

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL C
TESE DEFENDIDA POR Edson Hiroshi Saito
..... SAITO E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 16/07/2010

.....
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Edson Hiroshi Saito

**Medição de Tensões em Componentes
Mecânicos utilizando a Técnica ESPI**

Campinas, 2010

102/2010

Edson Hiroshi Saito

Medição de Tensões em Componentes Mecânicos utilizando a Técnica ESPI

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Júnior

Campinas
2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA – BAE – UNICAMP

Sa28m	Saito,Edson Hiroshi Medição de tensões em componentes mecânicos utilizando a técnica ESPI / Edson Hiroshi Saito. -- Campinas, SP: [s.n.], 2010. Orientador: Auteliano Antunes dos Santos Junior. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. 1. Interferometria. 2. Speckle. 3. Laser. 4. Medidores de tensão. I. Santos Junior, Auteliano Antunes dos. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.
-------	--

Título em Inglês: Stress measurement in mechanical components applying the ESPI technique

Palavras-chave em Inglês: Interferometry, Speckle, Laser, Strain gauges

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Paulo Roberto Gardel Kurka, Anderson Paulo de Paiva

Data da defesa: 16/07/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Medição de Tensões em Componentes
Mecânicos utilizando a Técnica ESPI**

Autor: Edson Hiroshi Saito

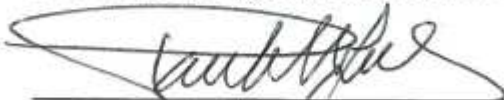
Orientador: Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Junior

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



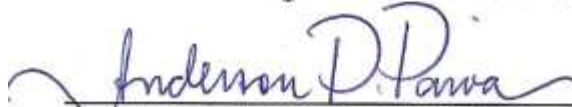
Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Junior

Faculdade de Engenharia Mecânica – Departamento de Projeto Mecânico – UNICAMP



Prof. Dr. Paulo Roberto Gardel Kurka

Faculdade de Engenharia Mecânica – Departamento de Projeto Mecânico – UNICAMP



Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva

UNIFEI – ITAJUBÁ

Campinas, 16 de Julho de 2010.

Dedicatória

À minha mãe, em memória (**Silvanira Machado Saito (1950-2006)**).

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser construído sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

À minha família que, mesmo a distância, me apoiou da pequena e pacata cidade de Assis Chateaubriand.

Aos amigos próximos e aos também distantes.

À minha namorada e companheira pelo incentivo sempre presente.

Ao orientador Prof. Auteliano que sempre acreditou no trabalho.

À ThyssenKrupp Campo Limpo Paulista que suportou o projeto com a estrutura do Laboratório da Garantia de Qualidade.

À equipe do Laboratório da Garantia da Qualidade da ThyssenKrupp Campo Limpo pelo suporte técnico e cedendo o próprio espaço físico.

“É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias, mesmo expondo-se à derrota, do que alinhar-se àqueles pobres de espírito, que nem gozam muito, nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta que não conhece vitória nem derrota.”

Theodore Roosevelt [1858-1919]

“A vida é um trem, suba a bordo”

Trecho de “o Caçador de Pipas”, Khaled Hosseini

Resumo

SAITO, Edson Hiroshi, *Medição de Tensões em Componentes Mecânicos utilizando a Técnica ESPI*, Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2010. Dissertação de Mestrado.

A técnica ESPI, sigla em inglês – *Electronic Speckle Pattern Interferometry* -, ou ainda, Interferometria Eletrônica por Padrão de *Speckle*, surgiu em consequência do desenvolvimento da metrologia a laser, que possui como característica o chamado efeito *speckle*. Este efeito é o fenômeno óptico de interferência de ondas eletromagnéticas coerentes – que é o caso do Laser - que possibilita a geração de padrões de franjas de interferência, a partir das quais é possível medir o deslocamento de superfícies e posteriormente calcular as tensões e deformações.

Por se tratar de uma metodologia não destrutiva e sensível a pequenos deslocamentos, essa metodologia tem se difundido na indústria para medição de Tensões em componentes mecânicos de formas complexas e como aplicação de apoio para outras técnicas como análise por Elementos Finitos.

O objetivo deste trabalho é a aplicação da técnica ESPI em componentes mecânicos fazendo uso de uma metodologia através da qual seja possível estabelecer um procedimento de medição da tensão com confiabilidade. O desafio é estabelecer a adequada aplicação da ferramenta em ambiente industrial, onde há a interferência de ruídos, temperatura, vibração, além de uma adequação de equipamentos de ensaio que pode influenciar diretamente nos resultados de medições. A correta medição das tensões e deformações através de um ensaio não destrutivo e de rápido diagnóstico pode trazer diversos benefícios, dentre os quais as cifras gastas em peças destruídas, tempo de medição e economia de mão-de-obra. Os resultados do presente trabalho são a determinação das variáveis influentes na aplicação do ESPI, levantamento das causas raízes dos problemas de medição e, a partir dessas informações, consolidar um procedimento padrão para aplicação em medição de tensões em componentes utilizando a técnica ESPI.

Palavras chave: ESPI, Deslocamentos, Tensões, Deformações, Efeito *Speckle*

Abstract

SAITO, Edson Hiroshi, *Stress Measurement in Mechanical Components applying the ESPI Technique*. Campinas, SP: Mechanical Engineering, State University of Campinas, 2010. Dissertation of Master Degree.

The ESPI technique – Electronic *Speckle* Pattern Interferometry - has emerged as a result of the development of laser metrology, which is characterized as the so-called *speckle* effect. This effect is an optical phenomenon of coherent electromagnetic waves interference – as Laser. It allows the generation of fringes interference from which it can be measured the displacement of surfaces and therefore calculated the stresses and strains.

As a no-destructive methodology and being sensible to small displacements, it has being spread out in the industry by measuring Stress and Displacements in complex mechanical components and as a support to Finite Elements Analysis (FEA) and others techniques.

The objective of this work is the application of the ESPI technique testing mechanical components making use of a systematic methodology by which it will be able to establish a procedure for measuring stress with reliability. The challenge is to establish the application procedure in the industrial environment, where there are a lot of interferences like noises, temperature variation, vibration etc., besides the fact that the testing equipment to be adapted to static tests can influences in the results. The stress and displacements measurement in a no-destructive test and fast result diagnose can bring a lot of benefits in financial terms serving as a support tool for other testing procedures. The results from this project are the determination of main variables for ESPI application, establishment of root causes in measurements problems using ESPI, and hence consolidate a standard procedure for ESPI application in strain /stress measurement in mechanical components.

Key-Words: ESPI, Displacement, Strain, Stress , *Speckle* effect.

Lista de figuras

Figura 1.1 - Transformação das imagens <i>speckle</i> em informações de deslocamento.....	4
Figura 1.2 - Arranjo de um equipamento ESPI.....	5
Figura 1.3 - Resumo da aplicação ESPI.....	25
Figura 2.1 - Resultante da interferência de duas ondas de mesma frequência.	14
Figura 2.2 - Onda frontal	15
Figura 2.3 -Interferência entre duas ondas.....	17
Figura 2.4 – Difração das ondas de luz e interferência entre as duas ondas após o orifício.....	18
Figura 2.5 - Trajeto da onda com fonte fixa e em movimento.	20
Figura 2.6 -Formação das franjas de Newton.	22
Figura 2.7- Interferência de ondas de luz.....	23
Figura 2.8- Formação das franjas de Moiré. Formação pela oclusão da luz.	25
Figura 2.9 - Geometria das franjas de Moiré.	26
Figura 2.10- Interferômetro genérico.....	28
Figura 2.11 -Interferômetro de Michelson.	31
Figura 2.12- Efeito <i>speckle</i>	32
Figura 2.13 - <i>Speckle</i> objetivo.	33
Figura 2.14- Formação do <i>speckle</i> objetivo	36
Figura 2.15- Formação do <i>speckle</i> subjetivo.	37
Figura 2.16 - Formação do <i>speckle</i> subjetivo	38
Figura 2.17 - Arranjo de Michelson.....	39
Figura 2.18 - Arranjo modificado de Michelson.	40
Figura 2.19 - Padrão de <i>speckle</i>	41
Figura 2.20 - Interferômetro sensível a movimentos fora do plano.....	42
Figura 2.21- Arranjo de interferômetro sensível a deslocamentos 'no plano'.....	43
Figura 2.22- Deslocamento de um segmento de linha de uma superfície de PQ para P'Q'.	44
Figura 2.23- Configuração básica de um sistema ESPI.....	48
Figura 2.24- Fenômeno do aliasing: sobreposição de ondas;	53
Figura 2.25 - Desenho esquemático de um ESPI.....	55
Figura 3.1 – Mesa de Carga Shenk®	61
Figura 3.2- Dantec 3D ESPI – Q300	62
Figura 3.7 - Interferometria: correlação entre deslocamento de fase e intensidade do <i>speckle</i>	63
Figura 3.8 –Setup do sistema ESPI.....	64
Figura 3.9 - –Influência da deformação e formação das Franjas.	65
Figura 3.10 - Algoritmo de deslocamento de fases.....	65
Figura 3.11– Procedimento de desdobramento.....	66
Figura 3.12– Procedimento de desdobramento de fases:.....	67
Figura 3.13 – Resultado do algoritmo: mapa de fases contínuo.	67
Figura 3.14– Geometria out-of-plane.	68
Figura 3.15– Geometria in-plane.	68
Figura 3.16– Configuração para medições das componentes das três dimensões.....	69
Figura 3.17– Dimensões da placa plana com orifício.....	71
Figura 4.1 - – Diagrama <i>brainstorming</i>	74
Figura 4.2 – Variável “Calibração do Piezo fora”	76

Figura 4.3 - Variável “Área mal dimensionada”	76
Figura 4.4 - Variável “Bordas mal dimensionadas”	77
Figura 4.5 - Conhecimento do histórico da peça.	77
Figura 4.6 – Variável “Vibrações externas”	78
Figura 4.7 – Variável “Falta de exatidão da carga”	79
Figura 4.8 - Diagrama de análise de causas raízes para suporte mal fixado.....	79
Figura 4.9 - Descorrelação de franjas	80
Figura 4.10 – Variável “Suavização”	80
Figura 4.11 – Variável “Carga inadequada”	81
Figura 5.1 - Mapa de deslocamentos na direção x e direção y	88
Figura 5.2 - Campo de tensões equivalentes de Von Mises	88
Figura 5.3 - Placa com orifício central.....	89
Figura 5.4 - Detalhe da borda	90
Figura 5.5 - Detalhe da formação de franjas	91
Figura 5.6 - Mapa de deslocamentos do eixo X.....	92
Figura 5.7 - Descorrelação e ruídos no mapa de deslocamentos do eixo Y.	92
Figura 5.8 - Tensões equivalentes de Von Mises.	93
Figura 5.9 – Melhor nível para item Distância:2.	95
Figura 5.10 – Melhor nível para item Suavização:2.	95
Figura 5.11 – Melhor nível para item Método:3.....	96
Figura 5.12 – Melhor nível para item Ponto Inicial:1.....	96
Figura 5.13 - Mapa de deformação do eixo Y.	98
Figura 5.14 - Mapa de deformação do eixo X	98
Figura 5.15 - Mapa de tensões de Von Mises.....	99
Figura 5.16 –Mapa de deformação do eixo X.....	100
Figura 5.17 –Mapa de deformação do eixo Y.....	100
Figura 5.18 - O plano de tensões equivalente Von Mises.....	101
Figura 5.19 – Mapa de fases contínuo.	102
Figura 5.20 - Mapa de formação dos padrões de franjas com o detalhe da borda.....	102
Figura 5.21 - Mapa de Tensões Equivalentes.	103
Figura 5.22 – Tensões equivalentes de Von Mises.....	104
Figura 5.23 – Ensaio 5	105
Figura 5.24 - Ensaio de compressão	106
Figura 5.25 – Dupla suavização.....	107
Figura 5.26 - Ensaio de compressão	108
Figura A.1 - 1D fora-do-plano sem sensor de iluminação	129
Figura A.2 – 1D fora-do-plano com sensor de iluminação.	113
Figura A.3- 1D plano.	113
Figura A.4- 2D/3D.	113

Lista de Tabelas

Tabela 2-1 - Determinação de fases módulo 2π	57
Tabela 3-1– Composição química aço SAE 1045	70
Tabela 3-2 – Propriedades mecânicas aço SAE 1045.....	70
Tabela 4-1 – Variáveis são classificadas em Influentes (I) e não influentes (NI)	75
Tabela 4-2 – Variáveis de Influência e Fontes de Variabilidade	82
Tabela 4-3 – Itens considerados não influentes.	83
Tabela 4-4– Layout completo.	85
Tabela 5-1 – Valores resultantes do ensaio.....	94
Tabela 5-2 – Valores ideais para o ensaio da placa com orifício.....	97
Tabela 6.1 – Variáveis e respectivas dificuldades.	110
Tabela 6.2 – Variáveis, Dificuldades e Sugestões.	111

Nomenclatura

ANOVA – Analysis of Variance

ESPI – Electronic Speckle Pattern Interferometry

PLD – Path Length Difference

DOE – Design of Experiments

CCD – Charged Coupled Device.

RPD – Robust Parameter Design

SN – Signal Noise

FEA – Finite Element Analysis

SUMÁRIO

Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de figuras.....	ix
Lista de Tabelas	xi
Nomenclatura	xii
SUMÁRIO	xiii
1 Introdução	1
1.1 <i>Electronic Speckle Pattern Interferometry</i> – ESPI.....	3
1.2 Princípios	4
1.2.1 Informações 3D.....	5
1.2.2 Tensões / Deformações	6
1.2.3 Aplicações	6
2 Revisão da Literatura	8
2.1 Fundamentos da Interferometria.....	9
2.1.1 Natureza e comportamento da luz	9
2.1.2 Laser	11
2.1.3 Vibração e ondas	12
2.1.4 Interferência colinear	13
2.1.5 Difração da Luz	18
2.1.6 Efeito Doppler Óptico	19
2.1.7 Interferometria clássica.....	21
2.1.8 Fenômeno de Moiré.....	25
2.2 Interferômetros	27
2.2.1 Interferômetro genérico	27
2.2.2 Interferômetro de Michelson.	30
2.2.3 Efeito Speckle.....	32
2.2.3.1 Speckle objetivo.....	33
2.2.3.2 Speckle subjetivo	36
2.3 Speckle Pattern Correlation Interferometry.....	39
2.3.1 Correlação de franjas	41
2.3.2 Arranjos para correlação de franjas	42
2.3.3 Descrição de pequenos Deslocamentos	43
2.3.4 Medição de Deslocamentos através de Interferogramas	45
2.4 Electronic Speckle Pattern Correlation Interferometry (ESPI)	47
2.4.1 O sistema de vídeo.....	48
2.4.2 Formação de franjas por subtração de sinal de vídeo.....	49
2.4.3 Formação de franjas por adição de sinal de vídeo.....	51
2.4.4 Resolução espacial do sistema de vídeo.	52
2.5 Interferometria com Mudança de Fase	54

2.5.1	Técnica dos três passos.....	55
2.5.2	Desdobramento de Fases	57
2.5.3	Conversão: Mudança de Fase x Deslocamento	58
3	Desenvolvimento	59
3.1	Mesa de Carga	60
3.2	3D ESPI.....	62
3.3	Características da Peça	69
3.3.1	Propriedades dos materiais	70
3.3.2	Geometria do Corpo de Prova.....	71
4	Abordagem Experimental	72
4.1	Definição das Variáveis de Influência e Fontes de Variabilidade.....	73
4.2	Planejamento Experimental.....	83
5	Aplicações e Resultados	87
5.1	Simulação	88
5.2	Aplicações em Placa com orifício	89
5.2.1	Ensaio 01.....	98
5.2.2	Ensaio 02.....	100
5.2.3	Ensaio 03.....	102
5.2.4	Ensaio 04.....	104
5.2.5	Ensaio 05.....	105
5.2.6	Ensaio 06.....	106
5.2.7	Ensaio 07.....	107
5.2.8	Ensaio 08.....	108
6	CONCLUSÃO	109
6.1	Dificuldades.....	110
6.2	Sugestões	111
	Apêndice A	112
	Referências Bibliográficas	114

1 Introdução

A medição de tensões é utilizada na indústria para acompanhamento da qualidade de estruturas, peças e componentes mecânicos, em especial em peças de alta complexidade. A correta medição das tensões de componentes mecânicos é um processo de suma importância no que tange o correto gerenciamento e análise de riscos, construção e montagem que garanta a qualidade de produtos em linha de produção. A determinação das tensões de peças analiticamente é muito difícil por exigir o conhecimento de toda história de carregamento do espécime. Esta informação raramente é conhecida com o rigor necessário. Métodos destrutivos que inutilizam a peça fabricada, métodos caros, de longa duração e difícil aplicação estão entre os mais utilizados como ensaios de fadiga.

A análise em componentes mecânicos complexos tem se difundido principalmente no ramo computacional com as análises por Elementos Finitos e o poder de processamento avançando em velocidades exponenciais. No entanto, essas análises são testes que demandam corpo técnico altamente preparado e com formação de alto nível. Além disso, não se trata de uma aplicação prática das cargas de trabalho e condições de trabalho. Neste âmbito, as aplicações práticas vêm aos poucos cobrindo a lacuna da necessidade de uma metodologia de suporte aos métodos computacionais com diagnóstico mais rápido e menos oneroso. Uma dessas técnicas é a técnica ESPI que utiliza fenômenos da luz Laser coerente para gerar medições de deslocamento na superfície de componentes mecânicos e conseqüentemente, cálculo das tensões na peça.

O presente trabalho busca identificar as variáveis influentes para realização dos testes utilizando a técnica ESPI explorando primeiramente a literatura disponível, estudando o equipamento utilizado para o experimento evidenciando as possibilidades e limitações. As fontes de literatura são diversas por ser uma técnica de medição óptica, aplicação de cargas e medição dos deslocamentos e deformações, cálculo das tensões equivalente de Von Mises, projeto mecânico do sistema de fixação dos corpos de provas e por fim, o design do experimento. Antes porém, é necessário identificar as variáveis influentes e fontes de variabilidade de forma estruturada. O caminho adotado foi a partir de resultados teóricos e simulações, tentar reproduzir os mesmos resultados de modo a identificar o que influencia negativamente os resultados e aplicando uma metodologia de resolução de problemas utilizando ferramentas seis sigma para identificação de causas raízes – lembrando que tratou-se a identificar as causas raízes de problemas de medição para identificar as fontes de variabilidade. O ponto de partida foi o estudo do equipamento e as variáveis inerentes à interface computacional disponível e respectivos níveis de variação. Através de ferramentas citadas anteriormente (*brainstorming*, *diagrama Ishikawa*) as causas raízes para fontes de variabilidade foram identificadas. As variáveis de influência e Fontes de variabilidade passaram por uma classificação de acordo com a relevância e/ou limitação do método. A partir de então, tem-se em mãos as Variáveis de influência e Fontes de Variabilidades e respectivos níveis sendo possível executar os ensaios DOE e posteriormente aplicar a análise através da metodologia Taguchi: as variáveis resposta são de aproximação a um valor referência já que o valor buscado é o resultado simulado em *software*. Portanto, qualitativamente analisa-se os mapas de distribuição de tensões e quantitativamente os valores das tensões equivalentes de Von Mises. Os valores de tensões mais próximos evidenciam a melhor combinação das variáveis e respectivos níveis estabelecendo a padronização do teste aplicando a técnica ESPI.

Uma breve descrição dos sistemas ESPI faz-se necessário antes de se iniciar a revisão bibliográfica que busca explorar as teorias e estudos base dos sistemas ópticos de medição, em especial o foco do presente trabalho, os sistemas ESPI.

Após completa descrição dos fenômenos de medição óptica através da revisão bibliográfica no capítulo 2, no capítulo 3 é apresentado o sistema de aplicação de cargas, corpos de prova modelados de modo a facilitar a visualização dos deslocamentos e conseqüentemente das tensões.

O capítulo 4 mostra a abordagem estruturada para levantamento das variáveis de influência e fontes de variabilidade estruturando o planejamento experimental caracterizando a principal

ferramenta do trabalho. Em seguida, o capítulo 5 traz os resultados da aplicação dos testes planejados no capítulo 4 identificando os melhores resultados e respectivos níveis das variáveis de influência evidenciando a melhor combinação na aplicação da técnica.

Por fim, o último capítulo encerra o trabalho trazendo as dificuldades, oportunidades, discussões e proposta para melhorias em posteriores trabalhos no mesmo campo de atuação.

1.1 *Electronic Speckle Pattern Interferometry* – ESPI

Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), ou Interferometria Eletrônica por Padrões de *Speckle*, segundo Cloud,G. (1998), é uma técnica que permite medições interferométricas de deslocamentos de diversos tipos de superfícies e materiais. A medição através do não-contato utilizando uma combinação de feixes de Laser permite o cálculo da distribuição tri-dimensional dos deslocamentos e tensão/deformação do objeto sob ensaios de solicitações mecânicas ou térmicas. Essa técnica tem se difundido em diversos campos de pesquisa incluindo automotivo, aeroespacial, eletrônica, propriedades dos materiais, fraturas mecânicas, testes de fadiga etc. Algumas das vantagens dessa ferramenta de medição (Ettemeyer,A, 1996):

- A técnica não tem contato com a peça e disponibiliza um campo de informação completo da superfície em quase todos os materiais.
- O contorno e deslocamento do objeto são medidos enquanto tensão e deformação são calculadas a partir dos mapas de deslocamentos;
- Todas as três componentes de deslocamento e contorno podem ser medidas utilizando um único equipamento compacto;
- Testes de carregamentos estáticos (tração) além de testes dinâmicos (vibração) podem ser feitos;
- Equipamentos com câmera de alta resolução permitem resolução de ordem abaixo de micrometros;
- Os resultados são similares aos resultados de simulações por Elementos Finitos;

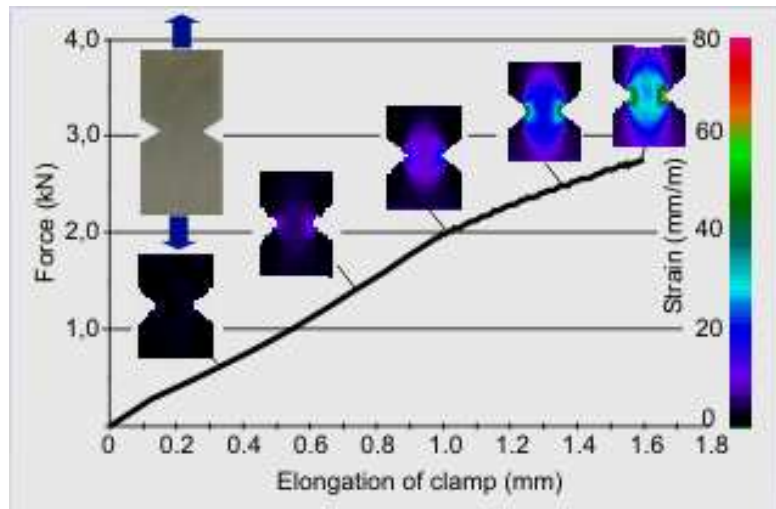


Figura 1.1 - Transformação das imagens *speckle* em informações de deslocamento e posteriormente cálculo das tensões. (Dantec Dynamics GmbH)

1.2 Princípios

A iluminação de uma superfície rugosa com um feixe de laser coerente e fazendo-se a aquisição desta imagem com uma câmera CCD – *charge coupled device*, câmera com circuito integrado de melhor resolução - geram padrões de interferência (aspecto de grânulos), os chamados *speckle*. Esses grânulos são a descrição das características físicas da superfície analisada. Utilizando outro feixe de Laser como referência o qual parte da mesma fonte de Laser, e sobrepondo as duas imagens contrastadas, é gerada outra imagem da combinação de contrastes denominada Interferograma.

Segundo Butters, J. N. e Leendertz, J. A (1971) em seus estudos preliminares a respeito da formação de franjas a partir da interferência de ondas de luz, quando a peça, cuja superfície está sendo analisada, é submetida a um carregamento, a superfície conseqüentemente se deforma alterando também a interferência das ondas. Comparando o interferograma antes e depois do carregamento obtém-se o chamado Padrão de Franjas, a partir das quais se pode analisar o deslocamento da superfície durante o carregamento no formato de linhas de contorno de deformação.

Essas imagens de franjas são a princípio qualitativas e de baixo contraste além de conter ruídos devido à presença dos contrastes – *speckles*. Um procedimento denominado Troca de Fases explorado e aplicado por Ettemeyer, A. (1996) – *Fase Shifting* – utiliza uma série de

imagens de cada estado da superfície e calcula um mapa de fases qualitativo. Ao contrário das imagens de franjas, esse mapa de fases além de conter informações qualitativas, traz informações direcionais que podem diretamente serem transformadas em valores de deslocamentos através de iterações de cálculos de equações que relacionam o contraste / intensidade aos pontos de deslocamento.

