza. Entretanto, a título de verificação, modificamos o tipo de carregamento aplicado na amostra, de onde retiramos o suporte para carregamento por compressão e acrescentamos um goniômetro, que permitiu a aplicação do “carregamento” angular.

Conforme a Figura 23, a segunda configuração se diferenciou da primeira como descrito, pela substituição do modo de tencionar a amostra (E). A câmera utilizada passou a ser utilizada a CCD IR XC-E150 (G). Esta substituição foi necessária para capturar as imagens de forma mais eficiente, com grade escalonada em cinza. O bi prisma, antes adaptado à lente da câmera, foi posicionado em frente à lente da câmera, mas deslocado da mesma.

Figura 23 - Montagem configuração 2

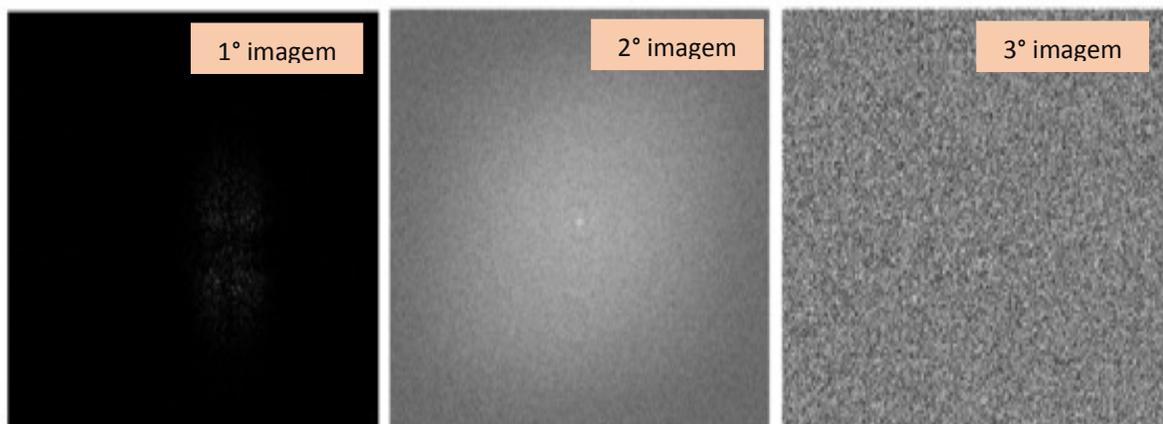


Fonte: O autor, 2019.

Os testes foram realizados com carregamentos aplicados através de goniômetro, posicionador circular, com rotação de arco de 2' ou, inferindo, até 1' (meia divisão), aplicados em três posições distintas. Obtiveram resultados considerados insatisfatórios, pois neles não foi possível observar o efeito das

franjas, mesmo após tratamento da imagem conforme pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 - Resultado da diferença da segunda configuração



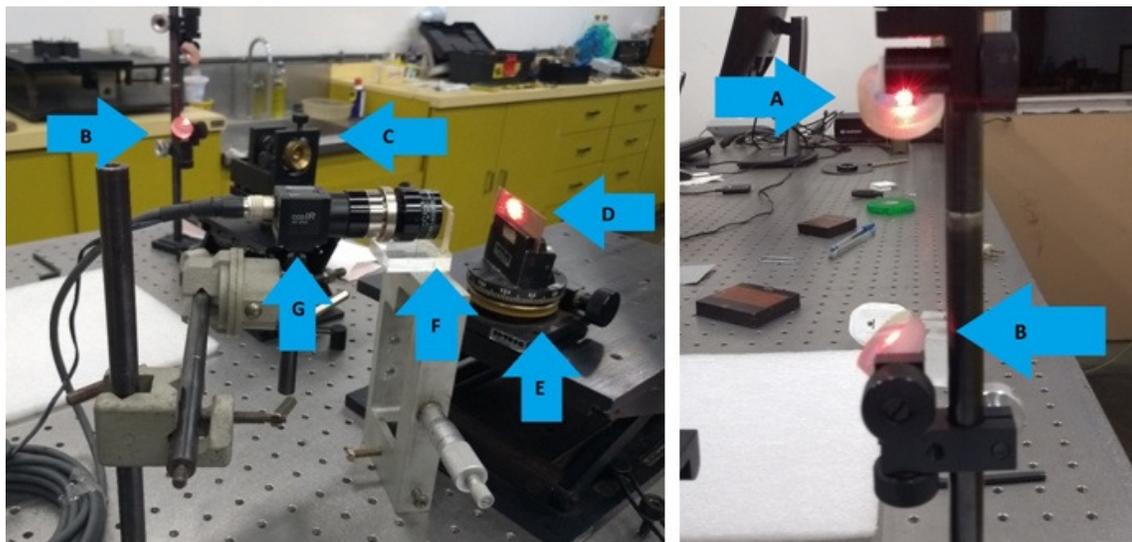
Fonte: O autor, 2019.