A partir desses resultados, um algoritmo mapeia o campo de atuação do carregamento trazendo informações visuais dos pontos e respectivas concentrações de esforços, tensões residuais etc.(Jones & Wykes,1989; Cloud,G 1998) como ilustrado na figura 1.2.

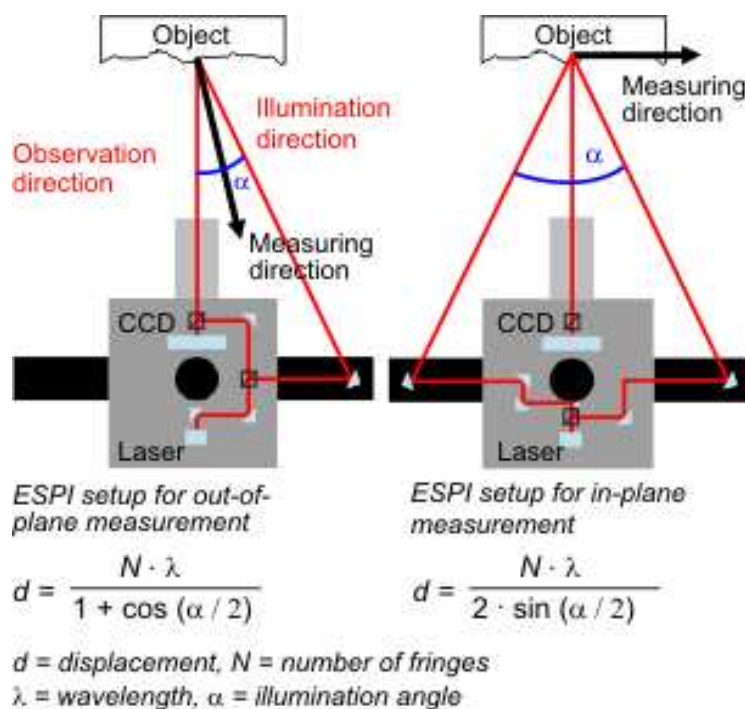


Figura 1.2 - Arranjo de um equipamento ESPI: Setup para medições Fora-do-Plano e medições no Plano.

1.2.1 Informações 3D

Para que se possam medir todos os deslocamentos nas três direções, as medições devem ser feitas nas três direções, x, y e z. A componente z é calculada através da configuração Fora-do-Plano enquanto as componentes x e y no arranjo Plano, Figura 1.2. Equipamentos dotados de sensores integram um arranjo através do qual é possível realizar tais medições em alguns milissegundos (Cloud,G, 1998).

Para testes estáticos, os três deslocamentos são medidos em série. Em aplicações dinâmicas, entretanto, a aquisição das componentes é feito em paralelo. Essas denominações fazem parte do *setup* e procedimento do software para se obter as informações necessárias para a iteração e cálculo dos mapas de tensão / deformação.

A resolução do deslocamento é proporcional ao comprimento de onda do Laser utilizado e a geometria do arranjo. Valores típicos estão abaixo de $\lambda < 1\mu\text{m}$.

1.2.2 Tensões / Deformações

A deformação do objeto devido aos carregamentos mecânicos ou térmicos é calculada a partir do campo de deslocamento tri-dimensional. Portanto, no caso de objetos não planos o contorno também é medido. Tendo em mãos informações do material, as componentes de tensão correspondentes à região elástica linear são calculadas a partir das componentes de deformação.

1.2.3 Aplicações

Ao contrário dos métodos convencionais, como *strain gauges*, os sistemas ESPI permitem o ensaio de análise de componentes mecânicos de formato mais complexo já que não há contato com a peça. A única premissa é que se tenha um bom campo visual da superfície analisada.

Os ensaios podem ser tanto de um único carregamento quanto uma seqüência de carregamentos, e conseqüentemente, uma seqüência de medidas que mostram a evolução do comportamento em termos de tensão / deformação durante os carregamentos.

A metodologia para aplicação das cargas, aquisição das imagens de franjas e cálculo das deformações e tensões que se resumem a aplicação ESPI seguem na figura 1.3. A primeira etapa é aquisição de uma imagem de referência. Uma carga conhecida deve ser aplicada resultando na formação de franjas de interferência. A partir dessa imagem, o sistema calcula um Mapa de fases, onde são inseridas mudanças de fases proporcionais a 2π . Em seguida, há uma varredura na imagem resultando um mapa de franjas. Com as informações anteriores, é possível identificar os deslocamentos da superfície, gerando o mapa de deslocamentos e conseqüentemente gerar um mapa de deformação. Finalmente, as tensões são calculadas a partir do gráfico de deslocamentos, resultando no mapa de Tensões.

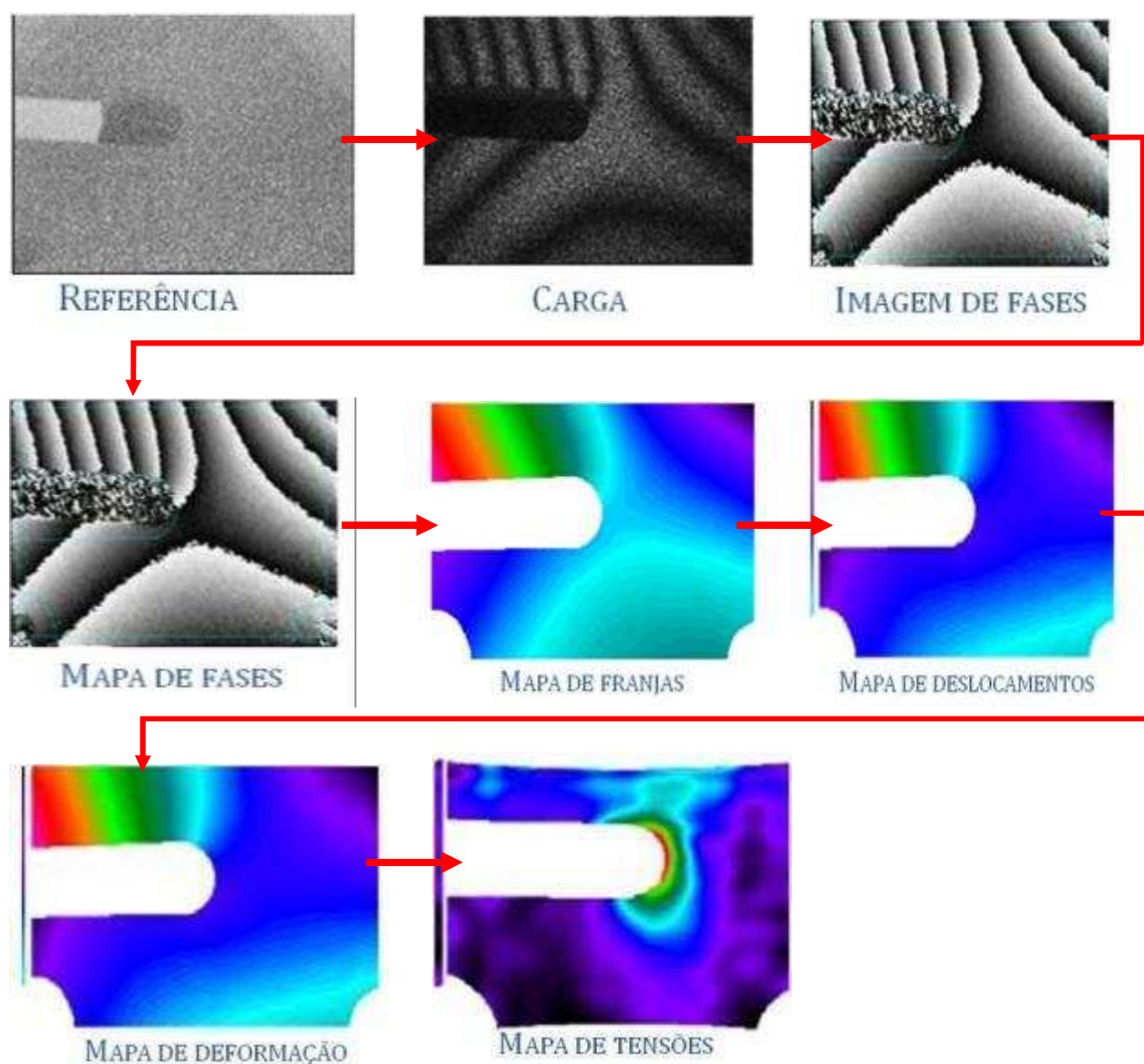


Figura 1.3 – Resumo da aplicação ESPI: formação de franjas, aquisição de imagens e calculo do mapa de tensões.

2 Revisão da Literatura

Segundo explora Cloud, G. (1998) os princípios da técnica ESPI remontam a técnica holográfica, princípio segundo o qual uma onda frontal pode ser gravada e reconstruída posteriormente na ausência da primeira através de hologramas. No entanto, a Holografia se tornou prática somente com o advento de uma fonte de luz coerente e monocromática: o Laser. Este possui um efeito chamado efeito *speckle* que é uma interferência randômica observada na luz que reflete de superfícies opticamente rugosas, ou seja, caso a rugosidade saliente seja maior que o comprimento de onda da luz incidente. A partir de então foi explorada a técnica de Interferometria Holográfica e aplicada a medições de deslocamentos superficiais. Entretanto, o método de interferometria Holográfica possuía alguns problemas inerentes que impulsionaram o desenvolvimento da técnica da Interferometria de Correlação por Padrões de *Speckle* (grânulos), que tem como característica a gravação fotográfica dos padrões de franjas. Leendertz J.(1970) em seus estudo sobre o efeito *speckle* ressalta que a posição do plano de gravação das franjas determina a relação entre o movimento dos padrões de *speckle* e o movimento do objeto, sendo fonte de erros. Erros de interpretação das franjas aumentam quando o plano fotográfico é posicionado incorretamente e quando o foco varia através do campo de visão.

Com a utilização dos computadores, foi possível o surgimento do sistema ESPI, ou seja, um sistema de armazenamento de imagens eletrônico que evita os erros de posicionamento.

Ainda segundo Cloud, G. (1998), a técnica ESPI utiliza a gravação digital de imagens gerando padrões de franjas evitando erros de posicionamento. Isto, aliado a alta sensibilidade, não-contato com a peça, não destruição do espécime de teste e portabilidade, fez deste método uma ferramenta poderosa para análise de tensões em ensaios estáticos de componentes de geometria complexa ou de dimensões onde seria impossível fixar um extensômetro como em componentes eletrônicos.

2.1 Fundamentos da Interferometria

A formação de franjas é o resultado de combinações de padrões gerados por ondas de luz. Portanto, para se entender sua formação, deve-se primeiro entender o comportamento e características da fonte luminosa desse fenômeno: a Luz, e neste caso, a fonte utilizada, o LASER.

2.1.1 Natureza e comportamento da luz

A natureza fundamental da luz é aparentemente indefinida, embora muitos experimentos sejam feitos utilizando essa forma de energia há algum tempo. Esses estudos da natureza da luz remontam a um passado não muito distante cujos resultados afetam e intrigam estudiosos até os dias de hoje como disserta Hawking, S. (2002) sobre os estudos no final do século XIX quando os cientistas acreditavam estar próximos de uma descrição completa do universo imaginando que o espaço fosse preenchido por um meio contínuo chamado 'éter'. Segundo Hawking, isso levava a crer que da mesma forma que a propagação do som, ondas luminosas se propagavam como ondas nesse meio, sendo a velocidade da luz definida e mensurável, variando em relação ao observador. Tentando desvendar essa natureza foram realizados diversos experimentos para se medir a variação da velocidade da luz. Um deles foi feito por Albert Michelson e Edward Morley através de um aparato combinando a emissão e reflexão da luz através do meio éter. O aparato se movia

no meio de acordo com a rotação da Terra. Esse experimento mostrou que não havia diferença de velocidades e conseqüentemente, culminou com os estudos de Albert Einstein, formula da energia etc.. Ainda segundo Hawking, o interferômetro de Michelson-Morley foi um dos primeiros a revelar de forma consistente a natureza interferométrica das ondas eletromagnéticas (Hawking,S., 2002).

Pode-se dizer que a luz, além de não apresentar variação de velocidade, é uma forma de energia que é marcada por duas características: move-se no espaço e carrega informações (Cloud,G,1998).

Não é necessário saber exatamente a natureza da luz para que se possa utilizá-la em aplicações em engenharia. A parte dessas questões é necessário entender os requisitos de criação, propagação e interação da luz com os materiais. Tem-se em mãos duas teorias pilares do estudo da luz baseadas em sistemas experimentais e comprovados: a Mecânica Quântica e a Teoria Eletromagnética das Ondas. A mecânica quântica mostra que a luz consiste de fótons que possuem características tanto de ondas quanto de partículas. Essa aproximação facilita a explicação de fenômenos tais como Fotoeletricidade, Laser e Fotografia. No caso da Teoria Eletromagnética, a luz consiste de energia em forma de ondas eletromagnéticas. Essa aproximação explica outros fenômenos diferentes dos anteriores, tais como Refração, Interferências e Difração (Halliday,D., Resnick, R.,1996). Para a explicação dos fenômenos relacionados ao ESPI, a teoria eletromagnética é suficiente, como para muitas aplicações de engenharia.

Na interação da luz com os materiais e seu comportamento, levam-se em conta as deduções de Maxwell e suas equações que descrevem o comportamento de ondas eletromagnéticas com relação a Vetores de ondas, Campo e Propriedades dos materiais. Para maioria das aplicações, as equações de Maxwell se reduzem à equação de onda (Halliday,D., Resnick, R.,1996)..

Uma das várias formas da equação de ondas é:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = K\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

onde

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \mathbf{i} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \mathbf{j} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \mathbf{k} \quad (2.2)$$

Tal que E = vetor elétrico, K = coeficiente dielétrico do meio, μ = permeabilidade magnética, $k \mu = 1/v^2$ e v = velocidade de propagação da onda.

A equação 2.2 mostra como o vetor elétrico, as propriedades do material, velocidade da onda e as coordenadas espaciais estão relacionadas. Para a maioria das aplicações considera-se somente uma solução mais simples, no caso, trata-se de uma harmônica plana viajando através de um eixo. (Jones, R., Wykes, C., 1989)

2.1.2 Laser

Laser significa Amplificação da Luz por Emissão Estimulada. As principais características da luz Laser que permite sua aplicação em métodos de medição são (Niemz M (2002); Bagnato, V.S):

- Primeiramente, a mais marcante é que a luz laser é **monocromática**, já que a energia carregada pelo fóton estimulante e pelo fóton emitido são as mesmas. Portanto, verificando o espectro da luz laser, vê-se apenas uma linha, mostrando que ela é composta de apenas um comprimento de onda, enquanto uma fonte de luz incandescente é formada por vários comprimentos de onda;
- A **intensidade** do feixe laser pode ser extremamente grande, ao contrário das fontes de luz convencionais. Sua potência pode atingir ordens de tera watt (10^{12} W).
- Outra característica importante é o caráter **direcional** do feixe laser. O feixe resultante, que é constituído de ondas caminhando na mesma direção, é bastante estreito; ou seja, todo feixe propaga-se na mesma direção, havendo um mínimo de dispersão.
- A quarta característica importante da luz laser é sua **coerência**. A radiação é espacialmente coerente se as ondas sucessivas estão em fase e temporalmente coerente se as ondas subsequentes têm todas a mesma direção e o mesmo comprimento de onda (Jones, Wykes, 1989)

2.1.3 Vibração e ondas

Para simplificar a análise, parte-se de um movimento harmônico simples (Jones,R, Wykes,C. 1989):

$$U(t) = u_0 \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (2.3)$$

Onde u_0 : amplitude e f : frequência.

O argumento de seno é chamado fase de oscilação e o fator φ , o ângulo inicial. O período é dado pela relação $\tau = 1/f$.

Considerando como exemplo de movimento harmônico simples, um sistema massa-mola, a energia cinética será:

$$K = \frac{1}{2} mv^2 \quad (2.4)$$

Quando a energia potencial é zero, a energia cinética é máxima. Então a energia total será $E = K_{\max}$. Quando o corpo passa pela origem, sua velocidade é máxima, tendo como valor

$$v_{\max} = 2\pi f u_0 \quad (2.4a)$$

Resultando em uma energia do sistema

$$E = 2m\pi^2 f^2 u_0^2 \quad (2.5)$$

A taxa pela qual a energia passa por um dado ponto por unidade de tempo é conhecido como intensidade da onda. Considerando que a mola anterior seja constituída de uma série de partículas de massa m ; há N partículas por unidade de comprimento da mola oscilando (λ). A energia total em uma seção da mola de um comprimento de onda é:

$$E = 2N\lambda m\pi^2 f^2 u_0^2 \quad (2.6)$$

Durante um ciclo de movimento, a quantidade de energia que passa por um dado ponto é:

$$I = \frac{E}{\tau} = \frac{E}{1/f} = \frac{E}{\frac{1}{c/\lambda}} = c \frac{E}{\lambda} \quad (2.6a)$$

Onde c = velocidade da onda, considerando que uma parte da onda viaja um comprimento de onda durante um ciclo de vibração.

Assim, substituindo por (2.6) o valor de E em (2.6a):

$$I = 2mNc\pi^2 f^2 \mu_0^2 \quad (2.7)$$

Portanto, a **intensidade da onda** é proporcional ao **quadrado da sua amplitude**. Essa importante relação é um dos principais pontos de partida para a análise dos deslocamentos na superfície através do sistema ESPI (Cloud,G. 1996; Jones,R Wykes,C.,1989).

A intensidade de uma onda bi-dimensional é dada pela taxa de energia que passa por uma linha unitária. Para uma onda tri-dimensional, a taxa de energia que passa por uma área unitária.

O primeiro passo para se entender os sistemas que utilizam a interferometria óptica é a relação Intensidade da Onda e Amplitude. Três fenômenos devem ser descritos, para o entendimento dos métodos ópticos de medição, com relação ao comportamento das ondas de luz: **Interferência** de ondas, Efeito de **Difração** de Ondas e **Efeito Doppler** que são descritos nos tópicos a seguir.

2.1.4 Interferência colinear

O objetivo é usar a energia da luz como ferramenta de medida. O problema é como medir a fase absoluta de uma onda de luz, ou como medir a fase de uma onda relativa a outras. A solução do problema é de alguma forma, converter as diferenças de fase, que não se consegue detectar diretamente, para uma intensidade que se possa perceber. Isso é implementado combinando duas ondas no processo chamado Interferência. Interferência de ondas é um dos

pilares em aplicação de medição óptica (ESPI neste caso). A interferência óptica converte dados de fase, que não se pode ver, em informações de intensidade, que se pode detectar quantitativamente. Este processo pelo qual se obtém e se interpreta os resultados é comumente chamado **aplicação de interferometria** (Cloud,G 1989).

Teoricamente, adicionam-se os vetores elétricos para duas ondas que são idênticas exceto por uma defasagem de fase.

$$E_1 = A \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (z - vt) \right] \quad (2.8)$$

$$E_2 = A \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (z - vt - r) \right] \quad (2.9)$$

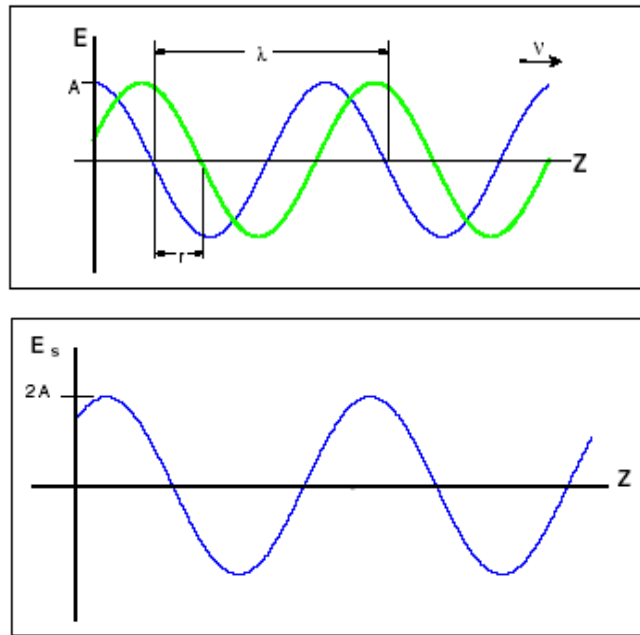


Figura 2.1 - Resultante da interferência de duas ondas de mesma frequência.

$$E_s = 2A \cos \left(\frac{\pi r}{\lambda} \right) \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(z - vt - \frac{r}{2} \right) \right], \text{ onde } E_s = E_1 + E_2 \quad (2.10)$$

O resultado é outra onda cuja amplitude depende da amplitude das ondas originais, do comprimento de onda da luz e da defasagem de fase entre as ondas originais. Portanto é o primeiro indício de que é possível avaliar a defasagem de fase através da análise da amplitude da onda criada pela adição de outras duas (Cloud,G 1989). Percebe-se que não é possível medir diretamente a amplitude da onda de luz. No entanto, pode-se observar a irradiação ou intensidade através de uma célula fotossensível como os olhos, uma câmera ou filme fotográfico (Jones,

Wykes 1989, Ettemeyer,A,1996). Assim, a magnitude que se pode observar diretamente é a intensidade que corresponde à amplitude ao quadrado – Equação 2.7 (Cloud,G. 1996; Jones,R Wykes,C.,1989). Uma relação que se pode alcançar é uma relação de cosseno ao quadrado entre a intensidade e defasagem de fase. Sendo assim, a diferença de fase, que não pode ser percebida, foi convertida em variação de intensidade, que pode ser percebida. Portanto, medindo-se a intensidade, pode-se determinar a defasagem de fase, dado que se sabe o comprimento da onda. Essa relação entre intensidade e diferença de fase é a base de todos os métodos de medição interferométrica (Cloud,G. 1996; Jones,R Wykes,C.,1989)..

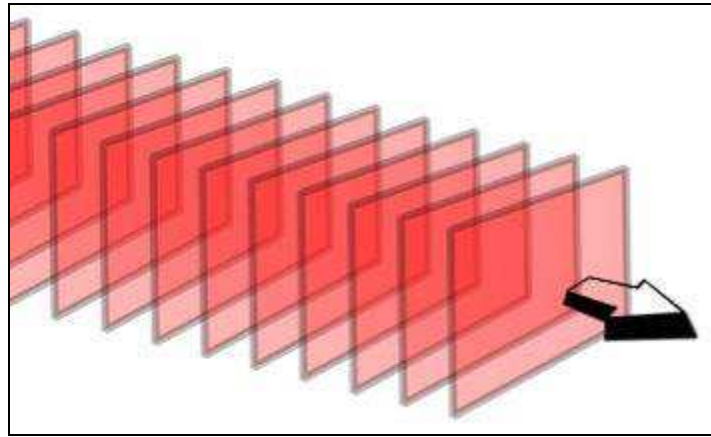


Figura 2.2- Onda frontal é a onda cuja fase em todos os pontos em um plano perpendicular a propagação da onda é constante.

A representação complexa de uma onda de luz descreve o deslocamento através de um número complexo (Jones,R Wykes,C.,1989).

$$U(r, t) = u_0 \exp i(2\pi ft + \varphi) \quad (2.11)$$

Dadas duas ondas

$$U_1(r, t) = u_1 \exp i(2\pi ft + \varphi_1) \quad (2.12)$$

$$U_2(r, t) = u_2 \exp i(2\pi ft + \varphi_2) \quad (2.13)$$

Como visto anteriormente, intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude ($I \propto UU^*$)

Segundo Jones e Wykes (1989), a teoria da superposição de ondas diz que a amplitude resultante da interferência de duas ondas é a combinação das duas amplitudes. Somando-se as duas amplitudes e multiplicando pelo conjugado tem-se:

$$I \propto U \cdot U^* = u_1^2 + u_2^2 + 2u_1u_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (2.14)$$

Portanto:

$$I_{total} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (2.15)$$

Considerando duas ondas frontais cujas amplitudes complexas são dadas por:

$$U_1 = u_1 \exp i(2\pi ft - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}) \quad (2.16)$$

$$U_2 = u_2 \exp i(2\pi ft - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}) \quad (2.17)$$

Onde $\mathbf{k}_{1,2} = (2\pi/\lambda)\mathbf{n}_{1,2}$.

Omitindo-se o termo dependente do tempo tem-se (Jones, R Wykes, C., 1989):

$$U_1 = u_1 \exp i(-\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}) \quad (2.18)$$

$$U_2 = u_2 \exp i(-\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}) \quad (2.19)$$

Segundo a equação 2.15, a intensidade num ponto $\mathbf{r}$ é:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} \quad (2.20)$$

Por simplificação, os eixos coordenados são tais que $\mathbf{n}_1$ e $\mathbf{n}_2$ estão no plano $\mathbf{x}, \mathbf{z}$ e fazem um ângulo θ igual mas opostos com relação ao eixo $\mathbf{z}$. Logo:

$$\mathbf{n}_1 = \sin \theta \mathbf{i} + \cos \theta \mathbf{k} \quad (2.20a)$$

$$\mathbf{n}_2 = -\sin \theta \mathbf{i} + \cos \theta \mathbf{k} \quad (2.20b)$$

$$(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) = (4\pi/\lambda) \sin \theta \mathbf{i} \quad (2.20c)$$

Considerando ainda uma média no tempo da intensidade da luz ao longo de um eixo paralelo ao eixo x , essa linha é descrita pela equação $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + z_0\mathbf{k}$, onde z_0 representa a posição com relação ao eixo z . A equação 2.20 fica na forma (Jones,R Wykes,C.,1989):

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} x \sin \theta\right) \quad (2.21)$$

Portanto, a partir da equação 2.21 pode-se concluir que a intensidade varia senoidalmente ao longo de qualquer eixo paralelo ao eixo x . A distância L entre pontos equivalentes de variação de intensidade é dada por (Jones,R Wykes,C.,1989):

$$L = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (2.22)$$

Essa variação de intensidade é conhecida como padrão de interferência de franjas.

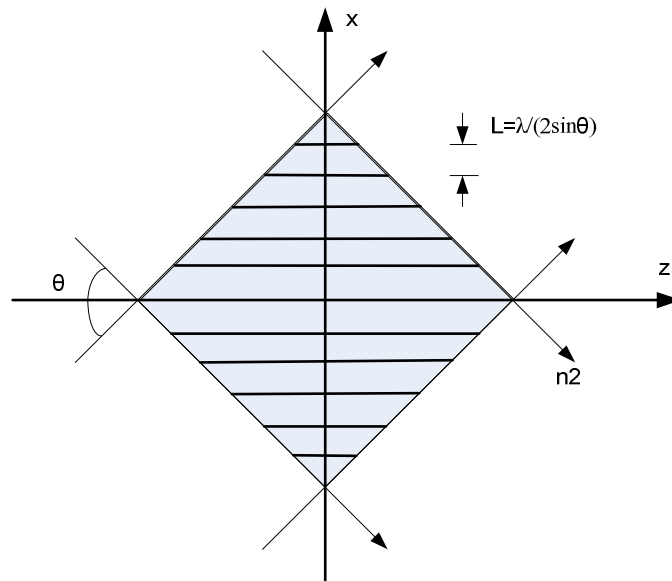


Figura 2.3 -Interferência entre duas ondas em propagação sob ângulos iguais com relação ao eixo z .

2.1.5 Difração da Luz

O primeiro pilar dos métodos ópticos de medição é a interferência de ondas de luz. O segundo pilar é a difração das ondas de luz (Cloud,G, 1998). Exemplos de difração podem ser observados no cotidiano e podem ser observados através de simples experimentos. A iluminação de uma abertura (furo) em uma face gera uma sombra no outro lado do anteparo. A análise dessa sombra mostra que é gerado um formato aleatório e franjas de interferência são observadas. Caso a abertura seja pequena o suficiente, o espaço iluminado no anteparo será maior que a abertura. Existe uma relação inversa entre o tamanho da abertura e a expansão do feixe. O padrão das franjas criadas no anteparo depende do tipo de inteligência (sinal) na abertura. Caso a inteligência consista de duas pequenas aberturas próximas uma da outra, então as franjas de Young são observadas. Se uma fina película é colocada na abertura observa-se uma cadeia ordenada de pontos brilhantes na tela. Esses pontos brilhantes estão espaçados a uma distância que depende diretamente da distância entre as aberturas. O padrão de franjas depende também da inteligência contida no feixe. Caso o feixe seja oriundo de um objeto refletido e se a abertura for pequena o suficiente, uma imagem do objeto é reproduzida.

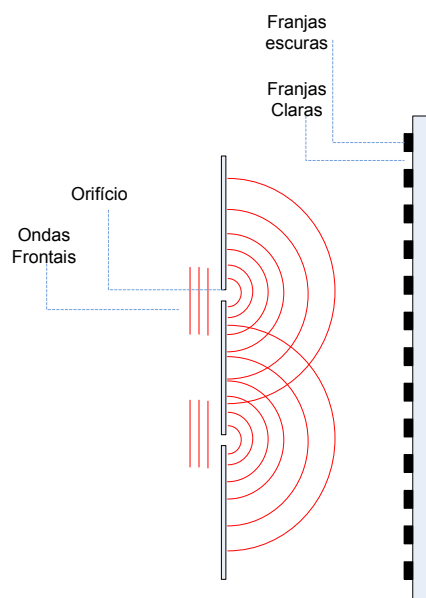


Figura 2.4 – Difração das ondas de luz e interferência entre as duas ondas após o orifício; interferência forma padrões de franjas no anteparo de observação. Young realizou os primeiros experimentos.

O problema da difração está em descrever a luz observada em um ponto qualquer após sua passagem através das aberturas. Este problema foi inicialmente formulado por Huygens em 1678 que assumiu várias simplificações. Fresnel e Fraunhofer resolveram as equações de Huygens e posteriormente estas foram reformuladas e resolvidas por Kirchhoff (Cloud,G, 1998).

No intuito de descobrir alguma aplicação prática do fenômeno através de uma descrição matemática, os estudiosos citados utilizaram o seguinte caminho: partindo das equações de ondas de Kirchhoff, a amplitude da onda em um ponto observado foi relacionada às amplitudes distribuídas na superfície. Essa equação resultante traz uma integral de implicações práticas de resolução. Diversas considerações foram feitas para simplificar a resolução da equação inserindo várias constantes simplificando a integral. Fresnel substituiu funções exponenciais por expansões em séries equivalentes. Matematicamente a equação assumiu uma resolução mais simples sendo batizada de integral de Difração. Por fim Fraunhofer, considerando várias simplificações, transformou a integral da difração em uma transformada de Fourier da função da abertura (Cloud,G, 1998; Jones,R, Wykes,C,1989).

A difração em uma abertura decompõe a informação óptica em suas componentes constituintes de espaço – frequência. A distância no plano de transformação é proporcional a frequência espacial no sinal da abertura. Logo, uma abertura nada mais é que uma transformada de Fourier física (Cloud,G, 1998; Jones,R, Wykes,C,1989).

2.1.6 Efeito Doppler Óptico

A técnica Doppler difere de outras por medir a velocidade dos objetos através da observação interferométrica de mudanças da frequência óptica. Dados do comprimento da trajetória não são relevantes neste caso. O resultado é visto como uma intensidade de frequência modulada ou franjas de interferência, obtido por um observador móvel ou por um anteparo em movimento (Cloud,G.,2002).

A interferometria Doppler Laser, freqüentemente chamada de Doppler velocimetria (LDV), é largamente utilizada em investigações do comportamento dinâmico de materiais sólidos, fluidos e estruturas. Sofisticados equipamentos de medição utilizando essa tecnologia estão disponíveis no

mercado. Em comum com outros métodos interferométricos está em ser um teste não destrutivo e de não contato com a peça. As características da interferometria Doppler Laser são:

- Mede a velocidade dos objetos observados;
- Utiliza observações interferométricas da mudança de frequência da luz que pode ser:
 - Emitida por uma fonte em movimento
 - Observada por um observador em movimento
 - Uma combinação dos dois anteriores;
- Utilização em estudos de comportamento de materiais.

O objetivo é relacionar a mudança de frequência Doppler que é causada por uma fonte em movimento com a velocidade relativa da fonte e do observador.

Um bom exemplo de efeito Doppler é o efeito de uma fonte sonora em movimento. No entanto, o efeito Doppler óptico difere do efeito acústico. A velocidade relativa das ondas de luz não depende da velocidade do observador. A mudança de frequência para o observador em movimento é diferente da frequência observada pela fonte em movimento (Cloud,G.,2002)..

$$f[\text{observador fixo} + \text{fonte em movimento}] \neq f[\text{observador em movimento} + \text{fonte fixa}]$$

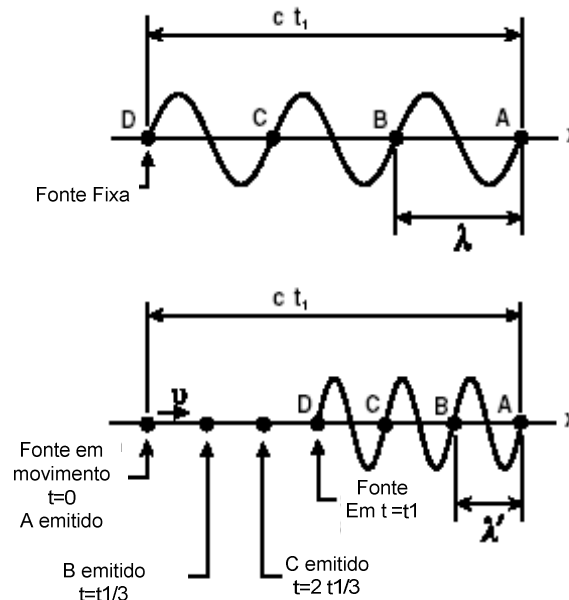


Figura 2.5 - Trajeto da onda com fonte fixa e em movimento.

Considerações de espaço e tempo mostram que se a fonte está se movimentando, o comprimento de onda da radiação emitida será menor ou maior, dependendo da direção do movimento com relação ao observador. Logo, a frequência será maior ou menor. Como ilustrado na Figura 2.5, a fonte de emissão, a princípio, emite a onda que viaja a uma velocidade de c . considerando um tempo t_1 , a distância percorrida será de $d=c.t_1$. Com a fonte emissora em movimento, e considerando a velocidade da onda absoluta, no mesmo intervalo de tempo a onda deveria percorrer a mesma distância, como prevêm os experimentos de Michelson-Morley no início do século XIX, citado anteriormente. Dessa forma o que ocorre é uma variação na variação da frequência da onda, ou seja, o efeito Doppler óptico (Cloud,G.,2002). O exemplo acima obviamente trata de um modelo bastante simplificado de fenômenos que recaem na teoria da relatividade.

Os resultados sugerem que a observação da mudança de frequência de uma fonte em movimento pode ser usada para determinar a velocidade da fonte. A modulação Doppler em frequência é pequena em relação às frequências fundamentais observadas em aplicações de engenharia. Sendo assim, a medição direta da mudança da frequência medindo a frequência inicial e a frequência final resulta em incertezas. Uma medição diferencial da modulação Doppler em caso em que a mudança da frequência é determinada diretamente é requerida. Uma comparação interferométrica entre a frequência da onda original e a frequência da onda modulada permite uma medição mais acurada da mudança de fase (Cloud,G.,1998).

Este efeito capaz de relacionar a mudança de frequência Doppler à velocidade relativa entre Emissor e Observador é utilizado, por exemplo, por pesquisadores para cálculo da distância de corpos celestiais a milhões de anos luz da Terra (Hawking,S.,2002).

2.1.7 Interferometria clássica

A descrição da interferometria clássica é de fundamental importância em várias técnicas de medição.

As **Franjas de Newton** foram assim chamadas por ser ele o primeiro a dar uma explicação plausível para o fenômeno e quantificar os parâmetros relevantes. O feito foi interessante devido ao fato de que Newton não utilizou a teoria de ondas da luz. Newton separou o modelo para a formação de franjas de interferência baseado em “ajustes” da transmissão e obstrução das

partículas que ele imaginou compor a luz. Isto é, Newton introduziu uma periodicidade de onda em sua solução particular (Cloud,G.,1998). Os anéis de Newton são muito comuns e podem ser observados no cotidiano:

- Em um filme de óleo na água ou no vidro
- Em uma interface de uma rachadura de um plástico ou vidro, etc;

As franjas de Newton são causadas pela interferência entre ondas que são refletidas em duas superfícies separadas por um pequeno espaçamento. Foram notadas muito antes de Newton, mas foram explicadas pelo cientista que utilizou uma particular teoria da luz (Jones,R., Wykes,C.,1989; Cloud,G.,1998).

As ordens das franjas são função do comprimento de onda, o espaçamento entre as superfícies, o índice de refração, o ângulo de incidência da luz e o ângulo de observação.

As franjas de Newton recaem em uma classe chamada de “interferometria da divisão da amplitude” porque cada onda incidente diverge em duas partes que são recombinadas após seguirem trajetórias separadas.

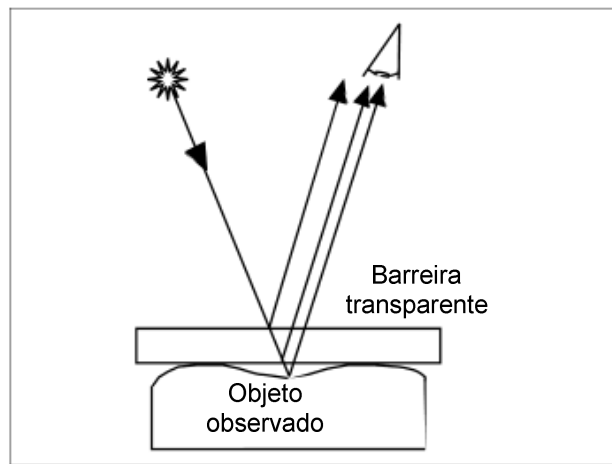


Figura 2.6 -Formação das franjas de Newton.

Na ilustração acima, a incidência e os ângulos de observação são ambos zero. Logo, a relação entre o espaçamento e a ordem da franja se reduz a (Cloud,1998):

$$w = \frac{N\lambda}{2n} \quad (2.23)$$

Onde

- w = espaçamento entre as superfícies;
- N = ordem da franja
- n = índice de refração no espaçamento
- λ = comprimento de onda da luz

A razão de se considerar as franjas de Newton deve-se a sua interpretação quantitativa ser a mesma para franjas encontradas em formas básicas de outras técnicas incluindo Interferometria Holográfica e Interferometria de Espectro (Cloud,G.,1998).

Outro experimento clássico de interferometria é o experimento de Young, já comentado no item Difração. Trata-se de um ótimo exemplo de difração em uma abertura e cujos fundamentos teóricos embasam outras técnicas. O experimento de Young demonstrou a natureza de onda da luz, confirmando a teoria lançada por Huygens e contradisse a teoria particular de Newton.

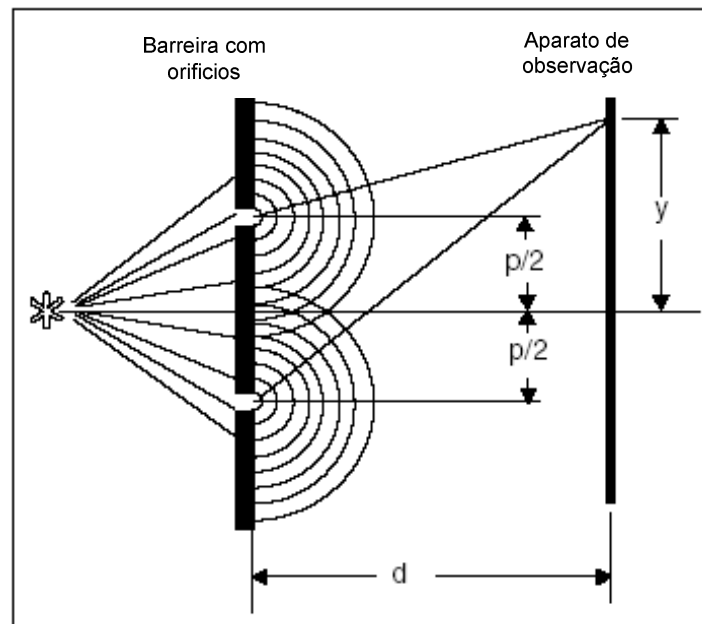


Figura 2.7- Interferência de ondas de luz.

Como ilustrado na figura 2.7, o feixe de luminosidade da fonte é transmitido a uma tela com duas aberturas. O resultado foi observado na tela posterior à combinação das ondas provenientes das aberturas causando um padrão de faixas alternadas de claro / escuro sugerindo

que ocorreram interferências construtivas e destrutivas entre as ondas após atravessarem as aberturas (Jones,R., Wykes,C.,1989. Duas aproximações são plausíveis na análise de formação dos padrões de franjas observados por Young. O primeiro método, mais sofisticado, trata o problema como uma difração na abertura, que implica que o padrão observado é a transformada de Fourier da função da abertura. Como a teoria de difração não estava ainda disponível para Young, este utilizou o princípio de Huygen, que permite que uma abertura iluminada seja substituída por uma cadeia de pontos fontes de luminosidade (Cloud,G,1998). Sendo assim, faz-se a quantificação geométrica por Pitágoras da diferença de comprimento de trajetória (PLD). O resultado é:

$$y = \frac{N\lambda d}{p} \quad (2.24)$$

- y = distância de uma franja brilhante
- d = distância da abertura ao plano de observação
- p = distância entre as réguas
- λ = comprimento de onda da luz
- N = ordem da franja

A teoria da difração comprova os resultados exceto pelo fato de que se perde o fator de obliquidade, significando que o resultado não explica o fato de que a intensidade da franja diminui à medida que cresce a distância no eixo óptico (Cloud,G.1998).

O espaçamento ou ordem das franjas de Young depende da Distância entre as aberturas, da distância para o plano ou tela de observação e o comprimento de onda da luz. Esse padrão de franja é um exemplo de “interferometria por divisão de onda”. O experimento agregou conhecimento no que diz respeito à natureza da luz, demonstrou a interferência entre dois feixes sendo um exemplo de difração em uma abertura (Cloud,G.1998).

A aplicação prática das franjas de Young está em espectros fotográfico em medidas de deslocamentos: os espaçamentos e orientação das franjas resultam na magnitude e direção do vetor de deslocamento local.

2.1.8 Fenômeno de Moiré

O fenômeno de Moiré não se trata de um fenômeno de interferência óptica. O Moiré geométrico ou efeito mecânico de Moiré é uma oclusão mecânica da luz por superimposição de franjas umas sobre as outras gerando um novo padrão de franjas. Trata-se de um fenômeno cuja aplicabilidade está como base para muitos métodos de medição de deformação em superfícies, como a técnica ESPI do presente trabalho. A utilidade deste fenômeno está em relacionar os padrões de franjas de Moiré com deslocamentos e tensões (Cloud,G.,2005)

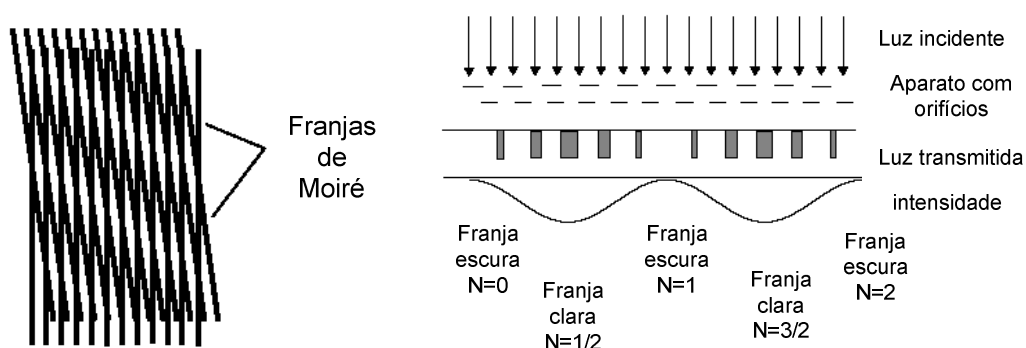


Figura 2.8- Formação das franjas de Moiré. Formação pela oclusão da luz.

Toma-se o eixo x como sendo perpendicular às linhas de grade. Enumeram-se as franjas de Moiré consecutivamente. A componente relativa de deslocamento entre a grade mestra e a grade secundária que foi deslocada para gerar o efeito de Moiré será:

$$u = Np \quad (2.25)$$

Onde: u – deslocamento entre ponto de partida da grade e ponto observado

N – numero da franja

p – numero do espaço da grade mestre

Dada a relação para sólidos deformáveis

$$\varepsilon_x = \partial u / \partial x \quad (2.26)$$

Substitui-se nesta relação as considerações do efeito de Moiré para se obter a relação abaixo:

$$\varepsilon_x = \partial u / \partial x = \frac{\partial (Np)}{\partial x} = p \frac{\partial N}{\partial x} \quad (2.27)$$

Essa equação relaciona a tensão e os deslocamentos com as variáveis do efeito de Moiré em uma direção sendo que o mesmo conceito pode ser expandido para todo campo de efeito Moiré para cálculos do deslocamento através da observação do fenômeno.

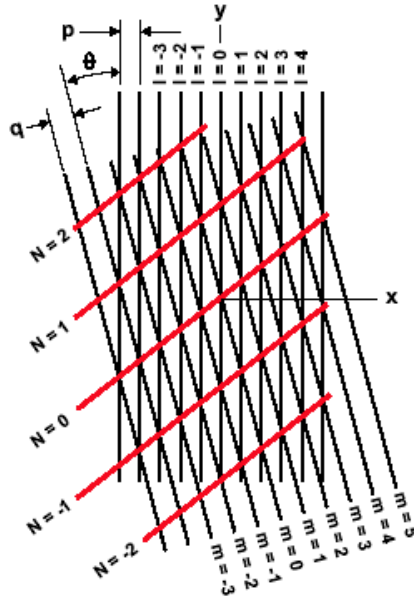


Figura 2.9 - Geometria das franjas de Moiré.

Uma análise paramétrica de Moiré gera as seguintes informações (Cloud,G.,2005):

- Mostra resultados de rotação e tensão aplicados simultaneamente.
- Mostra que esses dois efeitos são desacoplados em casos de pequenas rotações;
- A medida do deslocamento não é afetada pela rotação;
- Importante base para se entender técnicas relacionada com este fenômeno como interferometria de espectro.

No caso da figura anterior, duas grades com espaçamentos diferentes são sobrepostas.

O conjunto de linhas verticais é descrito pela equação: $x = lp$, onde l é o numero da linha e p o espaçamento.

O conjunto de linhas de grade que foram rotacionadas é descrito por: $x \cos \theta + y \sin \theta = mq$, onde m é o numero da linha de grade e q o espaçamento. As duas equações anteriores são resolvidas para valores de m e l . Inspeções da figura mostram a seguinte relação:

$$m - l = N \quad \text{tal que } N \text{ é o inteiro representando a ordem da franja.}$$

Substituindo as equações tem-se que:

$$\frac{(p \cos \theta - q) x + p y \sin \theta}{pq} = N \quad (2.28a)$$

$$\frac{(p - q)}{p} x + \theta y = Nq \quad (2.28b)$$

Chegando a uma relação linear desde que a rotação seja pequena.

Supondo ainda que as grades tenham o mesmo espaçamento:

$$\varepsilon_x x + \theta y = Nq \quad (2.29a)$$

$$\varepsilon_x = q \frac{N}{x} \quad (2.29b)$$

Observa-se que caso a rotação relativa seja zero, o efeito de Moiré pode ser usado para se calcular a deformação na peça (Cloud,G.,2005;Cloud,G.,1998).

Esse princípio pode ser utilizado para verificação de deslocamentos de superfícies em ensaios estáticos embasando um dos princípios da técnica ESPI que é a medição de deslocamentos das superfícies de componentes mecânicos com a aplicação de cargas.

2.2 Interferômetros

Os conceitos do item 2.1 embasam os princípios que regem os métodos ópticos de medição. No entanto, o aparato principal onde estes fenômenos acontecem é o interferômetro que apresenta configuração e construção características apresentados a seguir.

2.2.1 Interferômetro genérico

Assumindo um foco em saber o que causa a defasagem de fase e, em termos gerais, os componentes essenciais de um arranjo interferométrico para medi-lo, busca-se explorar os conceitos de um interferômetro genérico. Para se chegar à diferença de fase, deve-se saber como descrever o comprimento do passo com que a onda viaja. O comprimento do trajeto óptico

depende tanto do comprimento físico quanto da velocidade de onda, que é mais facilmente quantificada através do índice de refração, que é a taxa da velocidade no meio pela velocidade da luz no vácuo. Através do índice de refração, calcula-se o trajeto óptico que é o produto do trajeto físico e o índice de refração (Cloud,G.1998).

$$\text{Índice absoluto de refração} = n_1 = \frac{V_{\text{luz no vácuo}}}{V_{\text{luz no material 1}}}$$

$$\text{Índice Relativo de refração} = n_{12} = \frac{V_{\text{luz no material 2}}}{V_{\text{luz no material 1}}}$$

Na medição mecânica, o interesse é na mudança no comprimento do trajeto ou na diferença entre dois comprimentos de trajeto chamado de PLD (*path length difference*) que é o que causa a defasagem de fase. O PLD entre duas ondas é a principal quantidade de interesse na medição interferométrica. O PLD depende dos seguintes fatores (Cloud,G.,2003):

- Índice de refração do meio ao redor;
- Índice de refração dos materiais do trajeto da onda;
- Distância física que cada onda viaja.

A maioria dos métodos ópticos de medição em mecânica experimental envolve a medida de PLD usando a interferência.