Após analisar o procedimento, foram identificados como possível causa do insucesso a intensidade da luz coerente.

6.4 Terceira configuração

Após análise dos resultados, apresentados na primeira e segunda configurações serem considerados, insatisfatórios, foi desenvolvida uma terceira configuração conforme a Figura 25. Nela, em relação a segunda configuração, foram acrescentados dois espelhos (A) e (B) para facilitar a concentração do feixe de luz, tendo por consequência aumentar a sua intensidade. Foi também retirado o diafragma circular e substituído o corpo de prova que sofreu o carregamento. Deixou de ser empregada a amostra de Acrílico e sendo usada a amostra de Circuito Impresso (D).

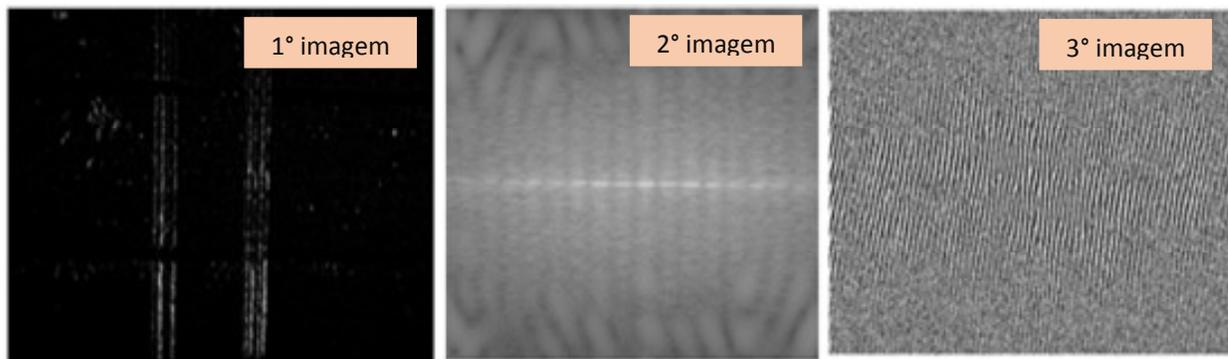
Figura 25 - Montagem configuração 3



Fonte: O autor, 2019.

Assim, como ocorreu na segunda configuração, os carregamentos aplicados na amostra na terceira configuração, foram os angulares, aplicados com o auxílio do goniômetro, posicionador circular, com rotação de arco de $2'$ ou, inferindo até $1'$ (meia divisão), onde foram aplicadas três posições distintas. Os resultados dessa configuração, foram considerados promissores, pois neles foram possíveis observar o efeito de franjas *speckle* (Figura 26), efeitos que até então, não haviam ocorridos nas configurações testadas.

Figura 26 - Resultado da diferença da terceira configuração



Fonte: O autor, 2019.

6.5 Quarta configuração

Após a análise dos resultados, apresentados na terceira configuração serem considerados promissores, buscou-se aprimorar a terceira configuração do experimento, visando simplificá-lo. Assim foram removidos alguns componentes ópticos. Houve também interesse em se verificar, os resultados apresentados, trocando-se o tipo de carregamento aplicado.

Desta forma, chegou-se à quarta configuração conforme a Figura 27, que apresenta como modificações em relação a terceira configuração, a eliminação dos espelhos que facilitam a concentração do feixe de luz coerente. Em contrapartida, diminuimos a distância entre a fonte de luz coerente (A) e a amostra. Quanto à verificação da eficiência do experimento, realizado em outro tipo de material inspecionado, substituímos o corpo de prova testado, deixando de usar, a amostra de circuito impresso, utilizando ao invés, uma amostra de concreto. Dessa forma, em caso de sucesso, poderíamos afirmar que o experimento pode ser executado em um conjunto diverso de materiais. Para facilitar a manipulação do carregamento aplicado na amostra, diversificamos o modelo de carregamento aplicado, abandonando o carregamento angular e adotando o carregamento por compressão. Essa variação foi provocada sem riscos, aos resultados do experimento, pois, a terceira configuração já havia demonstrado resultados promissores com o carregamento angular.