Esses conceitos levam a definição de um “interferômetro genérico” que é um modelo conceitual do processo de medição interferométrica que converte PLD em intensidade, que é a magnitude definida como mensurável (Cloud,G.,2003):

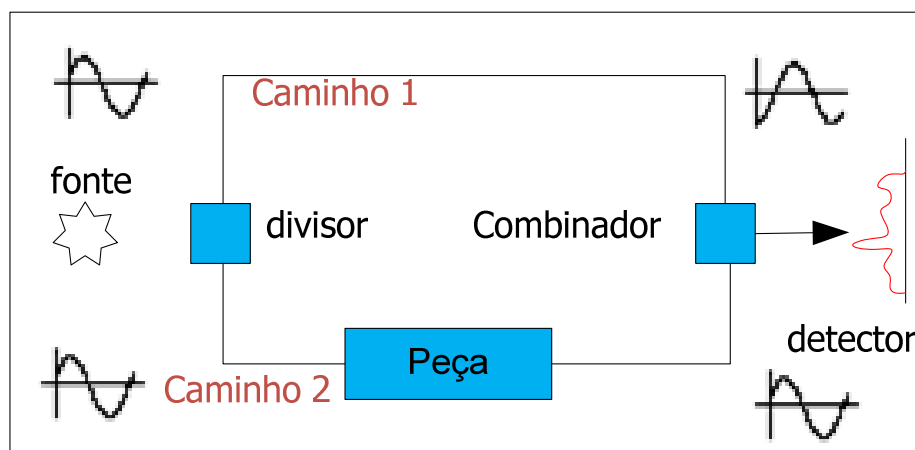


Figura 2.10- Interferômetro genérico.

Os componentes básicos de qualquer interferômetro incluem (Cloud,G.,2003):

- Fonte de luminosidade;
- Divergente do feixe de luminosidade (*splitter*);
- Dois trajetos ópticos;
- Convergente do feixe de luminosidade (*combiner*);
- Equipamento para medir a intensidade.

Há duas maneiras pelas quais se podem executar a medição interferométrica:

- Medição direta da diferença do comprimento do trajeto entre dois trajetos;
- Medição da mudança em um trajeto mantendo o outro trajeto constante enquanto que se mede a mudança de intensidade resultante das mudanças no primeiro trajeto.

Uma vantagem nos métodos ópticos é que se pode aplicar a interferometria em um extenso campo para se obter um mapa local de PLDs. Para se expandir a interferometria para todo campo de atuação, utiliza-se diversos interferômetros operando em paralelo. Para isso, modifica-se o interferômetro genérico como se segue (Cloud,G.,1998):

- Adiciona-se um divergente do feixe próximo a fonte de luminosidade ou separa-se os divergentes do feixe em cada trajeto;
- Usa-se o convergente de feixe que é amplo o suficiente para abranger todo campo de observação;
- O detector de luminosidade é substituído por um equipamento de processamento de imagem, por exemplo, uma câmera.

Para as considerações deste tópico foram assumidos alguns pontos. O índice de refração é realmente um numero complexo. Foi assumido também que os materiais envolvidos não são condutores, logo se ignora a parte imaginaria do índice complexo refrativo. Essa não é uma restrição grave para a maioria das aplicações, mas possui implicações quando de uma observação por reflexão de superfícies metálicas, como quando da interpretação dos anéis de Newton (Cloud,G.,1998)

2.2.2 Interferômetro de Michelson.

O exemplo clássico de interferometria é o interferômetro de Michelson. Esse método é de extrema importância na história da física e engenharia já que explica muito sobre o comportamento da luz além de ser a base conceitual de muitas técnicas atuais de medição utilizando interferometria.

Cloud,G.(2003) em artigo sobre interferometria Michelson mostra a metodologia utilizada. Michelson utilizou o equipamento para determinar os efeitos da velocidade do observador na velocidade da luz. Além disso, investigou a estrutura de linhas espectrais e definiu o padrão do metro. O layout do equipamento está representado na Figura 2.11. Muitas outras configurações desse equipamento foram exploradas e patenteadas e largamente utilizadas. Para o perfeito enquadramento do equipamento, o PLD entre quaisquer duas ondas chegando à tela de observação deve ser duas vezes a diferença entre as distâncias do divisor do feixe para cada um dos espelhos ou superfícies de teste. A irradiação em qualquer ponto na tela de visualização depende da diferença de comprimento de trajetória entre as ondas que chegam naquele ponto. Caso um ou ambos os espelhos ou superfícies de teste forem deslocados pode ocorrer (Cloud,G.,2003):

- O encontro das ondas na tela de visualização será oblíquo
- Interferem de acordo com as leis de interferência oblíqua
- Um padrão de franjas paralelas é formado
- Os espaçamentos entre franjas indicam o deslocamento relativo dos espelhos

Se somente um dos espelhos for deslocado, as franjas sofrerão translação através da tela.

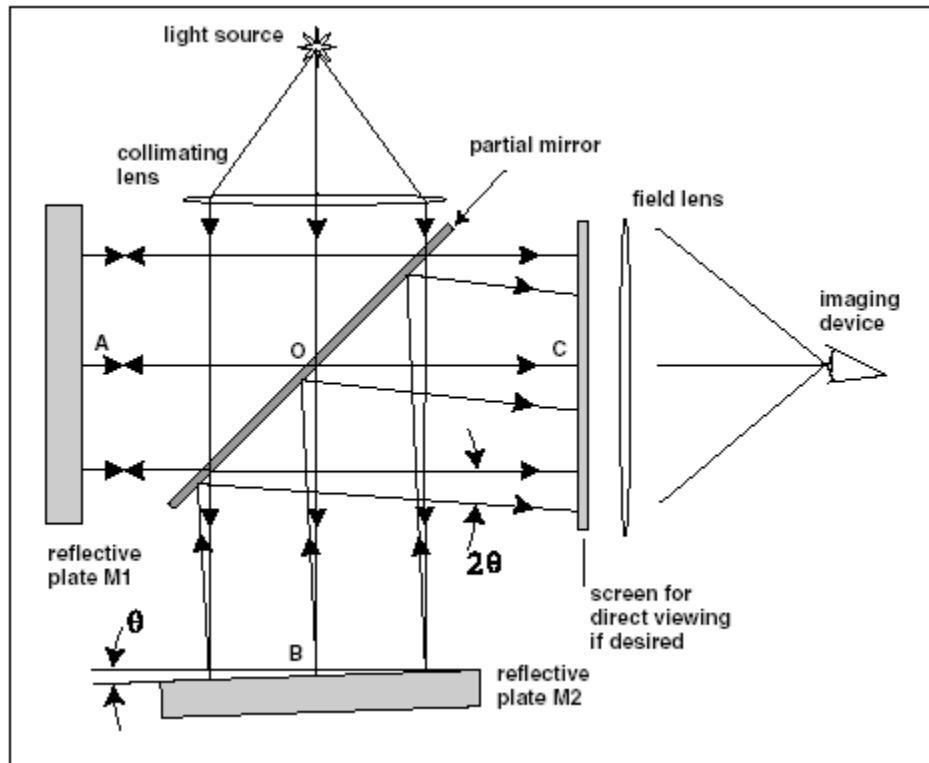


Figura 2.11 -Interferômetro de Michelson. *Optical Methods: Back to Basics*, Cloud, Gary, Ca. 2003.

Caso um dos espelhos fosse absolutamente liso, por exemplo, o padrão de franja resultante seria exatamente o mapa de contorno do perfil do outro espelho. Se nenhum dos dois for liso, então o padrão de franja resultante será a diferença entre os dois perfis (Cloud,G.,2003). O interferômetro de Michelson tem as seguintes características principais:

- É um equipamento de medida diferencial;
- Compara dois caminhos fisicamente separados;
- Gera franjas que são constantes PLDs locais (franjas *Fizeau*);
- Fornece a diferença em contornos e /ou movimentos relativos dos espelhos.

Dado que compara dois caminhos fisicamente separados, tende a ser afetado por vibrações. Um *Setup* cuidadoso e isolamentos são requeridos. Sendo assim, tem-se que os interferômetros de trajeto comum comparam PLDs entre ondas que seguem a mesma trajetória física e são resistentes a vibrações enquanto que interferômetros de trajetos separados comparam PLDs entre ondas de trajetos separados fisicamente e são suscetíveis a vibrações.

O interferômetro de Michelson é um paradigma para muitas técnicas de medição ópticas incluindo a Interferometria Holográfica e a maioria das Interferometrias Digitais de Espectro.

2.2.3 Efeito *Speckle*

Uma superfície opticamente rugosa, isto é, sua variação da altura é da magnitude ou maior que o comprimento de onda da fonte de luz incidente, iluminada por um feixe de Laser apresenta uma característica granular. Esse efeito é conhecido como efeito *speckle*. O mesmo efeito também ocorre em radar coerente e imagem ultra-sônica (Cloud,G.,1998; Jones,R., Wykes,C.,1989).

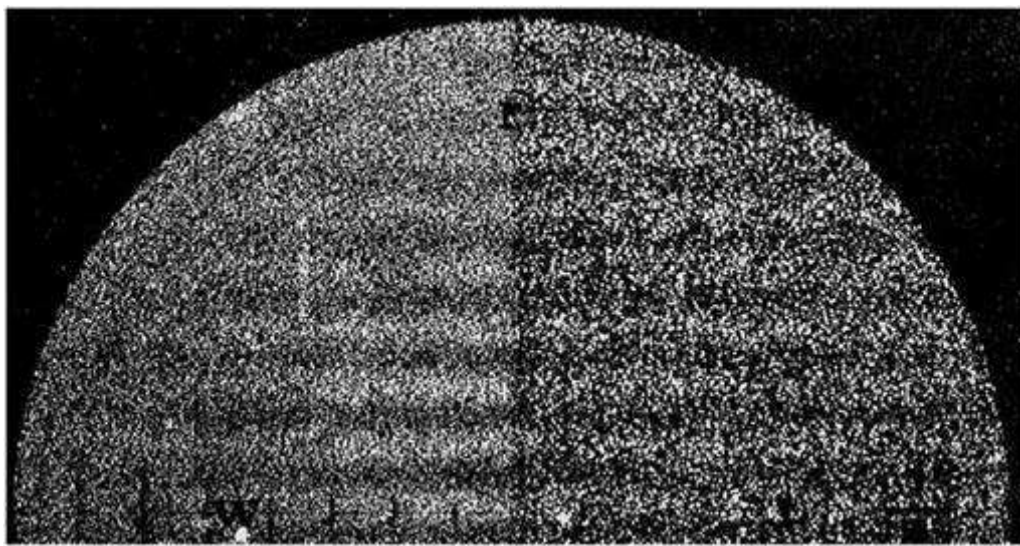


Figura 2.12- Efeito *speckle* de uma superfície iluminada por um feixe de Laser.(fotos de G.Cloud, ca. 1971)

A invenção do Laser foi muito bem recebida por fotógrafos, artistas, cientistas, e outros usuários de equipamentos ópticos por ter surgido como sendo a solução para muitos problemas de iluminação devido as suas características específicas como sendo um feixe de luz de alta intensidade, colimada, monocromática e coerente. Tudo isso esbarrou no problema do efeito *speckle*, citado. Fotografias utilizando fontes de luz Laser são de qualidade muito inferior que as fotos de fontes de luz não coerentes. Muitos esforços foram feitos no intuito de eliminar esse efeito da luz coerente. Nesses esforços, o padrão de *speckle* mostrou ser fonte de muitas informações do perfil do objeto iluminado (Leendertz, J.A,1970 ; Cloud,G.,1998). Essa nova técnica de medição passou a utilizar campos de contrastes (*speckle*) em combinação para gerar dados, freqüentemente no formato de padrões de franjas similares ao efeito de Moiré, que será demonstrado posteriormente, e através destes campos de combinação, calculados os resultados em termos de deslocamento, tensões e deformações.

Existem dois tipos fundamentais de *speckle*: o *speckle* objetivo, onde não há nenhum aparato de lentes para sua observação e o *speckle* subjetivo, ou plano de imagem, onde há lentes na composição do sistema óptico (Jones,R.,Wykes,C.,1989;Cloud,G.,1998).

2.2.3.1 *Speckle* objetivo

Como citado anteriormente, o *speckle* objetivo não utiliza lentes no sistema. Os contrastes (*speckles*) são difíceis de serem observados e é de pouca utilização prática em medições. No entanto, o embasamento teórico da formação de *speckles* objetivos fornece estimativas quanto ao tamanho dos *speckles* e o brilho (Cloud,G.,2007).

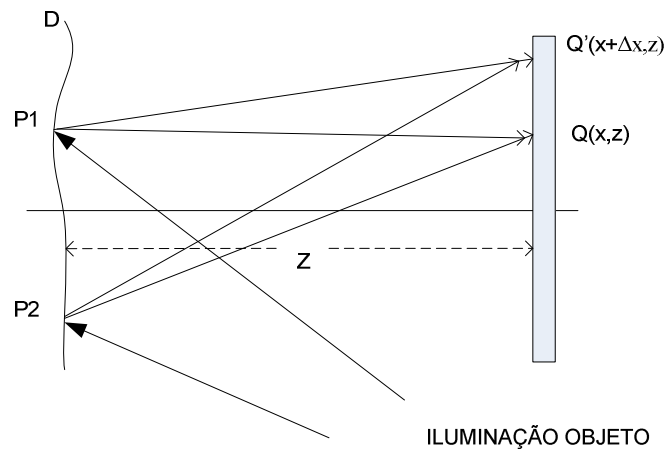


Figura 2.13 - *speckle* objetivo.

Uma fonte de luz coerente é espalhada sobre um objeto cuja superfície é opticamente rugosa. Esse feixe será refletido em todas as direções. O requisito dessa superfície é que não seja uma superfície refletiva polida. Uma tela, um filme fotográfico ou detector é posicionado a certa distância da superfície para atuar como receptor dos raios refletidos.

Neste momento, cada ponto do receptor recebe luz refletida de todos os pontos da superfície do objeto. Dessa forma, haverá várias ondas refletidas chegando a cada ponto da superfície do receptor. Além disso, cada onda viajou distâncias diferentes até o receptor, resultando em ondas com diferentes fases. Nesse caminho, as ondas sofrem interferências umas

com as outras produzindo um brilho particular no ponto de encontro no receptor: caso um dado ponto no receptor tenha combinações de ondas predominantemente destrutivas, então este ponto será predominantemente escuro; caso o mesmo ponto recebe ondas cujas interferências sejam predominantemente construtivas, então este ponto mostrara brilho. Os pontos adjacentes resultarão em uma mistura de relações de fases, e o resultado estará entre totalmente escuro e um máximo de brilho. Esse modelo de *speckle* objetivo leva em consideração um modelo de interferência praticamente colinear, já que na prática há interferências oblíquas. O modelo mais simples é suficiente se o objeto é pequeno e colocado a grande distância de um receptor também pequeno e contempla a estimativa do tamanho do *speckle* (Jones & Wykes, 1989; Cloud,G.,1998).

Partindo-se do princípio de que o brilho não é previsível e não relacionado um ponto com outro, propriedades estatísticas foram calculadas por Goodman: a probabilidade da intensidade I estar entre os valores I e $I+dI$ é dada por (Goodman,J.W.,1975):

$$P(I)dI = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp \frac{-I}{\langle I \rangle} \quad (2.30)$$

Goodman ainda derivou uma expressão para função de correlação para a intensidade refletida onde uma superfície de dimensões $L \times L$ é iluminada por um feixe de intensidade uniforme:

$$R(\Delta x, \Delta y) = \langle I \rangle^2 \left[1 + \text{sinc}^2 \left(\frac{L \Delta x}{\lambda z} \right) \text{sinc}^2 \left(\frac{L \Delta y}{\lambda z} \right) \right] \quad (2.31)$$

Onde

$$\text{sinc } x = (\sin x)/x;$$

z = distância entre o objeto e o aparato receptor;

$(\Delta x, \Delta y)$: as coordenadas x, y do vetor $(r_1 - r_2)$ representando a mudança na posição de visualização;

O tamanho médio do *speckle* pode ser considerado como o valor de Δx (ou Δy), para os quais o valor da função *sinc* torna-se zero primeiro:

$$(\Delta x)s = \frac{\lambda z}{L} \quad (2.32)$$

A diferença do caminho dos pontos P1 e P2 para Q é dada por (Figura 2.18):

$$s = (P1Q - P2Q) \cong \frac{xL}{z} + \frac{1}{2} \frac{L^2}{z} \quad (2.33)$$

A diferença do caminho dos pontos P1 e P2 para Q'(x+Δx,l) é dada por:

$$(P1Q' - P2Q') \cong \frac{xL}{z} + \frac{1}{2} \frac{L^2}{z} + \frac{\Delta x L}{z} \quad (2.34)$$

Portanto, a mudança relativa do caminho é dada por

$$\Delta s = \Delta x L / z \quad (2.35)$$

Caso Δl seja consideravelmente menor que um comprimento de onda, então a fase relativa de todos os componentes será aproximadamente a mesma. Se, porém,

$$\Delta x L / z \cong \lambda \quad (2.36)$$

As fases serão suficientemente diferentes tal que a intensidade de Q' não estará relacionada com a intensidade de Q.

Percebe-se pela equação 2.31 que o tamanho do *speckle* na luz refletida pela superfície rugosa em uma dada distância aumenta à medida que a área iluminada diminui. O padrão de *speckle* pode ser considerado como sendo composto por um conjunto de contrastes de frequências espaciais variadas; a máxima frequência f_{max} é o contraste formado pela interferência da luz refletida pelos picos da superfície. Os valores de f_{max} são relacionados com o tamanho da área iluminada e a distância do objeto para a posição do receptor (Cloud,G.,2007).

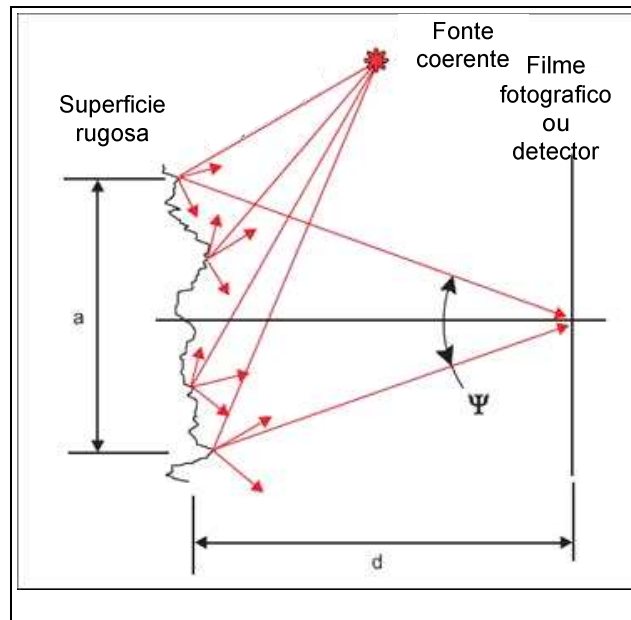


Figura 2.14- Formação do *speckle* objetivo: a é o valor do diâmetro da área iluminada; d é a distância do objeto para o detector;

Assumindo que o detector esteja distante do objeto implicando que o ângulo $\psi/2$ seja pequeno o suficiente tal que seu seno seja aproximado por $a/2d$. Dessa forma, o tamanho do *speckle* é dado por:

$$S_{obj} = \lambda \frac{d}{a} \quad (2.37)$$

Esse tamanho do *speckle* deve ser levando em consideração no caso dos sistemas ESPI já que a resolução será dada pelo tamanho do monitor em função dos pixels (Jones & Wykes, 1989).

2.2.3.2 *Speckle* subjetivo

Segundo Cloud, G., (2007) no artigo denominado *Speckle* Subjetivo, um ponto P_1 no objeto, *figura 2.15*, forma um padrão de difração centrada no ponto Q , cuja distribuição de amplitudes é governada por equações que descrevem a resultante da amplitude complexa em um dado ponto em uma superfície após a onda frontal sofrer difração em uma única abertura. A luz oriunda da superfície possui fase aleatória associada à variação de altura da superfície rugosa. O ponto Q é também iluminado por pontos adjacentes ao ponto P_1 , desde que esses pontos

produzam padrões de difração que se sobreponham ao ponto Q. Esses padrões de difração também possuem fases aleatórias. Um ponto P₂ que está localizado tal que o primeiro mínimo do seu padrão de difração coincida com Q, não contribui com a amplitude complexa da luz em Q. Portanto, a intensidade da luz em Q é composta pela contribuição de uma área no objeto centrado em volta de P₂ cujo diâmetro d_{obj} é dado por duas vezes a distância entre P₁ e P₂.

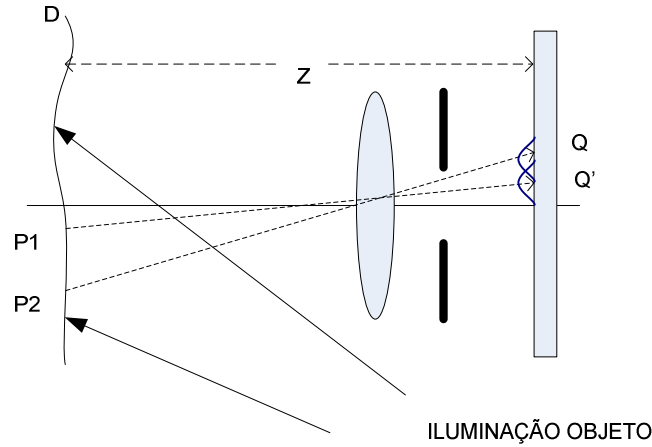


Figura 2.15- Formação do *speckle* subjetivo.

A distância QQ' pode ser descrita como (Cloud,G.1998):

$$QQ' = \frac{1.22 \lambda v}{a} \quad (2.38)$$

Onde a é o diâmetro da abertura das lentes e v a distância entre a lente e o plano de visualização. O tamanho dos *speckles* pode ser considerado como o dobro da quantidade da distância anterior:

$$d_{sp} \approx \frac{2.4 \lambda v}{a} \quad (2.39)$$

A distância P₁P₂, que é o raio da área que reflete a luz para o ponto Q, é dada por:

$$(r_s)_{obj} = \frac{1.22 \lambda u}{a} \quad (2.40)$$

Onde u é a distância entre o objeto e a lente.

Goodman, J. W. (1975), derivou uma expressão para a função de auto-correlação do plano de imagem de *speckle*, Eq. 2.31. Substituindo os valores da área de reflexão da luz para o ponto Q tem-se :

$$R(r) = \langle I \rangle^2 [1 + 2J_1(\pi ar/\lambda v) / (\pi ar/\lambda v)] \quad (2.41)$$

O tamanho do *speckle* no plano de imagem é dependente da abertura das lentes – logo o nome ‘*speckle* subjetivo’. A máxima frequência espacial é então determinada pelo tamanho da abertura das lentes e a distância das lentes para o plano de visualização. Isto é dado por (Cloud,G.,1998):

$$\frac{1}{f_{\max}} = g_{\min} \approx \frac{\lambda}{a} \quad (2.42)$$

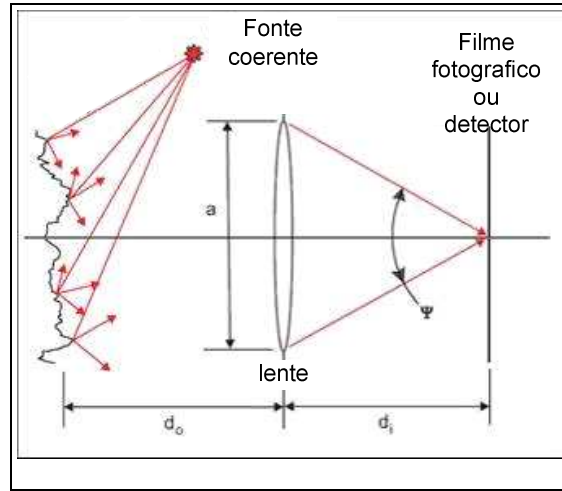


Figura 2.16 - Formação do *speckle* subjetivo: a é o diâmetro da lente; d_o a distância entre objeto e lente; d_i a distância entre lente e detector;

Neste caso, $\sin \psi/2 = a/2d_i$ considerando o diâmetro da lente muito menor que a distância até a imagem.

$$S_{\text{subj}} = \lambda \frac{d_i}{a} \quad (2.43)$$

A influência da lente leva a equação:

$$\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_o} = \frac{1}{F} \quad (2.44)$$

Onde F = distância focal;

E a definição de Magnificação:

$$M = \frac{d_i}{d_o} \quad (2.45)$$

Obtém-se uma estimativa do tamanho do *speckle* subjetivo na imagem para objetos finitos:

$$S_{\text{subj}} = \lambda \frac{F(1+M)}{a} = \lambda f(1+M) \quad (2.46)$$

Onde $f = F/a$ (taxa entre distância focal e diâmetro da lente).