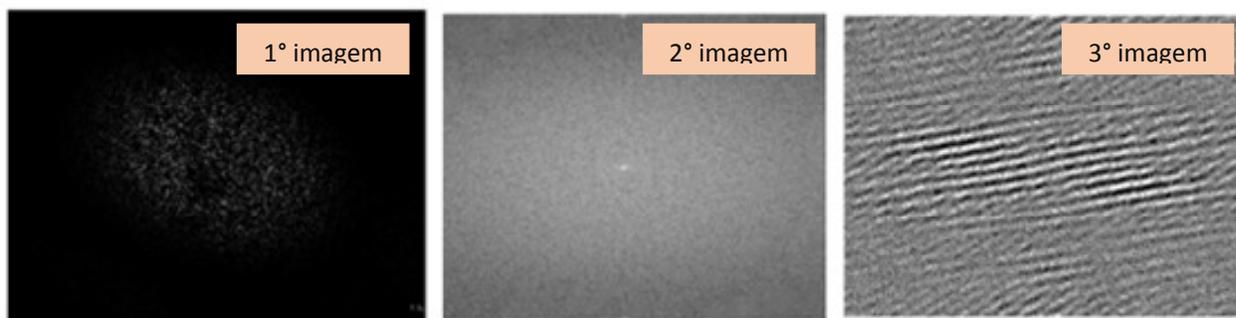
Figura 27 - Montagem configuração 4 – Autor



Fonte: O autor, 2019.

Os resultados considerados mais satisfatórios, foram os obtidos utilizando-se a quarta configuração. Nesses resultados, foi possível observar facilmente, o aparecimento das franjas interferométricas (Figura 28).

Figura 28 - Resultado da diferença da quarta configuração



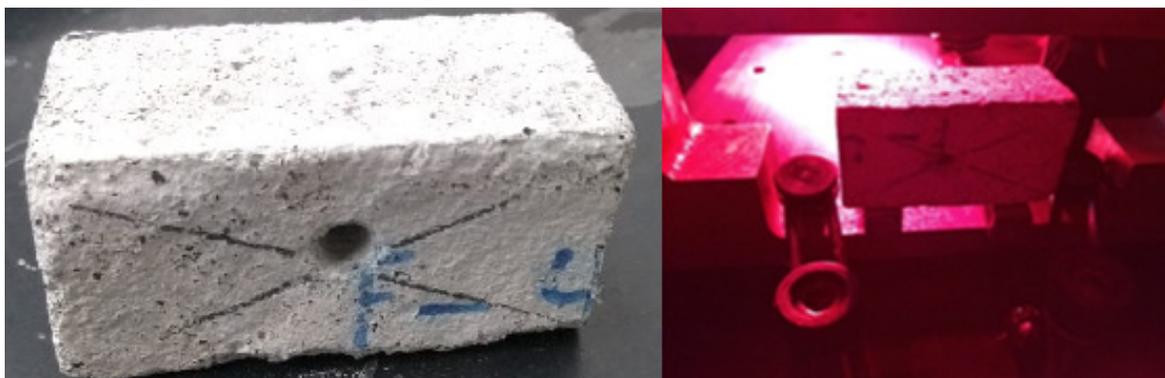
Fonte: O autor, 2019.

Desta forma, embasando-se na análise dos resultados preliminares, constatou-se que a quarta configuração é a ideal, sendo a que melhor atende a proposta desse trabalho, que é a de construir um experimento de fácil montagem e baixo custo, para ser replicado em procedimentos experimentais didáticos na análise de deformações.

6.6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como procedimento, para verificar a eficácia da quarta configuração, desenvolvida neste trabalho, realizamos um teste de comprovação, no qual selecionamos a amostra de concreto, na qual aplicamos o carregamento por compressão. Esse procedimento constituiu em provocar uma descontinuidade/furo circular, na amostra, posicionado no centro da mesma, com diâmetro de 3,4mm (identificou-se o centro, como o ponto de encontro de duas linhas traçadas na diagonal da face do corpo de prova), as profundidades foram variadas de 0 mm (referência), a 2,5 mm, 10 mm, 13 mm, 15,5 mm, na amostra de concreto de dimensões 51 mm, 24 mm e 31 mm.

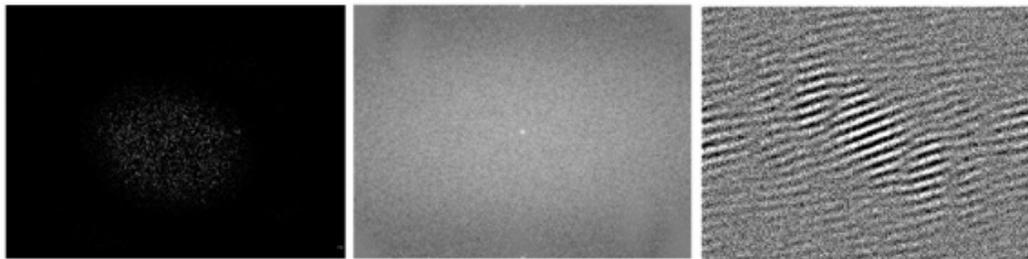
Figura 29 - Amostra de Concreto utilizada no experimento comprovatório



Fonte: O autor, 2019.

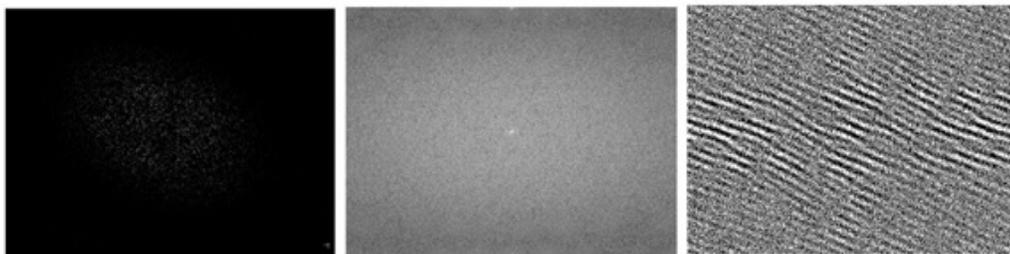
Conforme Figuras 30 à 34, o fenômeno de interferência (primeira imagem da série), resultado da diferença entre a imagem referência e imagem carregada, apresentou progressivo aumento de sua intensidade conforme, provocado aumento da profundidade do furo (descontinuidade provocada), resultado que se apresentou coerente com a formação de franjas (terceira imagem da série), podendo ser percebido visualmente, quando comparamos as franjas, percebemos que as apresentadas na Figura 31 estão mais contínuas que da Figura 30 e assim consecutivamente até a Figura 34.

Figura 30 - Resultado da análise comprobatória - Sem Furo



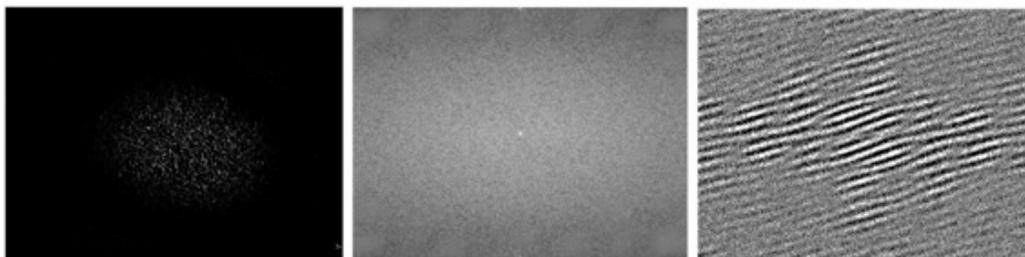
Fonte: O autor, 2019.

Figura 31 - Resultado da análise comprobatória - Profundidade 25 mm



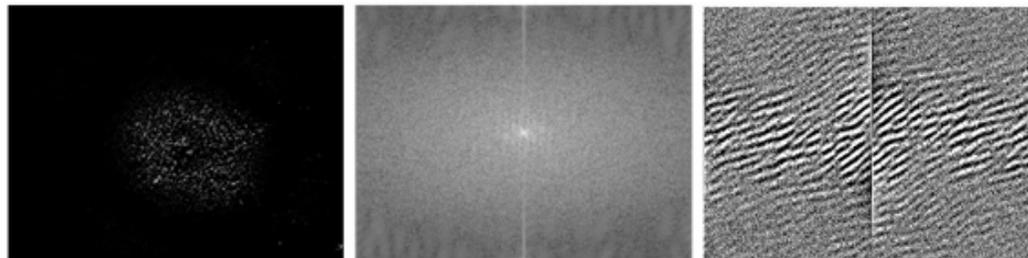
Fonte: O autor, 2019.