2.3 Speckle Pattern Correlation Interferometry

Considere o interferômetro da figura 2.17. Uma onda plana U_0 é divergida em duas componentes iguais. Essas duas componentes iluminam as superfícies D_1 e D_2 . Este arranjo é similar ao arranjo do interferômetro de Michelson, com os espelhos sendo substituídos por superfícies não especulares. Essas ondas refletidas de D_1 e D_2 interferem na recombinação em B e são gravadas no plano de imagem. A distribuição da intensidade no plano será composta do padrão de interferência formado entre o plano de imagem de padrão de *speckles* de D_1 e D_2 .

As amplitudes complexas dessas ondas podem ser representadas como (Leendertz, J.A., 1970):

$$\begin{aligned} U_1 &= u_1 \exp i \psi_1 \\ U_2 &= u_2 \exp i \psi_2 \end{aligned} \quad (2.47)$$

Onde u_i e ψ_i são respectivamente a variação randômica da amplitude e fase de cada plano de imagem de *speckle*. A intensidade de um dado ponto em uma imagem plana será dada por:

$$I_1 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \psi \quad (2.47a)$$

Onde $I_1 = U_1 U_1^*$, $I_2 = U_2 U_2^*$ e $\Psi = \psi_1 + \psi_2$;

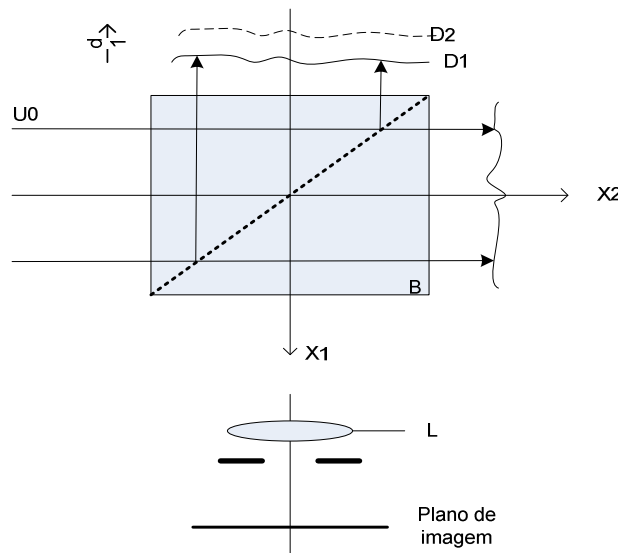


Figura 2.17 - Arranjo de Michelson de um interferômetro de correlação de padrões de *speckle* sensível a deslocamentos fora-do-plano.

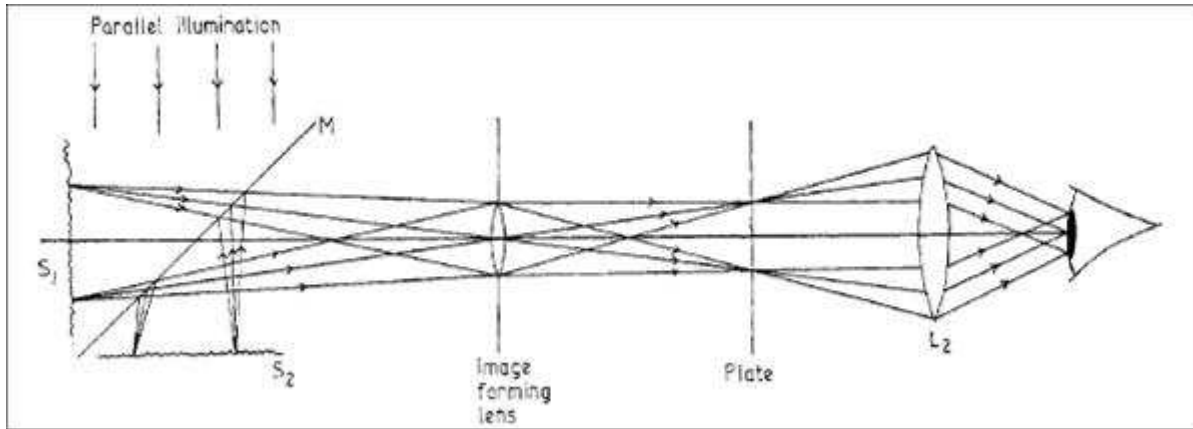


Figura 2.18 Arranjo modificado de Michelson sensível a movimentos normais; J.A.Leendertz, (1970).

Segundo a figura 2.17, quando D_1 é deslocado de uma distância d_1 paralela a superfície normal, a mudança de fase resultante é dada por:

$$\Delta\varphi(d_1) = 4\pi d_1/\lambda \quad (2.48)$$

Causando uma mudança no ponto para:

$$I_2 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\psi + \Delta\varphi(d_1)) \quad (2.49)$$

Jones & Wykes (1989) demonstram que quando $\Delta\varphi = 2m\pi$ I_1 e I_2 possuem a máxima correlação. Neste caso, $I_1 = I_2$; (Jones,R.,Wykes,C.,1989).

O coeficiente de correlação se torna zero, isto é, I_1 e I_2 se descorrelacionam quando:

$$\Delta\varphi = (2n + 1)\pi$$

A partir da relação 2.48, pode ser visto que a máxima correlação ocorre ao longo de linhas onde

$$d_1 = \frac{1}{2} n\lambda \quad (2.50)$$

E a mínima correlação existe onde

$$d_1 = \frac{1}{2} (n + \frac{1}{2})\lambda \quad (2.51)$$

Essas relações de máxima e mínima correlação são importantes durante a iteração do algoritmo do sistema ESPI para visualização da formação das franjas, que será posteriormente mostrado.

2.3.1 Correlação de franjas

Um fotografia é gravada na intensidade I_1 , e o respectivo negativo da imagem é recolocada exatamente no seu lugar de origem. O objeto é então tensionado. A partir de então a intensidade passa a ser I_2 . Como a fotografia é um negativo, áreas escuras corresponderão a *speckles* claros em I_1 e áreas claras a *speckles* escuros. Assim, pouca luz será transmitida para aquelas áreas onde $I_1 = I_2$ (máxima correlação) e máxima transmissão ocorre quando há mínima correlação. Portanto, a variação em correlação é considerada como uma variação na transmissão de luz através do negativo. A visibilidade das franjas utilizando essa técnica é, entretanto, muito baixa (Leendertz, J. A., 1970)

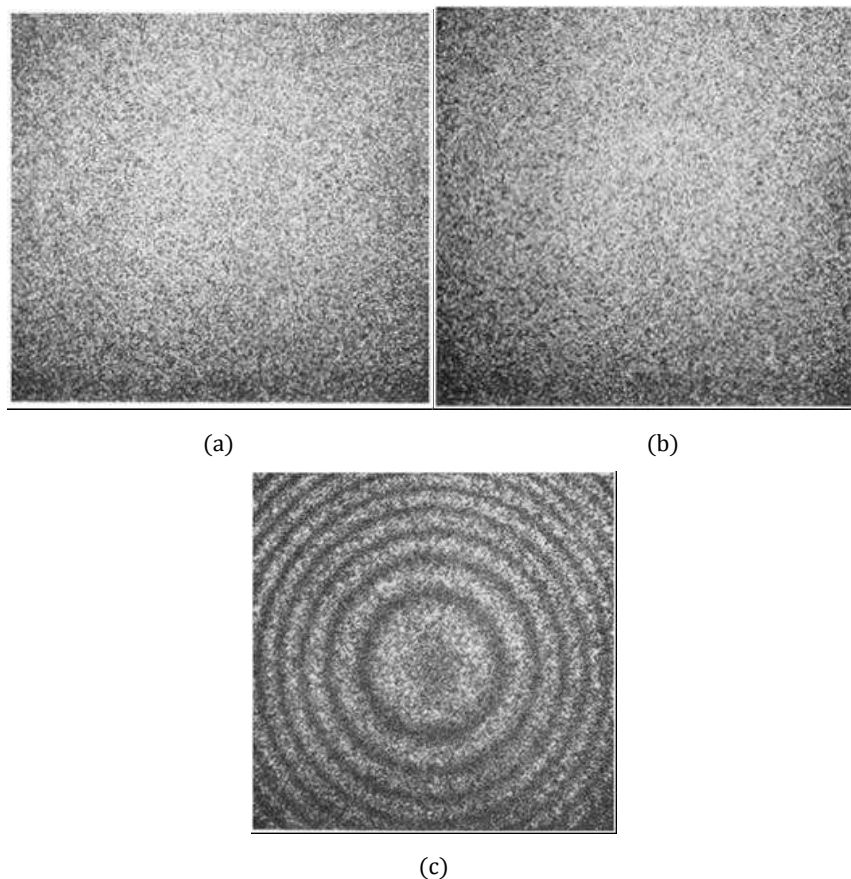


Figura 2.19 - (a) Padrão de *speckle* de superfície não deformada; (b) padrão de *speckle* para superfície deformada; (c) franjas resultantes de (a) e (b).

2.3.2 Arranjos para correlação de franjas

A técnica de dupla exposição é baseada no método de visualização de Fourier (Jones,R.,Wykes,C.,1989;Cloud,G.,1998). Gravações do objeto em seu estado normal e depois de submetido a uma carga são feitas no mesmo filme, no entanto, com a introdução de uma mudança de posicionamento lateral da imagem entre as exposições. A última é uniforme em toda a imagem e suficiente para formar tipicamente mais de duas franjas. Imagens correlacionadas para as quais $\mathcal{I}_1=\mathcal{I}_2$, se comportarão exatamente da mesma forma que o filme exposto uma única vez a luz e, portanto formando um padrão de franjas. É observado que as regiões de mínima correlação não irão formar padrões de franjas.

O arranjo dos interferômetros é separado em termos da sensibilidade a deslocamentos ‘fora do plano’ e ‘no plano’. Os seguintes arranjos são ilustrados nas figuras 2.20 e 2.21.

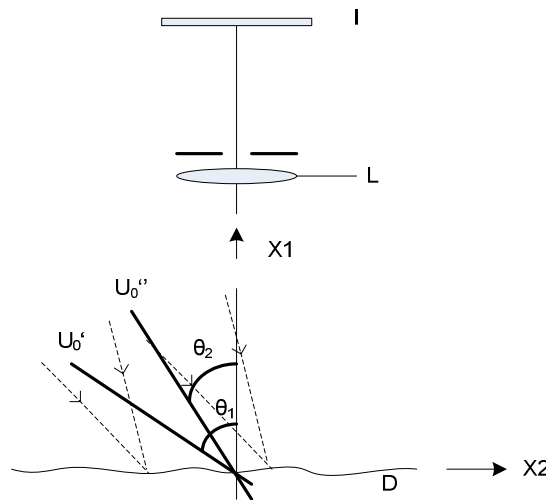


Figura 2.20 - Interferômetro sensível a movimentos fora do plano de reduzida sensibilidade a deslocamentos.

O fator de correlação de fase é dado por:

$$\Delta\varphi(d_1) = \frac{2\pi}{\lambda} d_1 (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (2.52)$$

Onde θ_1 e θ_2 são os ângulos de inclinação das duas ondas de iluminação U_0' e U_0'' respectivamente, sendo U_0' o feixe de iluminação e U_0'' o feixe de referência.

O segundo arranjo é o interferômetro sensível a deslocamentos no plano, que da mesma forma utiliza um feixe de iluminação e outro de referência.

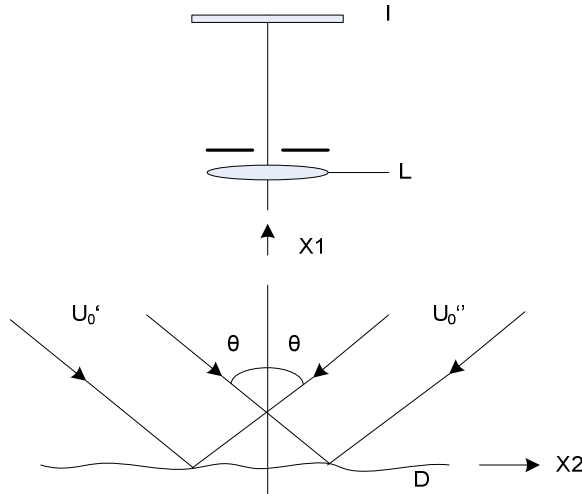


Figura 2.21- Arranjo de interferômetro sensível a deslocamentos 'no plano'.

A mudança relativa de fase entre os dois feixes é dada por (Jones,R.,Wykes,C.,1989)

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d_2 \sin \theta \quad (2.53)$$

2.3.3 Descrição de pequenos Deslocamentos

A completa descrição de pequenos deslocamentos é explorado por Jones e Wykes (Jones,R.,Wykes,C.,1989,p-68-74). Considerando a figura 2.22, a posição dos pontos é dada por:

$$P: r$$

$$Q: r + \Delta r$$

$$P': r + d$$

$$Q': r + \Delta r + d + \Delta d$$

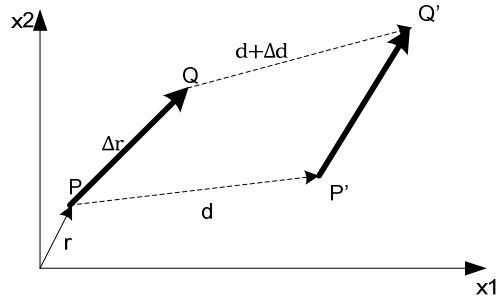


Figura 2.22- Deslocamento de um segmento de linha de uma superfície de PQ para P'Q'.

Portanto, o deslocamento de **Q** é dado por:

$$\mathbf{L} = \mathbf{d} + \Delta \mathbf{d}$$

Caso o movimento seja somente de translação, $\Delta d = 0$; caso contrário, $\Delta d \neq 0$.

A equação acima pode ser da forma $\Delta \mathbf{d} = \mathbf{d}(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}) - \mathbf{d}(\mathbf{r})$.

Expandindo esta equação em uma série de Taylor:

$$\Delta \mathbf{d} = \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial x_3} \Delta x_3 \dots \quad (2.54)$$

Onde:

$x_{1,2,3}$: são os eixos ortogonais;

$\Delta x_{1,2,3}$: componente de $\Delta \mathbf{d}$;

Desconsiderando os termos de maior ordem na série tem-se:

$$\Delta d_1 = \frac{\partial d_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial d_1}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial d_1}{\partial x_3} \Delta x_3$$

$$\Delta d_2 = \frac{\partial d_2}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial d_2}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial d_2}{\partial x_3} \Delta x_3$$

$$\Delta d_3 = \frac{\partial d_3}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial d_3}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial d_3}{\partial x_3} \Delta x_3$$

Que pode ser representado por notação indicial como:

$$\Delta d_i = \frac{\partial d_i}{\partial x_j} \Delta x_j \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2.55)$$

Tensor:

$$\begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{pmatrix} \quad (2.56)$$

Onde $e_{ij} = \frac{\partial d_i}{\partial x_j}$

Dado **PQ** com componentes nas três direções, as componentes

$$\frac{\partial d_2}{\partial x_1} \text{ e } \frac{\partial d_3}{\partial x_1}$$

representam os ângulos de rotação com os eixos x_2 e x_3 respectivamente e $\partial d_1 / \partial x_1$ representa a deformação normal. Portanto as componentes da diagonal principal do tensor representam a deformação normal e as outras componentes, os ângulos de rotação entre a componente j -ésima e as outras componentes.

É possível separar as rotações e deformações. Os gradientes de deslocamentos dados pela equação 2.56 representam tanto rotações quanto deformações do corpo. Os termos dessa equação podem ser representados de forma que se podem separar as rotações das deformações (Jones,R.,Wykes,C.,1989,p-68-74).:

$$\frac{\partial d_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial d_i}{\partial x_j} + \frac{\partial d_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial d_i}{\partial x_j} - \frac{\partial d_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.57a)$$

$$\frac{\partial d_i}{\partial x_j} = \varepsilon_{ij} + \omega_{ij} \quad (2.57b)$$

2.3.4 Medição de Deslocamentos através de Interferogramas

Dado um holograma contendo as informações do objeto antes e depois da deformação, a ordem da franja em um dado ponto no plano de visualização, similarmente as ordens das franjas de Moiré, é dada por (Jones,R.,Wykes,C.,1989,p-81-85):

$$N = \frac{\phi_0}{2\pi} = \frac{1}{\lambda} (n_0 - n_s) d \quad (2.58)$$

Que pode ser representado por $N\lambda = (n_i^o - n_i^s)d_i = C_i d_i$, $i=1,2,3$, onde n_i^o e n_i^s são os vetores unitários nas direções i . O termo $C_i = (n_i^o - n_i^s)$ é o vetor sensibilidade.

Partindo-se da equação do vetor de sensibilidade, derivando a equação do vetor de sensibilidade, calcula-se o espaçamento entre as franjas Δx_j , que é relacionado com as componentes de translação de corpo rígido chamadas de d_i , e os gradientes de deslocamento $\partial d_i / \partial x_j$ – equações 2.57 - através da equação (Jones,R.,Wykes,C.,1989,p-81-85):

$$\frac{\lambda}{\Delta x_j} = C_{i,j} d_i + C_i d_{i,j} \quad (2.59)$$

$$\text{Onde } C_{i,j} = \frac{\partial C_i}{\partial x_j} \text{ e } d_{i,j} = \frac{\partial d_i}{\partial x_j}$$

Expandindo a equação 2.59, em conjunto com a equação 2.58 permite o cálculo da componente de deslocamento d_i medindo-se em três direções independentes – 3 x $[N, \Delta x_2, \Delta x_3]$ – envolvendo o cálculo de **nove** coeficientes independentes C_i e $C_{i,j}$.

O espaçamento das franjas será medido na imagem plana enquanto Δx_i refere-se à coordenada plana do objeto. Visto de uma direção normal, a relação entre o espaçamento na imagem $(\Delta x_j)_{im}$ e o espaçamento no objeto $(\Delta x_j)_{obj}$ é dado por (Jones,R.,Wykes,C.,1989,p-81-85):

$$(\Delta x_j)_{im} = \frac{S_2}{S_1} (\Delta x_j)_{obj} \quad (2.60)$$

Onde S_1 e S_2 são as distâncias entre a lente e o objeto e lente e a imagem, respectivamente. Se as franjas são vistas de um ângulo θ (Jones,R.,Wykes,C.,1989):

$$(\Delta x_j)_{im} = \frac{S_2}{S_1} (\Delta x_j)_{obj} \cos \theta \quad (2.61)$$

2.4 *Electronic Speckle Pattern Correlation Interferometry (ESPI)*

ESPI é uma técnica de medição que utiliza basicamente um interferômetro a laser, uma câmera CCD e um processamento digital para gerar correlação de *speckles* com visualização através de um monitor. As imagens ao vivo das correlações de franjas dispõe uma visualização em tempo real e completo, onde cada franja representa um contorno do mensurando requerido. Muitos nomes foram utilizados para descrever a técnica como TV Holográfica, DSPI (*Digital Speckle Pattern Interferometry*), Holografia Eletro-óptica. No entanto, o nome ESPI continua o mais conhecido desde que foi utilizado por Butters e Leendertz, no início da década de 70 (Butters,J.N., Leendertz,J.A.,1972). A técnica ESPI cresceu rapidamente devido a necessidade de uma metodologia rápida e robusta para problemas como deformações, vibrações, tensões etc. Essa técnica se tornou proeminente nesse campo devido ao desenvolvimento de técnicas originadas da Interferometria Clássica e Interferometria Holográfica.

A Interferometria por Padrões de *Speckle* Clássica necessita de uma metodologia fotográfica para se gravar os interferogramas e em seguida combiná-los para dar origem aos mapas de franjas. Dessa forma, a metodologia fotográfica empregada exige acuracidade no posicionamento dos filmes fotográficos, sendo, além de trabalhoso e lento, suscetível a erros. No âmbito de se automatizar e facilitar o processo de correlação de imagens, utiliza-se um processamento de imagens por vídeo para se gerar correlação de franjas equivalentes às geradas no processo fotográfico. Esse método é conhecido como *ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry)* Interferometria Eletrônica. O tamanho mínimo de *speckles* é na faixa de 5 a 100 μ m, logo se pode usar uma câmera padrão de TV para gravar as imagens das franjas (Butters,J.N., Leendertz,J.A.,1971; Jones,R.,Wykes,C.,1989; Cloud,G.,1998).

A correlação de intensidade em ESPI é observada por um processo de Adição e Subtração de sinal de vídeo. No processo de subtração, o sinal de vídeo correspondente ao padrão de *speckle* da imagem plana é armazenado eletronicamente. É aplicada uma carga no objeto causando uma deformação e o sinal de vídeo *live* é subtraído do sinal armazenado anteriormente. O sinal de saída é filtrado por um filtro passa-alta e retificado, e de imediato, mostrado no monitor de TV onde as franjas de correlação podem ser observadas ao vivo (Jones,R.,Wykes,C.,1989; Cloud,G.,1998).

No processo de adição de sinal, o campo de luz correspondente aos dois estados (não deformado e deformado), é adicionado no foto catodo da câmera de TV. A câmera detecta a intensidade resultante da adição e o sinal é totalmente retificado e, assim como no caso de subtração, filtrado por um filtro passa alta. Da mesma forma, as franjas de correlação são observadas ao vivo no monitor de TV.

Uma configuração básica para os sistemas ESPI é ilustrada abaixo.

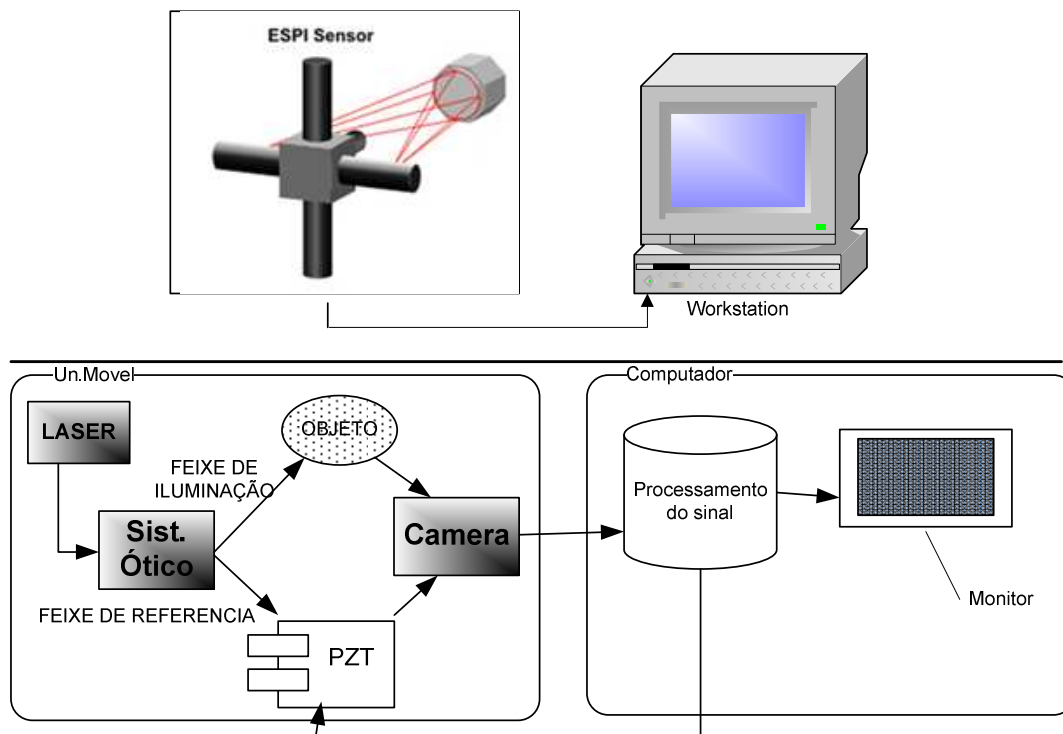


Figura 2.23- Configuração básica de um sistema ESPI.

2.4.1 O sistema de vídeo

Jones,R.,Wykes,C.(1989) p.166-172,aborda o sistema de vídeo para um sistema ESPI. Um sistema de vídeo converte uma imagem que é formada na lente da câmera de televisão em uma imagem equivalente na tela do monitor da TV. Uma câmera analógica possui uma lente plana com uma película foto sensível que gera uma carga elétrica proporcional a intensidade da imagem. A lente plana é “escaneada” horizontalmente (em um número de linhas normalmente

625) por um feixe de elétrons resultando em um sinal que varia no tempo de acordo com a intensidade da imagem. Esse é o sinal de vídeo. Uma câmera digital consiste em um vetor de foto detectores que é “escaneado” eletronicamente para fornecer um sinal similar. Após amplificar e adicionar os pulsos, o sinal da câmera é utilizado para modular um feixe de elétrons que mapeia a tela de um monitor de televisão para que o brilho da tela varie a mesma proporção em que a imagem original varia. Idealmente, o brilho do monitor deveria variar linearmente com a intensidade da imagem original. A relação exata entre a intensidade do monitor e a imagem original é uma complicada função do processamento eletrônico assim como o controle de contraste e brilho do monitor de televisão. Na análise da imagem no vídeo das franjas de correlação de *speckles*, será assumido que:

- A voltagem de saída da câmera é linearmente proporcional a intensidade da imagem;
- O brilho do monitor é proporcional a voltagem de saída da câmera;

Dessa forma, tem-se um bom modelo qualitativo do processo.