Figura 32 - Resultado da análise comprobatória - Profundidade 100 mm



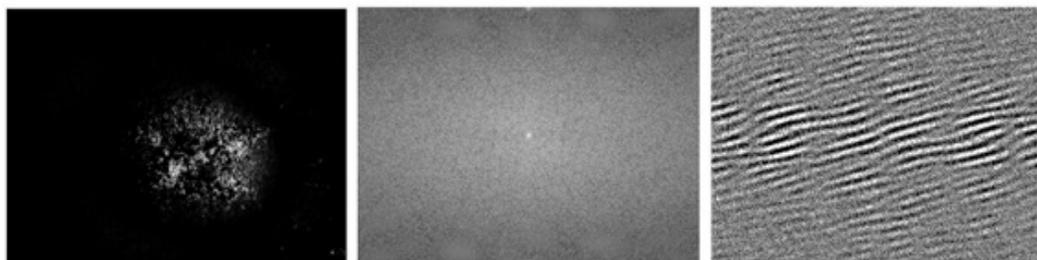
Fonte: O autor, 2019.

Figura 33 - Resultado da análise comprobatória - Profundidade 130 mm



Fonte: O autor, 2019.

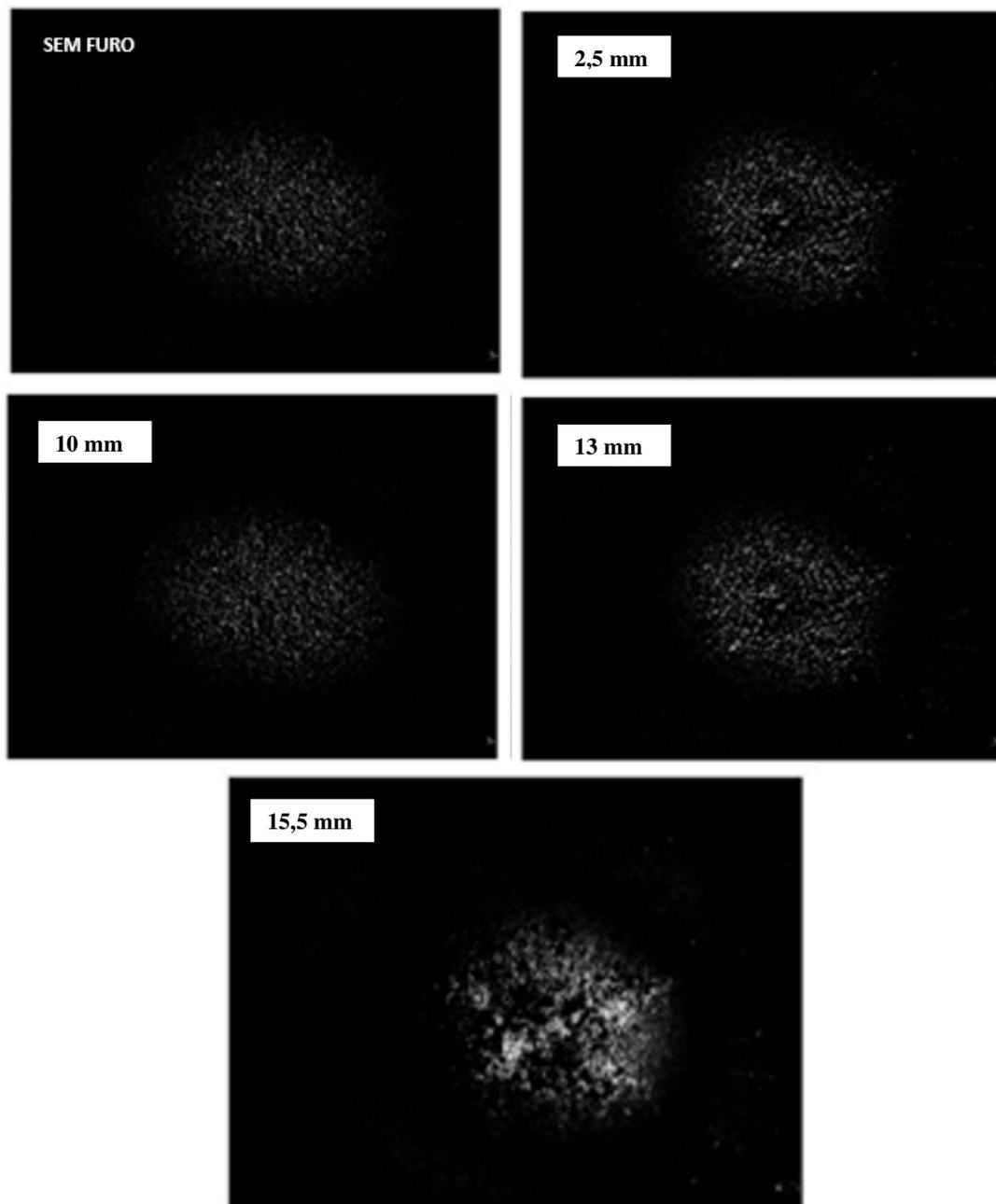
Figura 34 - Resultado da análise comprobatória - Profundidade 155 mm



Fonte: O autor, 2019.

As imagens confirmam, que os resultados apresentados pela quarta configuração do experimento, são satisfatórios, pois demonstram todas as fases do processo interferométrico: o Padrão *Speckle*, a Transformada de Fourier e as Franjas. São resultados esperados para um experimento que utiliza como princípio a técnica de interferometria óptica (*Digital Speckle Pattern Interferometry* (DSPI)).

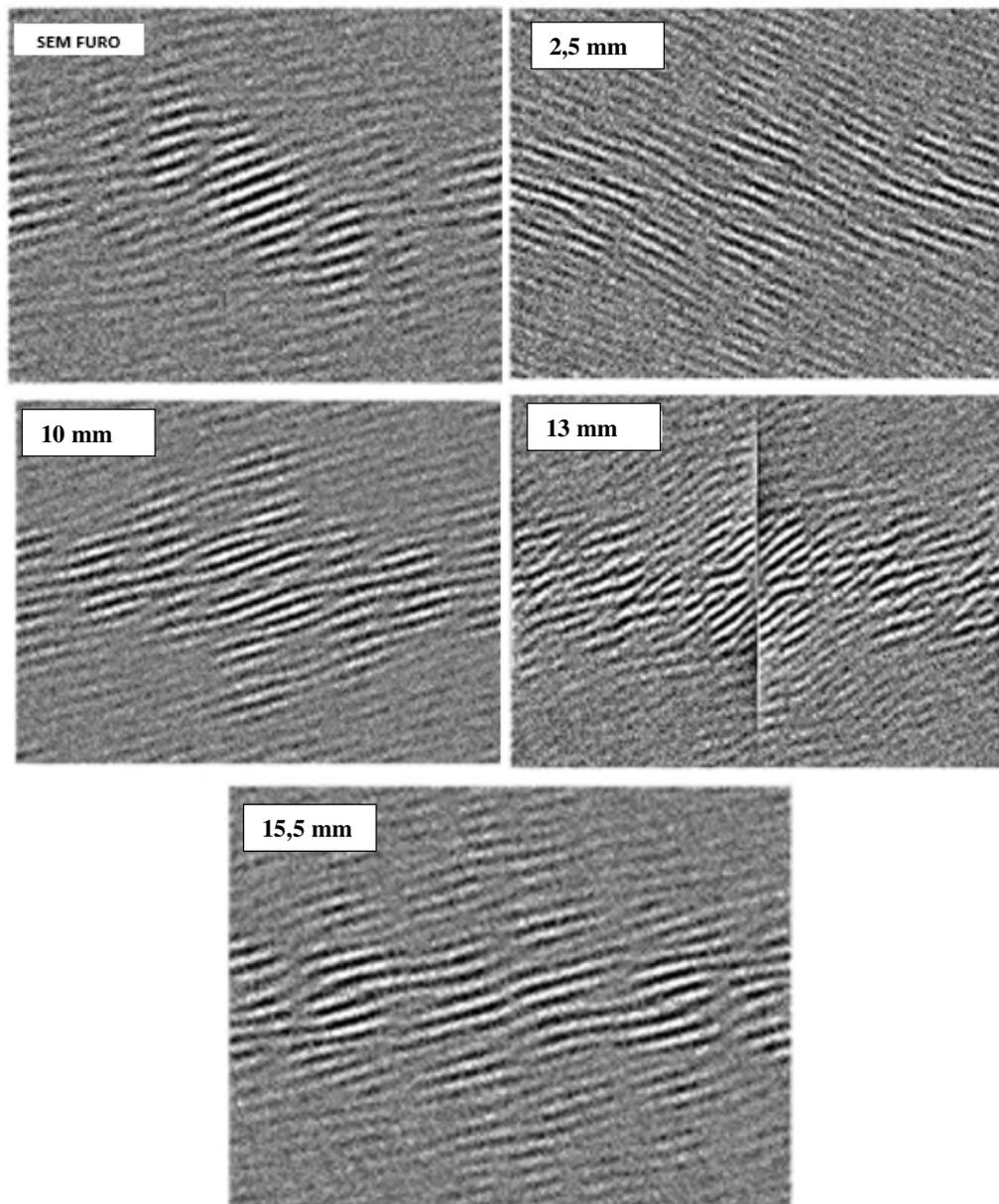
Figura 35 - Resultado da análise comprobatória