2.4.2 Formação de franjas por subtração de sinal de vídeo

O anteparo da câmera de televisão está localizado no plano da imagem do interferômetro. Sob essa condição o sinal de saída (*output*) da câmera de televisão é obtido quando o objeto se encontra no seu estado inicial e seu sinal é gravado; isso é feito normalmente utilizando um armazenamento de tomadas digital, embora no passado, isso fora feito com a utilização de gravadores de vídeo tapes e discos. O objeto é então deformado de seu estado inicial e o sinal da câmera ao vivo é subtraído eletronicamente do sinal armazenado anteriormente. Neste instante os padrões de franjas são mostrados no monitor. Na imagem resultante, onde houve correlação de padrões de *speckles* a resultante será zero, enquanto que nas áreas onde não houve correlação, a resultante será um sinal diferente de zero. Pode-se observar isso através do equacionamento abaixo dados I_1 e I_2 antes e depois da deformação, respectivamente (Jones,R.,Wykes,C.1989; Leendertz, J. A.,1970):

$$I_1 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \psi \quad (2.62)$$

$$I_2 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos (\psi + \Delta \phi) \quad (2.63)$$

Se o sinal de saída da câmera V1 e V2 são proporcionais a intensidade da imagem de entrada, então o sinal subtraído será dado por:

$$V_s = (V_1 - V_2) \propto (I_1 - I_2) = 2\sqrt{I_1 I_2} [\cos \psi - \cos (\psi + \Delta \phi)] \quad (2.64)$$

$$V_s = 4\sqrt{I_1 I_2} \sin \left(\psi + \frac{1}{2} \Delta \phi \right) \sin \left(\frac{1}{2} \Delta \phi \right) \quad (2.65)$$

O sinal possui valores positivos e negativos. O monitor de televisão, irá, portanto, mostrar áreas escuras onde há sinais negativos; para se evitar a perda de sinal, V_s é retificado antes de ser mostrado no monitor. O brilho no monitor é então proporcional a $|V_s|$, para tanto tem-se o brilho B em um dado ponto na imagem do monitor dado por

$$B = 4K [I_1 I_2 \sin^2 \left(\psi + \frac{1}{2} \Delta \phi \right) \sin^2 \left(\frac{1}{2} \Delta \phi \right)]^{1/2} \quad (2.66a)$$

Onde K é uma constante.

Se o brilho B é uma média ao longo de uma linha de constante $\Delta \phi$, pode-se observar que os valores de B variam entre um mínimo e um máximo $B_{\max}$ e $B_{\min}$ dados por:

$$B_{\max} = 2K \sqrt{I_1 I_2}, \quad \Delta \phi = (2n + 1)\pi, \quad n = 0, 1, 2 \quad (2.66b)$$

$$B_{\min} = 0, \quad \Delta \phi = 2n\pi, \quad n = 0, 1, 2 \quad (2.66c)$$

Filtração por filtros passa-alta do sinal é utilizada para melhorar a visibilidade das franjas removendo ruídos em baixas frequências juntamente com variações em meio à intensidade de *speckles* e é normalmente utilizado para melhorar a claridade das franjas (Jones, R., Wykes, C. 1989).

Comparando as formas de franjas obtidas neste processo, verifica-se que são idênticas em forma as obtidas utilizando a técnica de correlação fotográfica.

2.4.3 Formação de franjas por adição de sinal de vídeo.

Da mesma forma para a formação por subtração de vídeo, na formação de franjas por adição de sinal de vídeo o anteparo da câmera é colocado no plano da imagem do interferômetro, mas os dois padrões de *speckles* que derivam do objeto nos seus dois estados – não deformado e deformado - são adicionados juntos no foto catodo da câmera. As duas imagens não precisam ser superpostas simultaneamente desde que o tubo da câmera possua uma característica persistente (~0.1s para um tubo padrão), logo, a voltagem de saída da câmera será proporcional às intensidades adicionadas se o tempo entre as duas tomadas é menor que o tempo persistente apropriado. Essa técnica é empregada quando um laser duplamente pulsado é utilizado para a observação da media das franjas no tempo (Jones,R.,Wykes,C.1989).

Outra importante aplicação é a observação de padrões de franjas com dois comprimentos de onda diferentes onde o objeto é iluminado simultaneamente por ondas de comprimentos de onda diferentes.

Quando dois padrões de *speckle* são adicionados, áreas de máxima correlação possui *speckles* de máximo contraste e, a medida que a correlação decresce, o contraste do *speckle* diminui. Isso se reduz a um valor mínimo, mas não zero, onde os padrões não possuem correlação. Isso é verificado como segue (Jones,R.,Wykes,C.1989):

A voltagem V_a é proporcional a $I_1 + I_2$ e é dada por:

$$V_a \propto (I_1 + I_2) = 2I_1 + 2I_2 + 4\sqrt{I_1 I_2} \cos(\psi + \frac{1}{2}\Delta\phi) \cos(\frac{1}{2}\Delta\phi) \quad (2.67)$$

O contraste do padrão de *speckle* pode ser definido como o desvio padrão da intensidade. Para uma linha de constante $\Delta\phi$, verifica-se que:

$$\sigma_{12} = 2[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 8\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle \cos^2(\frac{1}{2}\Delta\phi)]^{1/2} \quad (2.68)$$

Onde σ_1 e σ_2 são desvios padrões de I_1 e I_2 . Verifica-se que σ_{12} varia entre um máximo e um mínimo dados por:

$$\begin{aligned} [\sigma_{12}]_{\max} &= 2[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2I_1 I_2]^{1/2}, \quad \Delta\phi = 2n\pi, \quad n = 0,1,2 \\ [\sigma_{12}]_{\min} &= 2[\sigma_1^2 + \sigma_2^2]^{1/2} \quad \Delta\phi = (2n+1)\pi, \quad n = 0,1,2 \end{aligned} \quad (2.69)$$

O contraste das intensidades adicionadas varia de um valor médio ao longo da linha de constante $\Delta\phi$ sendo o mesmo para todos $\Delta\phi$, e é dado por:

$$\langle L1 + L2 \rangle = 2\langle I_1 \rangle + 2\langle I_2 \rangle \quad (2.70)$$

Portanto, quando a soma dos dois padrões de *speckle* é visualizada no monitor de TV, a intensidade média é constante, e a variação em correlação é mostrada como a variação no contraste do padrão de *speckle*, mas não na sua intensidade. A componente DC do sinal é removida com um filtro, e esse sinal é então retificado. O brilho resultante do monitor pode ser então considerado proporcional a raiz quadrada de σ^2 , logo:

$$B = K[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle \cos^2 \frac{1}{2} \Delta\phi]^{1/2} \quad (2.71)$$

Portanto, a intensidade da imagem do monitor recai entre um máximo e mínimo e cujos valores são dados pelas equações (2.69) e (2.71). Comparando essas equações com as equações (2.66a) e (2.66b), (2.66c) verifica-se que as franjas mínimas observadas com a subtração correspondem às mesmas franjas obtidas com a adição. Pode ser observado também que as franjas da subtração possuem melhor visibilidade que as de adição, já que o valor de mínimo é zero, enquanto o valor de mínimo de adição não é zero. Entretanto, quando adição é usada para observar franjas, um armazenamento de imagens de vídeo não é requerido, fazendo do sistema mais simples e menos caro (Jones, R., Wykes, C. 1989).

2.4.4 Resolução espacial do sistema de vídeo.

A habilidade de resolução de detalhes finos de um sistema de vídeo é claramente limitada. Considera-se aqui, que um monitor de TV é uma matriz e cada espaço da matriz denomina-se Quadro. Logo, se um quadro preto e branco é captado pelo anteparo da câmera, um quadro equivalente será observado no monitor. Como o espaçamento dos quadros é reduzido, o contraste do quadro é reduzido, e quando o quadro é suficientemente pequeno, nenhuma estrutura desse quadro será observada no monitor. Um padrão de *speckle* pode ser descrito como a soma de um

conjunto de grânulos de frequências espaciais variáveis; a frequência mais baixa é zero e o limite superior é determinado pelo tamanho da abertura utilizada nas lentes de imagem. Idealmente, o sistema de vídeo deveria ser capaz de mostrar todas as frequências. A resposta em frequência de uma câmera digital é determinada primeiramente pelo tamanho e espaçamento dos fotodetectores individuais e em segundo pela resposta em frequência do circuito de processamento. O critério normal para a amostragem digital é que a **máxima frequência no sinal** deveria ser **menor ou igual que a metade da máxima frequência do sistema de amostragem**. Para satisfazer essa condição, o espaçamento entre os elementos deve ser tal que corresponda à metade do comprimento de onda da maior frequência espacial no padrão de *speckle* (esse espaçamento é normalmente em torno de $20\mu\text{m}$ correspondendo a frequência espacial de 50mm^{-1}). Não é, no entanto, estritamente necessário para satisfazer essa condição para um sistema ESPI, porque frequências mais altas que essas sofrem o fenômeno de *aliasing* e tais frequências podem exercer uma contribuição útil ao sinal (Jones,R.,Wykes,C.1989; Cloud,G.,1998).

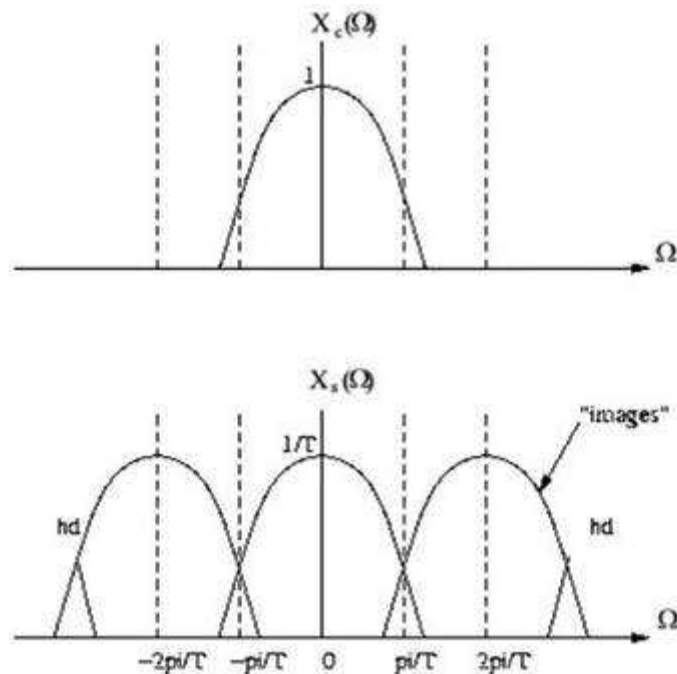


Figura 2.24- Fenômeno do aliasing: sobreposição de ondas;

2.5 Interferometria com Mudança de Fase

A idéia básica da mudança de fase para melhorar a interferometria é inserir entre um dos caminhos ópticos um equipamento cuja mudança de fase seja conhecida. Esse procedimento permite que a fase em um determinado ponto seja deduzida medindo-se somente a intensidade no ponto citado (Hongwei, G., Zhan Z., Mingyi, C., 2007).

Considerando um objeto sendo deformado de uma distância d_z , a saída do detector antes da deformação é dada por I_1 . Após da deformação, a saída do detector será de I_2 e as franjas de interferência sofrem um movimento relativo ao detector, dado que as ondas do objeto sofrem uma defasagem de $\phi_2 = 4 \pi d_z / \lambda$ (Cloud,G.1998). A relação matemática será:

$$I_2 = \frac{I_{max} + I_1}{2} + \frac{I_{max} - I_1}{2} \cos \phi_2 \quad (2.72)$$

Tem-se, portanto, duas variáveis ϕ_2 e I_{max} impossibilitando a solução da equação, sendo necessária outra medição com mudança de fase conhecida, por exemplo $-\pi/4$ resultando em uma segunda equação:

$$I_3 = \frac{I_{max} + I_1}{2} + \frac{I_{max} - I_1}{2} \cos(\phi_2 - \frac{\pi}{4}) \quad (2.73)$$

Considerando ainda que em situações reais a irradiância mínima I_{min} não necessariamente corresponde no detector inicialmente sobre uma franja totalmente escura. A medição da deformação de um objeto é calculada na medida em que se mudam as fases, resultando em dados em termos de mudanças de fases. As equações resultam em três incógnitas: I_{min} , I_{max} e ϕ_2 . São necessárias três equações para a solução e, portanto, três observações: a primeira e duas outras com mudanças de fases conhecidas (Cloud,G.1998).

Outro porém reside quando o objeto é submetido a um deslocamento maior que $\lambda/2$. Para valores entre $\lambda/2 < \phi < \lambda$ resultando em valores entre $\pi < \phi < 2\pi$, os valores das equações devem ser cuidadosamente manipuladas em termos dos sinais. Deslocamentos maiores são calculados através de um passo conhecido como Desdobramento de fase (*Phase Unwrapping*) (HARIHARAN, P., OREB, B. F., and BROWN,1982).

A forma mais comum e direta é a utilização de um transdutor piezo-elétrico (PZT) no feixe de referência para gerar a mudança de fase como ilustrado na figura 2.25.

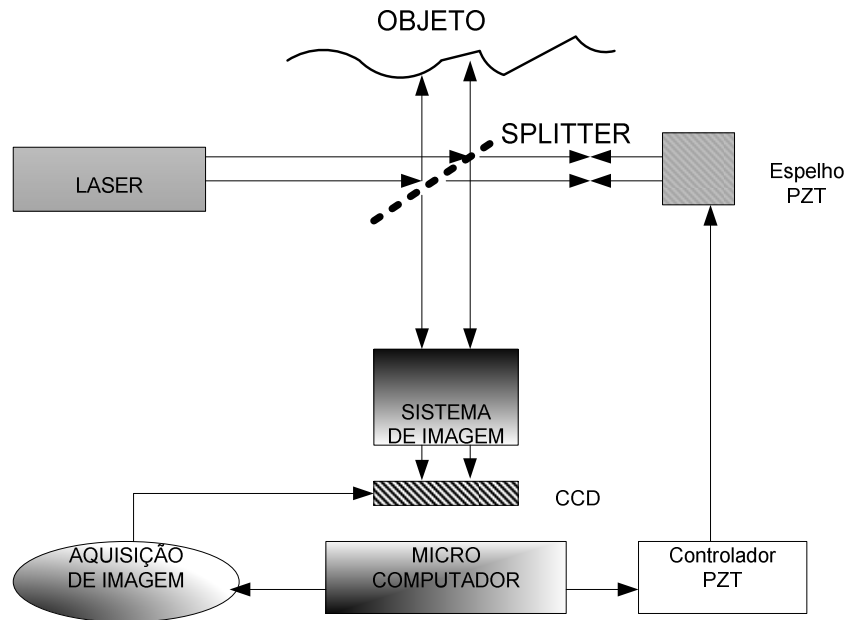


Figura 2.25 - Desenho esquemático de um ESPI utilizando um espelho PZT para mudança de fases.

2.5.1 Técnica dos três passos.

A equação de intensidade abaixo possui três incógnitas a serem determinadas e que são solucionadas através de um sistema linear (Cloud,G.1998).

$$I = I_R + I_0 + 2\sqrt{I_R I_0} \cos \phi \quad (2.74)$$

As variáveis desconhecidas são a irradiância do feixe de referencia I_R , a irradiância do feixe do objeto I_0 e a diferença de fase ϕ . Faz-se necessária a gravação de dados de franjas para se reconstruir a onda. A fase pode ser calculada através de uma mudança de fase conhecida de α_i por exposição. Os valores mais comuns de incrementos de fase são $\Delta=\pi/2$ e $\Delta = 2\pi/3$;

Caso o incremento seja de $\pi/2$, então as fases serão $\alpha = \pi/4, 3\pi/4$ e $5\pi/4$. Dessa forma é montado o sistema linear a seguir:

$$I_1(x, y) = I_0(x, y) \left(1 + \gamma \cos \left[\phi(x, y) + \frac{1}{4}\pi \right] \right) \quad (2.75)$$

$$I_2(x, y) = I_0(x, y) \left(1 + \gamma \cos \left[\phi(x, y) + \frac{3}{4}\pi \right] \right) \quad (2.76)$$

$$I_3(x, y) = I_0(x, y) \left(1 + \gamma \cos \left[\phi(x, y) + \frac{5}{4}\pi \right] \right) \quad (2.77)$$

A fase em cada ponto é dada por:

$$\phi(x, y) = \arctan \left(\frac{I_3(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_2(x, y)} \right) \quad (2.78)$$

A modulação da intensidade é:

$$\gamma(x, y) = \frac{\sqrt{[I_1(x, y) - I_2(x, y)]^2 + [I_2(x, y) - I_3(x, y)]^2}}{2I_0} \quad (2.79)$$

Caso o incremento seja de 120° , tem-se os ângulos $\alpha_i = -2\pi/3, 0$ e $2\pi/3$ com $\Delta = 2\pi/3$.

Para este caso, o sistema linear será similar ao anterior com as fases e modulação da intensidade dados por:

$$\phi(x, y) = \arctan \left(\frac{\sqrt{3}(I_3(x, y) - I_2(x, y))}{2I_1(x, y) - I_2(x, y) - I_3(x, y)} \right) \quad (2.80)$$

$$\gamma(x, y) = \frac{\sqrt{3[I_3(x, y) - I_2(x, y)]^2 + [2I_1(x, y) - I_2(x, y) - I_3(x, y)]^2}}{2I_0} \quad (2.81)$$

Similarmente a esta técnica, há ainda duas outras técnicas empregadas para a mudança de fase: Técnica dos Quatro passos, que além do mesmo procedimento anterior permite remover os ruídos do efeito *speckle* através de um *pipeline* das imagens processadas.

Técnica de *Carré*: assume um incremento de fase linear em função do tempo e constante resultando em um sistema linear de quatro equações, como o anterior. Além disso, o equipamento de mudança de fase não precisa ser calibrado, como as duas técnicas anteriores (Cloud, G. 1998).

2.5.2 Desdobramento de Fases

Devido às características do cálculo de *arco tangente* as equações de cálculo de mudança de fase são satisfeitas em termos de módulo π . Para valores acima, módulo 2π , os sinais de seno e cosseno devem ser examinados. A tabela abaixo mostra como a fase é determinada examinando os sinais após o cálculo da fase em módulo $\pi/2$ utilizando-se valores absolutos no numerador e denominador para resultar num cálculo módulo 2π . Uma vez calculada a fase em termos de módulo 2π , as ambigüidades de fases podem ser removidas comparando-se as diferenças de fases entre os *pixels* adjacentes. Foi estabelecido por usuários dessa metodologia que para uma remoção confiável de descontinuidades, a fase não deve mudar mais que π entre os *pixels* adjacentes (Jones,R.,Wykes,C.1989; Cloud,G.1998; Hariharan, P., Oreb, B. F., and Brown,1982).

Numerador	Denominador	Ajuste de Fase	Faixa de valores
$\sin \phi$	$\cos \phi$	-	-
+	+	Φ	$-\frac{1}{2}\pi$
+	-	$\pi - \phi$	$\frac{1}{2}\pi - \pi$
-	-	$\pi + \phi$	$\pi - \frac{3}{2}\pi$
-	+	$2\pi - \phi$	$\frac{3}{2}\pi - 2\pi$
0	Qualquer	Π	Π
+	0	$\frac{1}{2}\pi$	$\frac{1}{2}\pi$
-	0	$\frac{3}{4}\pi$	$\frac{3}{2}\pi$

Tabela 2-1 - Determinação de fases módulo 2π

2.5.3 Conversão: Mudança de Fase x Deslocamento

Uma vez conhecida a mudança de fase, o correspondente deslocamento pode ser determinado através da informação de fase. O deslocamento da superfície d_z em um dado ponto (x,y) é dado pela equação (Jones,R.,Wykes,C.1989; Cloud,G.1998):

$$d_z(x,y) = \frac{\Delta\phi(x,y)\lambda}{2\pi(\cos\theta_i + \cos\theta_v)} \quad (2.82)$$

Onde λ : comprimento de onda da iluminação;

ϕ_i e ϕ_v : são os ângulos de iluminação e visão com relação a superfície normal;

Portanto, como resultado das deduções das intensidades em função da mudança de fases das ondas não conhecidas, tem-se a relação dos deslocamentos no ponto analisado em termos de ângulos de iluminação conhecidos, levando a cobrir todas as variáveis necessárias para a partir de então, estruturar o algoritmo de varredura da imagem digitalizada do sistema ESPI.

3 Desenvolvimento

Este capítulo apresenta as ferramentas utilizadas nas simulações e ensaios em laboratório, além das características dos materiais ensaiados.

Primeiramente, é apresentada a mesa de ensaios inicialmente adaptada para realizar os testes estáticos aplicando-se tensões pré-determinadas em uma placa com orifício com a finalidade de calibração e pré-testes. Esse aparato tem como características a robustez e uma faixa de carga razoável (0~60kN). No entanto, há alguns pontos fracos para este tipo de aplicação.

Em seguida, é apresentada a solução propriamente dita, a Interferometria Eletrônica. Essa solução tem como característica principal o ensaio não destrutível e visualização em tempo real dos campos de deformação sendo necessários alguns pré-requisitos para o correto *set-up* e funcionamento.

Finalizando o Capítulo, exploram-se as características das peças ensaiadas em termos geométricos e materiais.

3.1 Mesa de Carga

O equipamento para aplicação das cargas é uma mesa de carga da marca Shenk® de fabricação alemã. A concepção original da máquina é para ensaios de fadiga sendo que para a aplicação, foram utilizadas somente cargas estáticas. O equipamento possui as seguintes características:

- Pontos fortes
 - o Faixa de carga disponível: Compressão 60kN, Tração 30kN.
 - o Dimensões contribuintes para o campo de visão
 - o Espaço físico para instalação da câmera
 - o Rápido setup para troca da peça ensaiada
 - o Robustez
 - o Célula de carga acoplada ao sistema permitindo a visualização das cargas aplicadas.
 - o Facilidade de operação.
- Pontos Fracos
 - o Falta de exatidão da carga aplicada
 - o Excesso de vibrações influenciando nos padrões de *speckles*
 - o Painel de controle distante da mesa de carga (ideal duas pessoas para operação)
 - o Adaptada para ensaios estáticos, não sendo esta a funcionalidade original da máquina – máquina originada para ensaios de fadiga.

Depois de feito toda a montagem do equipamento sobre a mesa de carga, e posicionada a câmera em frente a peça, as cargas são aplicadas.

A máquina adaptada é operada aplicando-se cargas estáticas sobre a peça ensaiada. O comando é feito a partir de um painel de controle distante cerca de 5 metros, sendo necessárias duas pessoas.

A máquina possui um sistema de amortecimento nas bases da máquina que absorve parte das vibrações. Células de carga montadas acopladas a máquina permitem a visualização dos valores das cargas.

A figura 3.1 apresenta um croqui da máquina utilizada para aplicação de cargas mecânicas estáticas em uma placa plana com orifício. Este procedimento trata da primeira etapa do projeto sendo necessário para a calibração, pré-testes e validação da solução.