Fonte: O autor, 2019.

A dupla exposição, usada em imagens fotográficas, é substituída por uma simples operação de subtração entre as duas imagens distintas.

Figura 36 - Resultado da análise comprobatória - Formação de Franjas



Fonte: O autor, 2019.

CONCLUSÕES

Foram desenvolvidas quatro configurações para Ensaios por interferometria, onde apenas na quarta montagem ficou comprovado que seria possível obter resultados adequados. A dinâmica utilizada manteve como parâmetro o custo para sua montagem.

O método aplicado atende às expectativas iniciais do projeto em desenvolver uma montagem que apresente resultados satisfatórios, podendo ser replicada em laboratórios universitários e ampliar a divulgação da técnica entre futuros profissionais que realizarão END. Além disso, a técnica de ensaio não destrutivo é um campo de trabalho e aplicação, no qual é possível observar descontinuidades provocadas por deslocamentos mecânicos e correlacioná-las à sua gravidade (risco de ruptura).

Também chegamos à conclusão que esta técnica apresenta um grande potencial para redução de custos de inspeção e fabricação, em itens complexos da indústria aeronáutica, na geração eólica, indústria petroquímicas, entre outros.

No entanto ainda não podemos realizar afirmações sobre uma aferição do equipamento, pois ainda é necessário estudar um modelo matemático que leve em conta outros parâmetros do experimento, como: espessura da amostra, controle sensível do carregamento aplicado, distância do laser à amostra.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A interferometria óptica em suas diversas ramificações, vem se mostrando uma técnica de END promissora para serem utilizadas em inspeções, por isso vários trabalhos caminham no sentido de tornar essa técnica mais conhecida.

Como sugestões para desenvolvimento de um novo sistema, foram analisadas as seguintes possibilidades:

- a) Utilizar fibras ópticas, para facilitar o alinhamento dos componentes ópticos e reduzir o número de componentes;
- b) Variar tipos de carregamento;
- c) Variar o material do corpo de prova;
- d) Desenvolver novas aplicações para ensaios por interferometria;
- e) Utilizar o método ESPI e comparar os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

ABNT-NBR 5462,2004

ALMEIDA. T. P. A Metodologia para Processamento Deslocamento de Fase Digital Aplicado à Técnica de SHEAROGRAFIA. (Dissertação de mestrado em Engenharia e Sistema de Automação) Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2016.

ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P. Ciência e Engenharia dos Materiais. 1. ed. [S.l.]: CENGAGE Learning, 2008. 579 p.

FRANCIS. D; TATAM R. P.; GROVES. R. M.; Shearography technology and applications: a review (Artigo 2010) Cranfield University, 2010.

HUNG. Y. Y.; HO. H. P. Shearography: An optical measurement technique and Applications (Artigo Materials Science and Engineering R 49, 2005), Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, 2005.

MIRANDA. M. 2011. Comparação entre Métodos de Inspeção Não-Destrutiva Aplicados a Peças Compósitas Laminadas Sólidas Estruturais Aeronáuticas (Dissertação de mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

MONTEIRO. J. M. 2012. Métodos de Interferometria para Inspeção Não Destrutiva (Dissertação de doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade do Porto, Porto, 2012.

OLIVEIRA, M. A. Sistema de gestão da manutenção baseada no grau de maturidade da organização no âmbito da manutenção. 2017. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. 2017

OLIVEIRA, M. J. Indicação de descontinuidades em materiais metálicos e compósitos: uma comparação entre métodos não destrutivos. 2014. Dissertação (Mestrado Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) PUC, Rio de Janeiro, 2014.

OLIVEIRA, T. M. D.; Análise e Sistemas de Energia e Máquinas Elétricas com recurso a termografia, 2012 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.