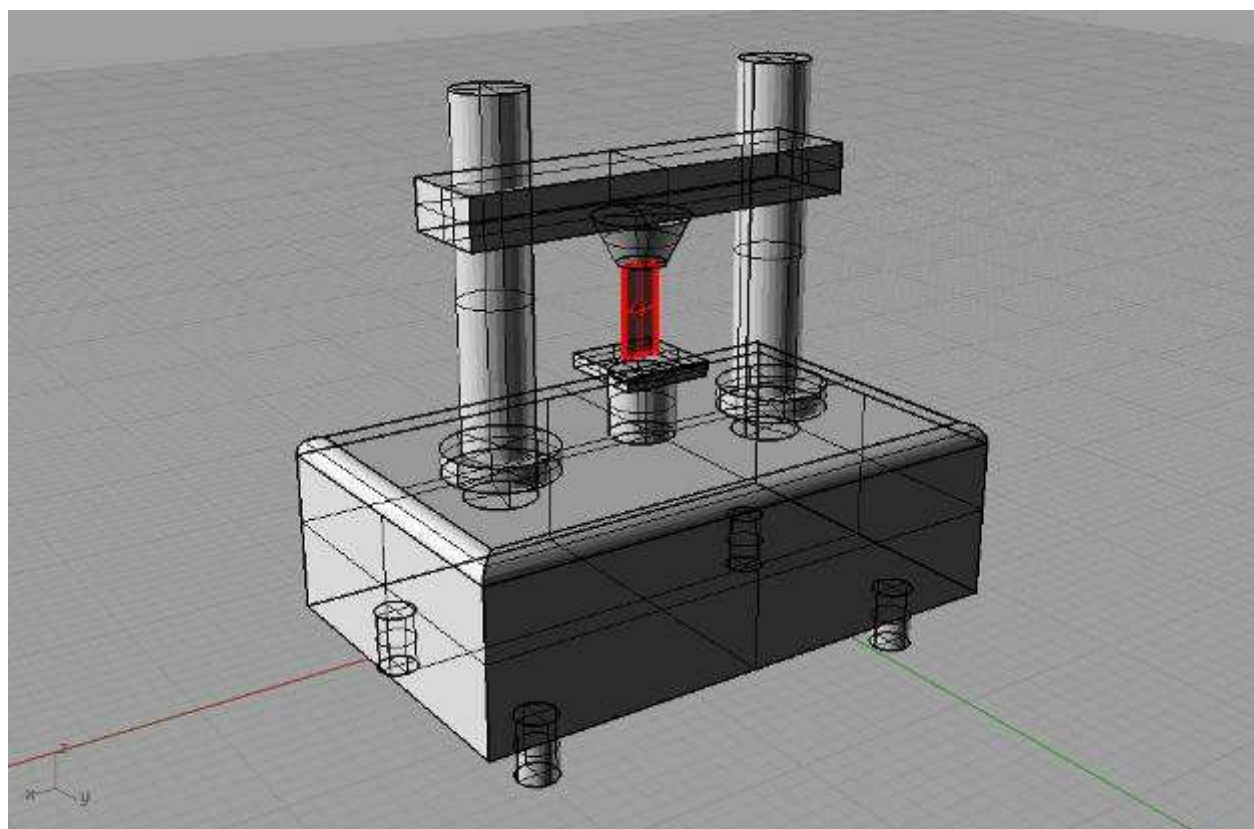


Figura 3.1 – Mesa de Carga Shenk®

3.2 3D ESPI

O sistema utilizado para aquisição e processamento de imagens é o 3D- ESPI Q-300[®] da Dantec Dynamics GmbH. O sistema é montado sobre uma plataforma compacta e portátil permitindo sua utilização em diversas configurações. Sua principal característica é o não contato, ensaios não destrutíveis e a não necessidade de marcação na peça. A câmera utilizada para recepção das imagens é uma câmera CCD de resolução 1380x1035 pixels. O sistema é modular e permite diferentes configurações através dos conjuntos de braços de iluminação do Laser com diferentes comprimentos e sensibilidades. Dessa forma, pode-se operar as medições em 1D, 2D ou 3D. As lentes de *zoom* permitem a adaptação a diferentes tamanhos de objetos e geometrias.

O software de processamento das imagens é o ISTRa que utiliza o sistema operacional Windows 2000[®] / XP[®] que também processa a calibração do equipamento.

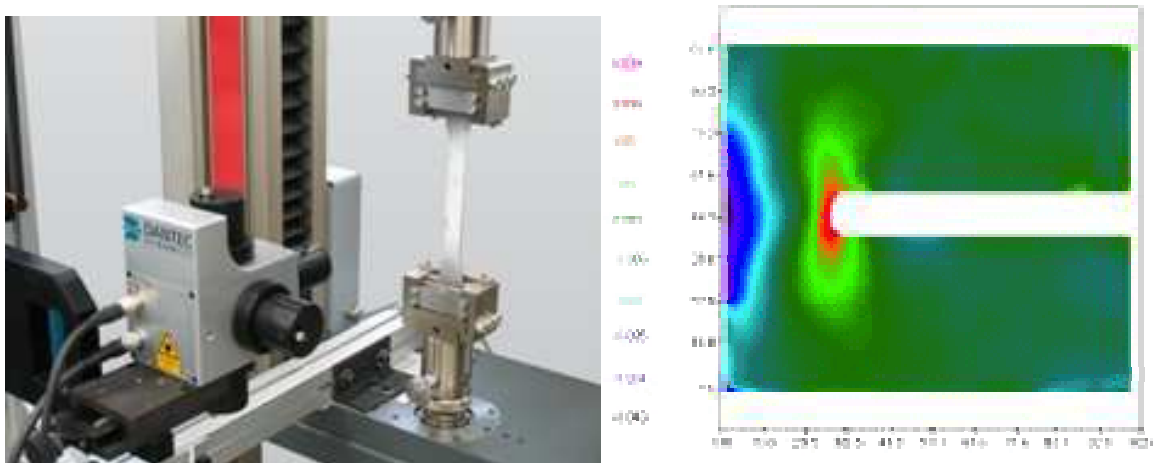


Figura 3.2- Dantec 3D ESPI – Q300

As principais características do equipamento seguem no apêndice A.

Na língua portuguesa ainda não há uma tradução amplamente utilizada no campo técnico muito menos na linguagem coloquial da técnica ESPI, portanto, nada mais correto que utilizar a maneira original do nome. Como o nome mesmo diz, trata-se de uma técnica eletrônica e toda lógica de funcionamento do algoritmo que o compõe não será explanado no presente trabalho. No entanto, o seu princípio de funcionamento é útil que se explore como segue.

Os principais itens que compõe um sistema ESPI são:

- Luz Laser para iluminação
- Câmera CCD
- Sistema computacional para armazenamento das imagens

Dessa forma, utiliza Laser como ferramenta para medições de deformações utilizando comprimentos de onda menor que $1\mu\text{m}$ que permitem a detecção de micro formações nas superfícies.

Utilizando uma onda de comprimento conhecido e deslocamento de fase conhecido pode-se analiticamente verificar e controlar a intensidade como ilustrado a seguir:

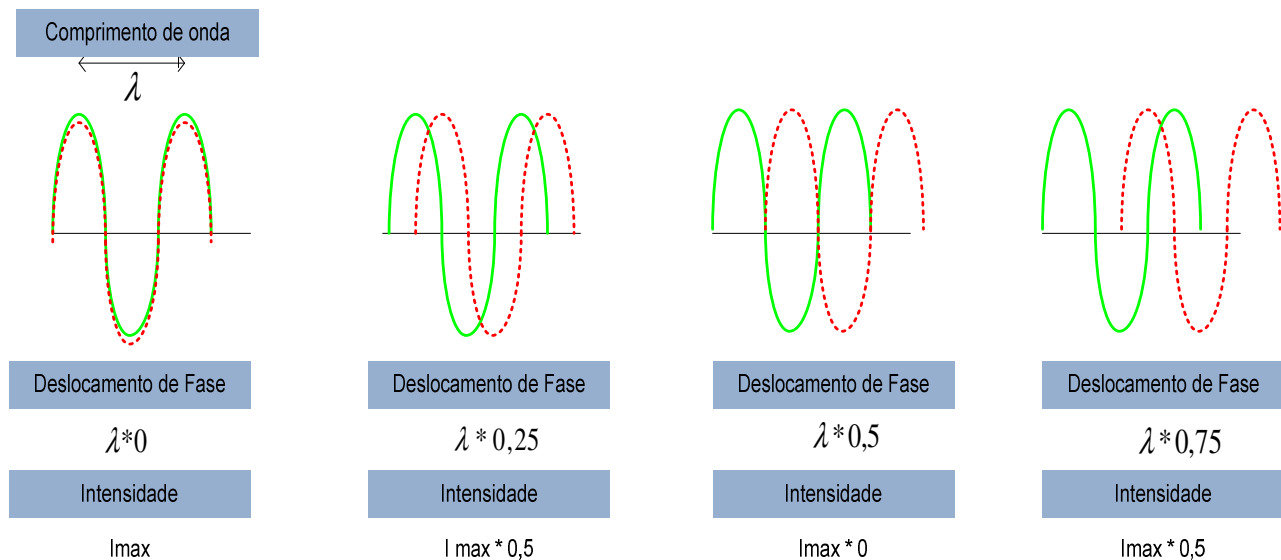


Figura 3.3 - Interferometria: correlação entre deslocamento de fase e intensidade do *speckle*.

O *setup* do sistema se dá primeiramente através do conhecimento das variáveis como distância entre a lente e o objeto (d), comprimento da onda utilizada (λ) e valor do deslocamento de fase (ϕ). Neste caso, o valor deslocado é controlado através de sensores piezo-elétricos. O feixe laser deve ser dividido entre o feixe que incide na superfície do objeto e o feixe de referência, ou seja, o feixe que não sofreu desvios. Aplicando-se cargas no objeto, as micro estruturas da sua superfície serão deformadas deslocando o feixe incidente. Esse deslocamento é detectado pela câmera gerando as franjas dos *speckles*.

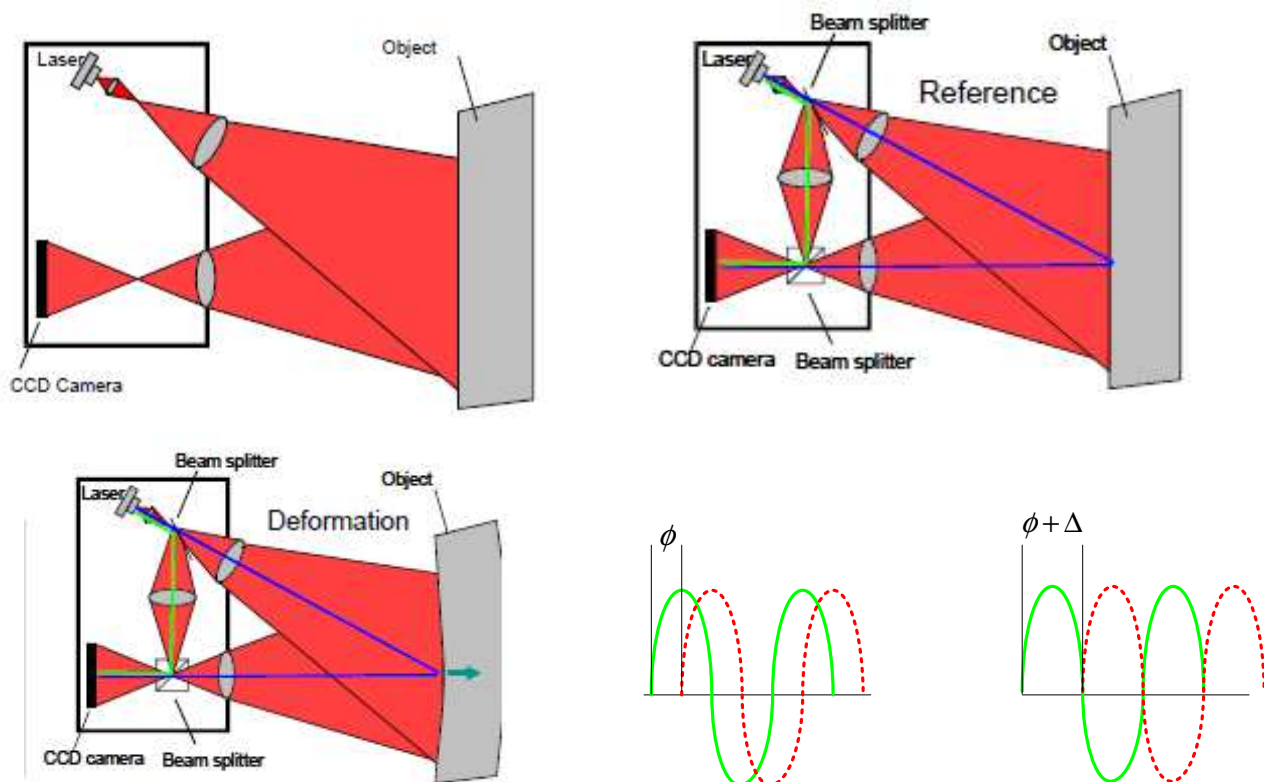


Figura 3.4 –Setup do sistema ESPI

O resultado da deformação assistida do objeto sob iluminação a Laser gera franjas do padrão de *speckles* – figura 3.9.

Como visto na Figura 3.7, o deslocamento de fase gera intensidades diferentes dos *speckles*. Essas diferentes intensidades de *speckles* geradas no padrão das franjas é denominado Correlação de franjas. As franjas são compostas de *speckles* de mesma intensidade compondo perfis que representam pontos de mesmo deslocamento gerado pela aplicação das cargas. Dessas correlações de franjas não é possível precisar a direção de deslocamento nem informações quantitativas entre franjas (Figura 3.9).

Dessa forma é necessária uma metodologia de processamento de imagens que parte dos deslocamentos de fases conhecidos e carga aplicada para então relacionar as intensidades dos *speckles* com os ângulos de deslocamento entre o feixe incidente e o feixe de referência: Processo de Deslocamento de Fases (conhecidas), Figura 3.10.

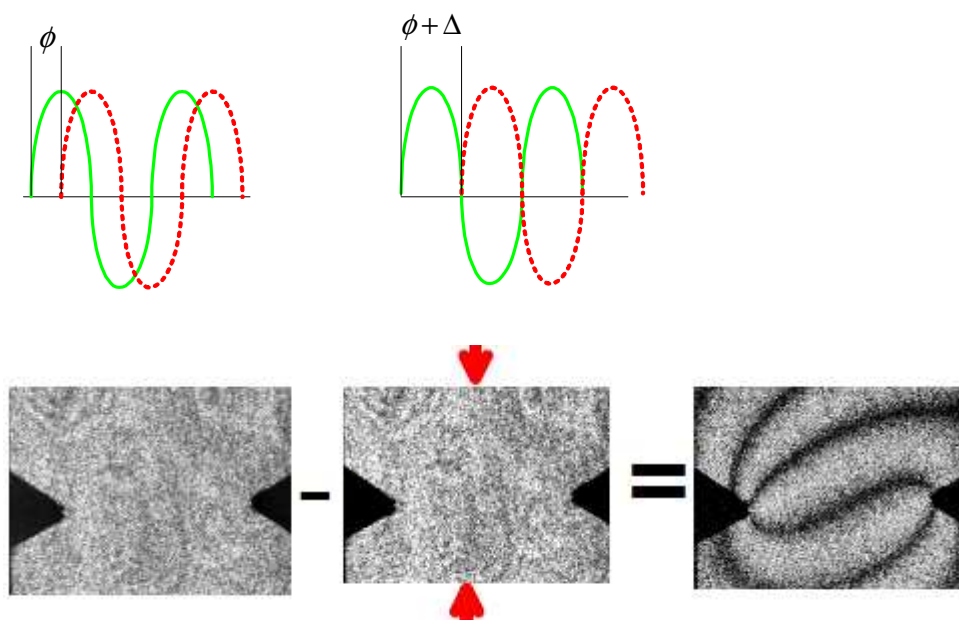


Figura 3.5 - Influência da deformação e formação das Franjas.

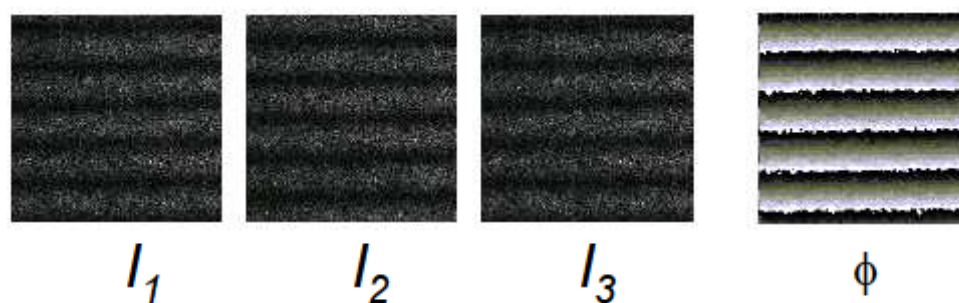


Figura 3.6 - Algoritmo de deslocamento de fases. Mínimo de três imagens com diferentes comprimentos de passos ópticos são adquiridas

Após o deslocamento de fases, chega-se a um sistema linear com três variáveis. Por esta razão, o método mais utilizado é o método dos Três Passos, obviamente para a resolução do sistema linear de três variáveis (3.1).

$$\begin{aligned} I_1 &= a + b \cdot \cos(\phi) \\ I_2 &= a + b \cdot \cos(\phi + \Delta) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} I_3 &= a + b \cdot \cos(\phi + 2\Delta) \\ \phi &= \arctan(I_1, I_2, I_3, \Delta) \end{aligned} \quad (3.2)$$

As variáveis das equações 3.1 e 3.2 são:

Onde as variáveis são:

- a intensidade de fundo
- b modulação
- ϕ fase
- Δ deslocamento de fase conhecido

Com os três mapas de intensidade, pode-se calcular a fase ϕ em cada pixel da câmera através da equação 3.2 e como resultado obtém-se o mapa de fase (Figura 3.10). Com o mapa de fase, tem-se a informação de direção de deslocamento e a resolução de sub-franjas.

O próximo passo é o Desdobramento do mapa de fases que é composto dos seguintes passos:

- Definição do ponto de partida (interativamente e depende do conhecimento prévio do ensaio, pois se deve escolher o ponto onde houve o mínimo deslocamento);
- Encontrar as descontinuidades (feito pelo algoritmo que verifica as descontinuidades pixel a pixel detectando as transições de franjas);
- Adiciona um *offset* ($n*2\pi$) para cada passagem de descontinuidade (algoritmo);

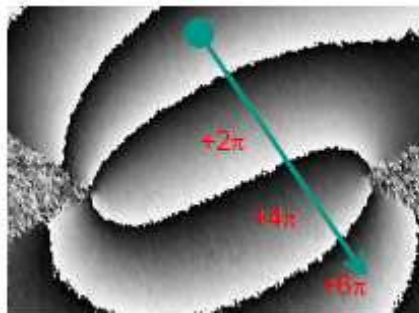


Figura 3.7– Procedimento de desdobramento.

A fim de facilitar a varredura do software durante o procedimento deve-se eliminar regiões que podem gerar ruídos e que não influenciam o resultado requerido. Isso deve ser feito pelo usuário que deve limitar a região de interesse. Este procedimento pode ser aparentemente inútil porém é de grande utilidade para o algoritmo que se limitara as regiões mais uniformes em termos de resolução do mapa de fases (Figura 3.12).

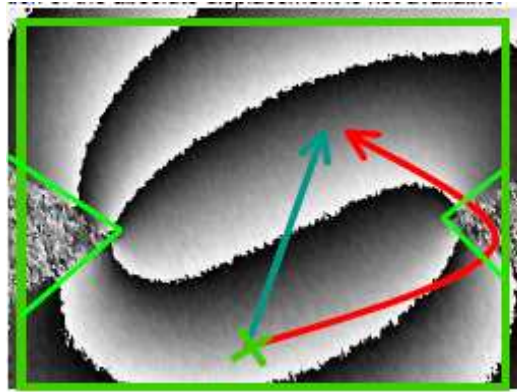


Figura 3.8– Procedimento de desdobramento de fases: seleção da área de interesse.

O resultado é um mapa de fases contínuo mostrado na figura 3.13 abaixo.

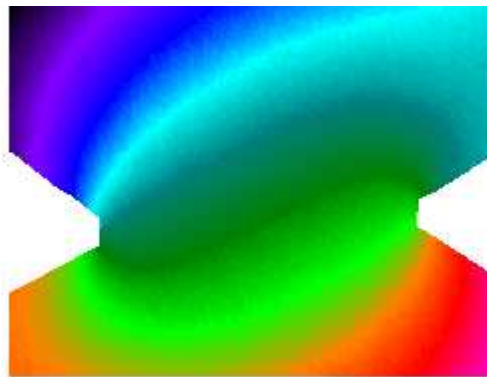


Figura 3.9 – Resultado do algoritmo: mapa de fases contínuo.

O próximo passo é determinar o mapa de deslocamentos a partir do mapa de franjas desdobradas (Fig.3.13). Para isso é necessário saber o Fator de Conversão de Franjas para Deslocamentos. Esse fator é chamado de **sensibilidade**. Porém, o resultado final deve conter as componentes em 3D, portanto deve-se transpor a análise para um resultado em termos de mapa de deslocamentos 3D. Para a geometria 3D *out-of-plane* os vetores iluminação e sensibilidade são observados na Figura 3.14 e para geometria *in-plane* na Figura 3.15.

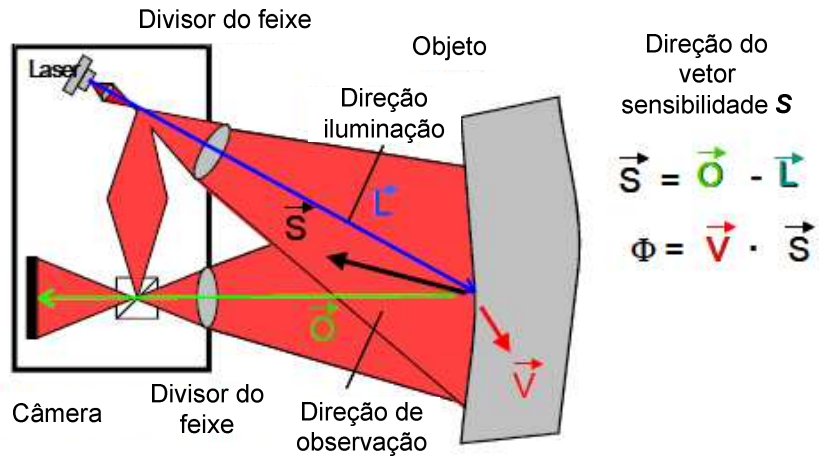


Figura 3.10– Geometria out-of-plane.

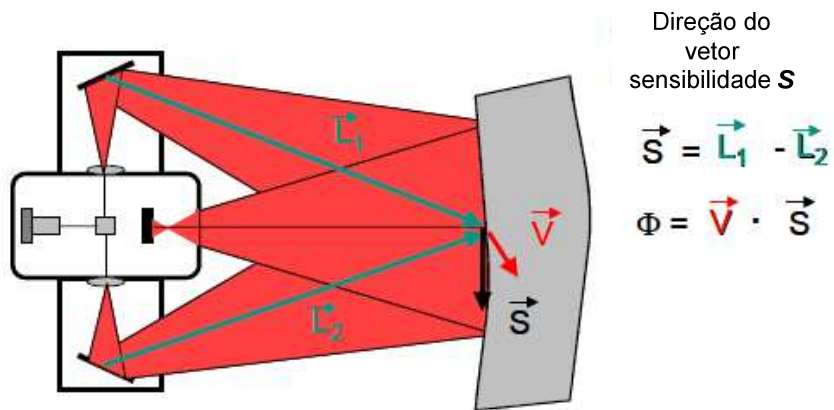


Figura 3.11– Geometria in-plane.

Diferentes direções de iluminação resultam em diferentes direções de sensibilidade. Três direções de sensibilidade independentes permitem o cálculo dos campos de deslocamentos das três componentes dimensionais (x, y e z). A Figura 3.16 mostra o esquemático da configuração do Q300 e as equações (3.3), que fazem a correlação entre as fases e o campo de deslocamentos.

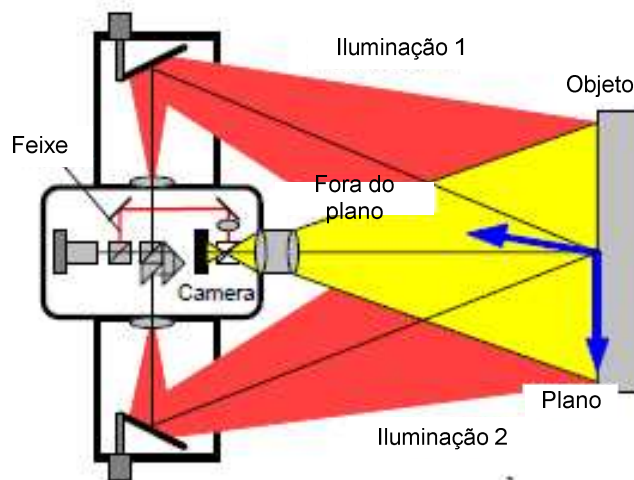


Figura 3.12– Configuração para medições das componentes das três dimensões.

3.3 Características da Peça

O presente trabalho se divide em duas etapas. A primeira etapa consiste nos testes em chapas planas com orifício para validação da metodologia devido às geometrias mais simples, fácil de reproduzir em simulação em Pro-Mechanica, e não necessidade de customização dos elementos de fixação da placa na mesa de carga. Portanto os resultados apresentados serão com base nos ensaios utilizando a placa com orifício. O orifício foi considerado de modo a inserir Tensões Residuais na placa e melhorar a análise.

A segunda etapa será o ensaio nas Bielas do fabricante ThyssenKrupp, fabricadas pelo processo de forjamento. Para este ensaio foi necessário a customização dos braços de fixação da biela na mesa de carga usinado no mesmo material da biela levando-se em conta as geometrias necessárias a não influenciar nos resultados garantindo principalmente que não haja desconexão de franjas, um dos principais problemas na análise por ESPI.

A placa plana é de aço SAE 1045. As propriedades do aço estão a seguir.