PAES. Á. S; Proposta de Procedimento Para Estimativa Do Tamanho de Defeitos Em Tubos De Aço Perfurados e Revestidos Com Materiais Compósitos Utilizando SHEAROGRAFIA (Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

PIRES. G. P.; TAGIAFERRI A. A.; THAUMATURGI.C; Interferometria Óptica Para Ensaio Não Destrutivo, Revista Matérias.

SCHONTAG. J. M. Caracterização da profundidade de defeitos em materiais compósitos utilizando shearografia com carregamento vibracional (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2009.

SILVA. D. M. Interferometria SPECKLE com Lasers de Diodo Multimodo Para Análise de Materiais e Dispositivos (Dissertação de mestrado em Tecnologia Nuclear – Materiais) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2011.

SILVA. E. R.; MURAMATSU. M. O fenômeno do speckle como introdução à metrologia óptica no laboratório didático, 2007; (Artigo Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 2) Universidade de São Paulo, 2007.

TEIXEIRA, G. G. D. Confiabilidade Metrologia em Termografia Aplicada em Sistemas Elétricos, 2012. Dissertação de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

XAVIER, Júlio de Aquino Nascif. Manutenção Função Estratégica. 4.ed. São Paulo: 2015.

ANEXO A - Custos aproximados de componentes

Custos aproximados de componentes

| Componente | Valor aproximados (Real) | Fonte de pesquisa 1° semestre 2019 |
|--|---------------------------------|---|
| Laser modelo 1135P He-Ne, potência 20mW (UNIPHASE) | R\$ 4.700,00 | https://www.photonicshop.co.uk/fe/product_detail.asp?pid=352 |
| Diafragma Circular Ajustável | R\$ 98,00 | https://www.ebay.com/itm/1PC-2-50mm-Adjustable-Iris-Diaphragm-Aperture-Blades-Condenser-Circular-Aperture/262534549062?hash=item3d20474e46:g:pzIAOSwsTxXjtXj |
| Câmera digital TCH-5.01CE | R\$ 5000,00 | https://www.emania.com.br/cameras-fotograficas |
| Câmera digital CCD IR XC-E150 | R\$ 1.140,00 | http://www.ccdworld.com/products/sony-xc-professional-ccd-series-cameras/?gclid=Cj0KCQjwgezoBRDNA RIIsAGzEfe62HOZqGal7kG1FoGmmXu ZXFccRvFaTY555V6ycdskC3S9wrCX8 CbwaAhE5EALw_wcB |
| Biprisma | R\$ 60,00 | https://portuguese.alibaba.com/product-detail/optical-beam-splitter-prism-670320810.htm |
| Software MATLAB | R\$ 208,00 | https://la.mathworks.com/store/link/products/student/new;jsessionid=d6e277cda79ce35d93ddf05310f2?s_iid=htb_buy_gtwy_cta3 |
| Sheaerografo comercial | Aproximadamente US\$ 80.000,00 | Consulta via e-mail Dantec Dynamics |

ANEXO B - Alguns Fabricantes de Equipamento para Ensaio Não Destrutivos

| | ENSAIO | RADIOGRÁFICO | CONVENIONAL | ENSAIO | RADIOGRÁFICO | DIGITAL | TERMOGRAFIA | SHEREOGRAFO | ULTRASSOM |
|---|------------------|--------------|-------------|--------|--------------|---------|-------------|-------------|-----------|
| | | | | | | | | | |
| FABRICANTES DE EQUIPAMENTOS/PRODUTOS | Arotec | | | | | | | | X |
| | Bently do Brasil | X | | | | | | | X |
| | Bruke | | | | | | X | | X |
| | Carestream | X | | X | | | | | |
| | CIA | | | | | | | | X |
| | Diagnostic | | | X | | | | | |
| | END Oliveira | | | | | | | | X |
| | Flir | | | | | | X | | X |
| | GE | X | | X | | | | | X |
| | Helling GmbH | | | | | | X | | X |
| | Isomobil | X | | | | | | | |
| | Inspek | | | | | | | | X |
| | INTER-METRO | | | | | | | | X |
| | Kroma | | | | | | | | X |
| | Kubika | | | | | | | | X |
| | PASA | X | | X | | | X | | X |
| Dantec Dynamics | | | | | | | X | | |

<http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&c=17&s=&friendly=/>
(14/02/2019).

<https://www.dantecdynamics.com/> (14/07/2019).