3.3.1 Propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais utilizados seguem nas tabelas 3.1 e 3.2.

Elementos	Peso %
C – Carbono	0.43-0.50
Mn – Manganês	0.60-0.90
P – Fósforo	0.04 máximo
S – Enxofre	0.05 máximo

Tabela 3-1– composição química aço SAE 1045 (efunda.com)

Propriedades		Condições	
		T(°C)	Tratamento
Densidade ($\times 1000 \text{ kg/m}^3$)	7.7-8.03	25	
Taxa Poisson	0.27-0.30	25	
Módulo de elasticidade(GPa)	190-210	25	
Módulo de cisalhamento (GPa)	80	25	
Resistência a Tração (MPa)	585	25	Recozido (barra 16-22mm)
Elasticidade (MPa)	505		
Alongamento (%)	12		
Redução em área (%)	45		
Dureza (HB)	170	25	Recozido (barra 19-32mm)
Expansão Térmica (10-6/°C)	15.1	0-700	Recozido

Tabela 3-2 – Propriedades mecânicas aço SAE 1045(efunda.com)

Deve-se ter o cuidado na escolha do material dos dispositivos de fixação para que não influenciem na resposta do material a ser ensaiado. Caso o material seja confeccionado em material de módulo de elasticidade muito inferior, as tensões e deformações serão acumuladas no dispositivo de fixação e não na peça.

3.3.2 Geometria do Corpo de Prova

Como mostrado na Figura 3.1 no croqui da máquina Shenk®, a placa plana com orifício é fixada em suas extremidades no suporte fixo acima e a cabeça do pistão móvel abaixo. Essa fixação é feita por três parafusos e que pode influenciar no resultado caso o torque entre os parafusos sejam diferentes. Durante o procedimento de fixação não havia disponível um torquímetro para configuração.

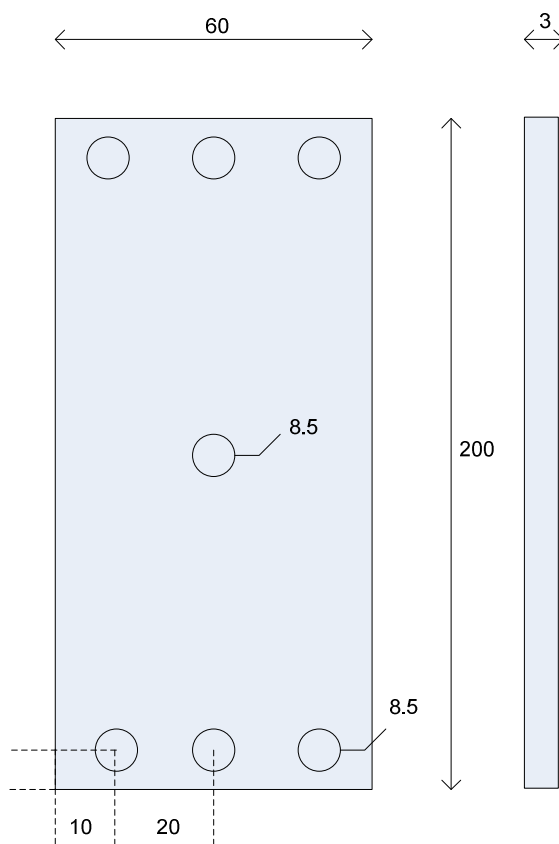


Figura 3.13– Dimensões da placa plana com orifício: o orifício acumula tensões residuais que auxiliam na calibração do equipamento. As dimensões estão em mm.

4 Abordagem Experimental

O delineamento experimental visa tanto otimizar a quantidade de ensaios quanto, e principalmente, determinar os níveis de influência de diversas variáveis nos resultados do experimento. A metodologia principal para o planejamento experimental é o DOE (*Design of Experiments*) aplicado juntamente com o arranjo Taguchi onde as Variáveis de Influência são agrupadas juntamente com as Fontes de Variabilidade com as variáveis em diversos níveis - Montgomery (2005).

O resultado final desta etapa será um DOE com as Variáveis de Influência e Fontes de Variabilidade e respectivos níveis definidos. Para isso, parte-se de um conhecimento e estudo prévio do equipamento, documentação, metodologia de experimentos e definições básicas. Após período de conhecimento das funcionalidades do sistema ESPI, as variáveis foram levantadas e conseqüentemente as Fontes de Variabilidade. Isso foi estruturado em um exercício de *brainstorming* para levantamento de todas as possíveis variáveis que podem causar o insucesso da medição, ou seja, um problema. A partir de então, partiu-se para a identificação de possíveis causas raízes que podem acarretar um problema de medição. A partir da identificação das causas raízes do problema, podem-se identificar as principais variáveis influentes bem como as fontes de variabilidade. O primeiro filtro foi classificá-las como Influentes (I) e Não-Influentes (NI). Após esta primeira filtragem das variáveis, novamente cada variável foi trabalhada a identificar suas causas e organizadas em um Diagrama de Ishikawa para melhor visualização e classificação como Máquina, Método, Material e Mão-de-obra. Esta etapa se faz necessária no intuito de se

eliminar efeitos de ordem de Condições Básicas, ou seja, condições pré-requisitos para execução do experimento. Chen, Li e Cox (2008) exploram a metodologia Seis Sigmas partindo da identificação dos parâmetros em diagrama Ishikawa e aplicando o método de Taguchi o que reduziu o número de combinação de 81 para um arranjo L9. Segundo Werkema (2006), o diagrama Causa e Efeito “é utilizado para sumarizar e apresentar as possíveis causas atuando como um guia para a identificação da causa fundamental e para determinação das medidas corretivas que deverão ser adotadas”. Dessa forma, o problema de falta de procedimento para análise de tensões utilizando ESPI foi dividido em diversos pequenos itens influentes no todo.

O método de Taguchi possui algumas restrições quanto ao seu uso devido ao fato de não considerar a interação das respostas o que pode levar erros (Montgomery, 2005). Ming-Hsien Caleb Li (2005) também alerta para a sua utilização afirmando que há um alto risco em considerar um fator relevante quanto não é. Li determina os fatores significantes utilizando análise de variância para o cálculo da taxa SN.

Deve-se enfatizar que a metodologia para identificação das variáveis não se trata de uma aplicação completa do *Design for Six Sigma*, mas somente ferramentas para auxílio e aplicação estruturada baseada na metodologia Six Sigma como forma de potencializar e embasar a identificação das variáveis em uma sistemática comprovadamente eficiente.

Como valores referência, dependendo da magnitude da área analisada, podem-se utilizar extensômetros (*strain gages*) e coletar os dados de deformação da área. No entanto, neste caso devido ao campo de visão limitado e configuração da geometria das peças, os resultados de simulações computacionais (Pro-Mechanica e FEA) deverão nortear os resultados.

Depois de filtradas as variáveis e fontes de variabilidade, foi aplicada a Metodologia de Taguchi como ferramenta do planejamento experimental definindo os ensaios.

4.1 Definição das Variáveis de Influência e Fontes de Variabilidade

A primeira etapa do processo de definição é um *brainstorming* embasado no conhecimento prévio do equipamento, do sistema e do ambiente onde os ensaios são realizados. Os resultados foram organizados aleatoriamente no diagrama *brainstorming* da Figura 4.1 e são listados na Tabela 4.1 onde são filtrados em Influyente (I) e Não Influyente (NI). As variáveis consideradas influentes são novamente levadas a um levantamento das causas influentes e, por fim,

organizadas no diagrama de Ishikawa para validação, para somente então serem filtradas em Variáveis de Influência e Fontes de Variabilidade de acordo com a categoria. Dessa forma, eliminam-se os fatores que podem ser confundidos com variáveis e que na verdade são erros de procedimento e que devem ser solucionados como pré-requisito para o correto funcionamento, ou seja, condição básica. Já as variáveis, devem ser manipuladas de modo a se encontrar a melhor configuração alcançando os resultados esperados.

Muitas vezes os erros de procedimento são inseridos como Fontes de variabilidade e são tratadas como variáveis incontroláveis. De certa forma a diferença é muito tênue levando-se em conta que são incontroláveis e que influem no resultado final. No entanto a diferença pode ser resolvida com o seguinte questionamento: “pode ser eliminado?” Caso a resposta seja SIM, então deve ser tratada e eliminada, e não contabilizada como Fonte de Variabilidade.

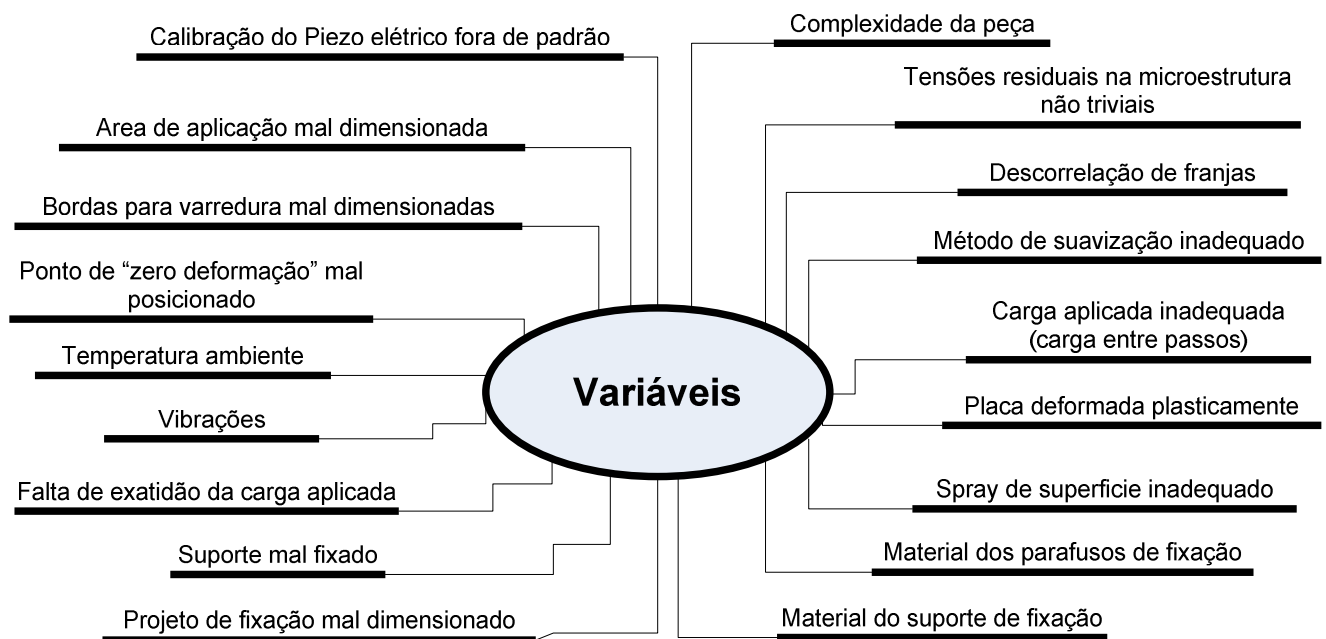


Figura 4.1 - - Diagrama *brainstorming* das possíveis variáveis do processo de ensaio ESPI.

Partindo-se dos itens listados na figura 4.1, foi feita uma triagem dos resultados na tabela 4.1 classificando em Influentes (I) e não influentes (NI). Esses critérios são todos com base empírica e baseados no conhecimento do equipamento utilizado.

VARIÁVEL	I / NI	VARIÁVEL	I / NI
Calibração do Piezo elétrico fora	I	Complexidade da peça	NI
Área de aplicação mal dimensionada	I	Tensões residuais não triviais	NI
Bordas mal dimensionadas	I	Descorrelação de franjas	I
Ponto “zero” mal posicionado	I	Método de suavização inadequado	I
Temperatura ambiente	NI	Carga aplicada inadequada	I
Vibrações	I	Placa deformada plasticamente	NI
Falta de exatidão da carga	I	Spray superfície inadequado	NI
Suporte mal fixado	I	Material dos parafusos	I
Projeto sist fixação mal dimensionado	NI	Material do suporte de fixação	I

Tabela 4-1 – Variáveis são classificadas em Influentes (I) e não influentes (NI). As influentes serão analisadas.

Deste total, somente as variáveis consideradas Influentes (I) são novamente questionada quanto às causas da sua ocorrência e organizadas no diagrama Causa e Efeito como segue.

A identificação das causas influentes é separada nas categorias Máquina, Material, Mão-de-obra e Método – sem as categorias Medida e Meio Ambiente.

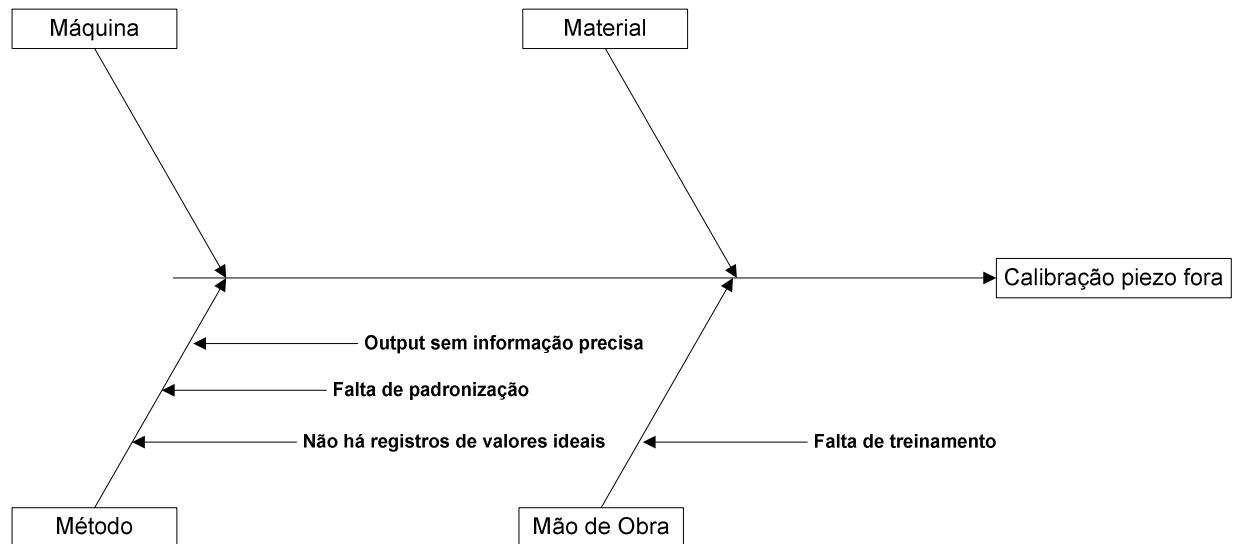


Figura 4.2 – Variável “Calibração do Piezo fora”: as causas raízes foram identificadas como sendo um **problema do método**. Dessa forma devem-se padronizar valores para cada calibração.

A calibração do Piezo elétrico para a mudança conhecida de fase é feita automaticamente pelo software de controle do sistema. Portanto, como analisado acima, a falha no método indica claramente que se trata de um erro de procedimento e que deve ser resolvido para que não influencie nos resultados. Essa variável é diretamente relacionada à vibração local.

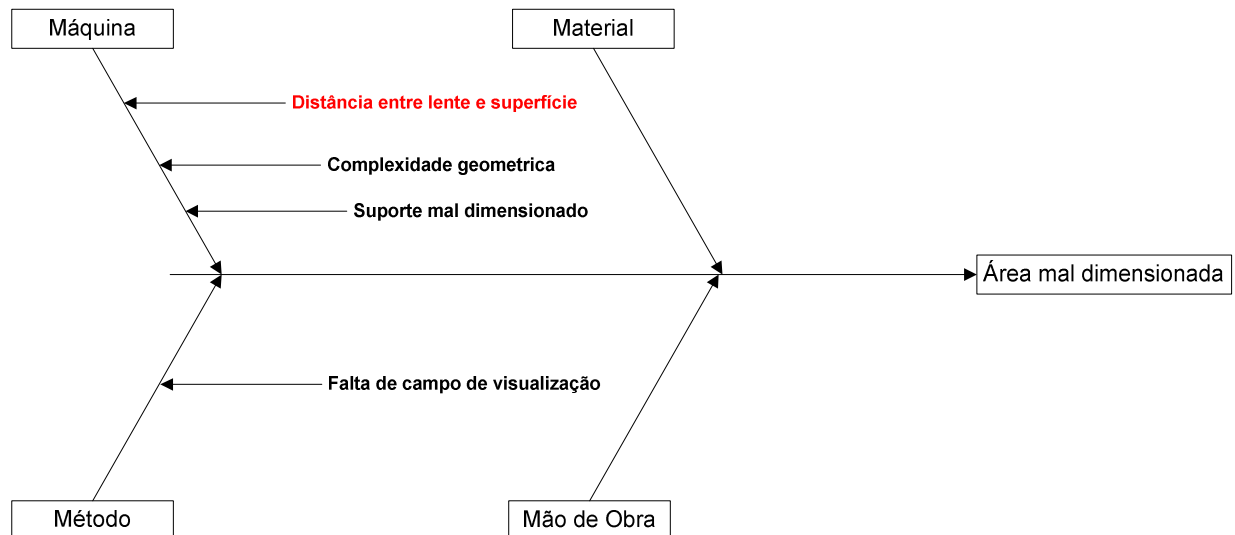


Figura 4.3 - Variável “Área mal dimensionada”: a causa raiz Distância entre lente e superfície trata-se de uma variável, pois não pode ser eliminada e pode ser controlada, portanto uma **Variável de Influência**. Nota-se a repetição de variáveis como causas raízes da área mal dimensionada. Neste caso, seu tratamento será posterior.

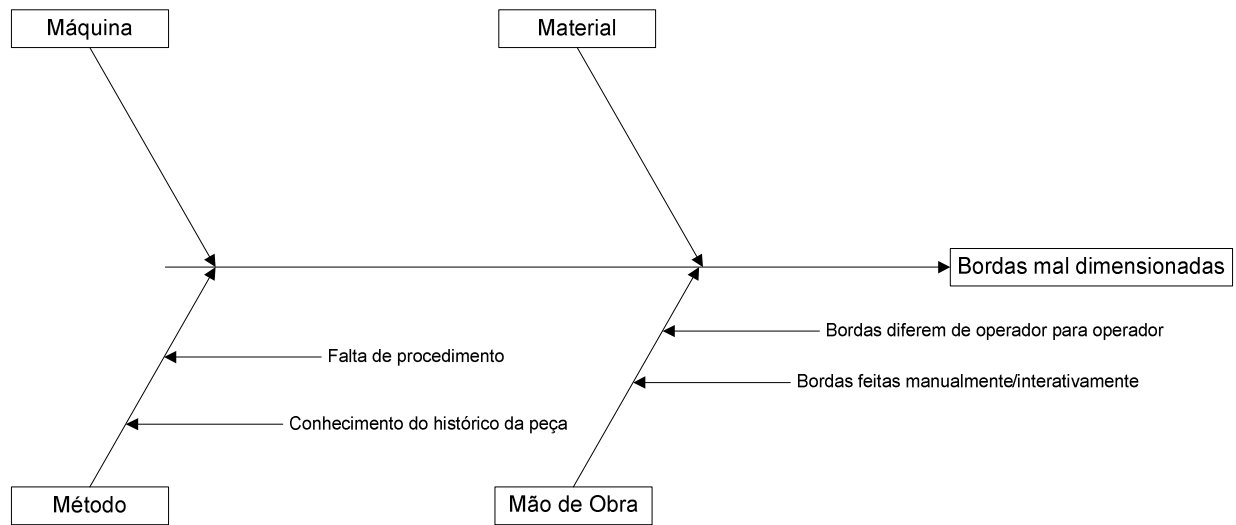


Figura 4.4 - Variável “Bordas mal dimensionadas”: As bordas são feitas manualmente e depende da habilidade do operador. No entanto, esse procedimento é utilizado somente para auxiliar o algoritmo na varredura da área eliminando ruídos mais grosseiros

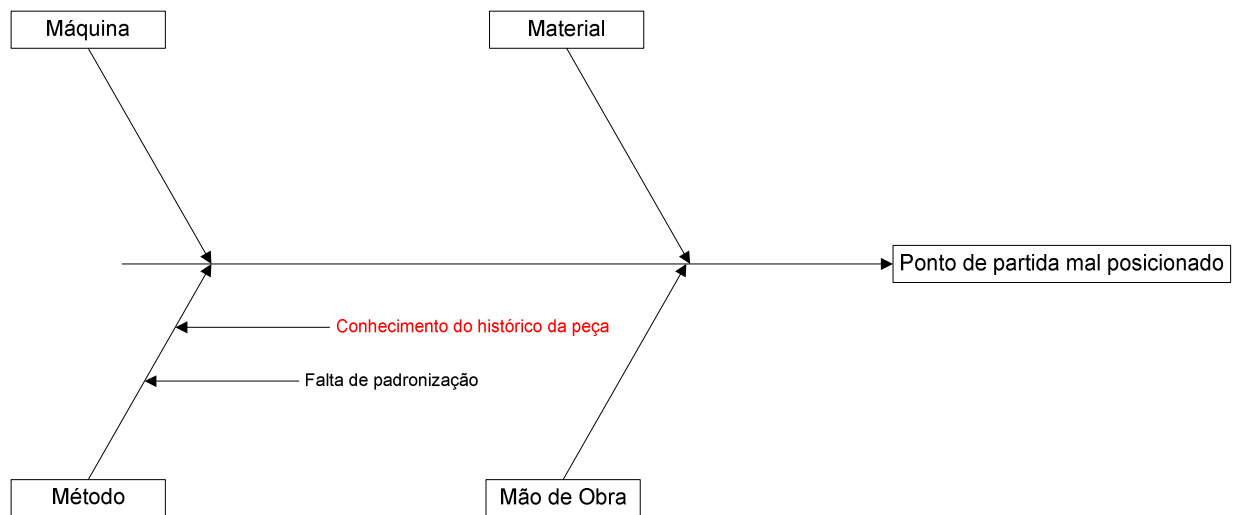


Figura 4.5 – Conhecimento do histórico da peça.

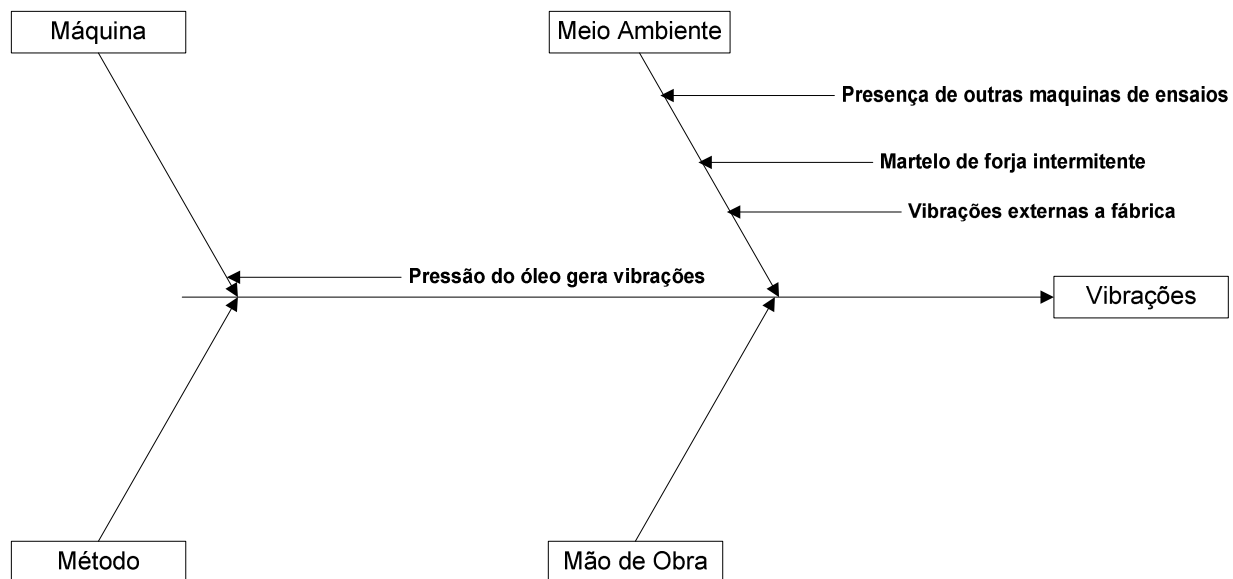


Figura 4.6 - As vibrações são claramente **Fontes de Variabilidade**. É inerente ao processo e não pode ser controlado quando a origem for externa.

No diagrama para o conhecimento do histórico da peça, figura 4.5, o ponto de partida deve ser posicionado num ponto possível de mínimo deslocamento, dependendo, portanto do conhecimento prévio e técnico no ensaio da peça. Como o êmbulo inferior sofre o movimento, o ponto de mínimo deslocamento será obrigatoriamente o lado oposto ao êmbulo. Para efeito de validação o ponto devera ser colocado em três posições diferentes: ponto de mínimo deslocamento, ponto de médio deslocamento e ponto de Maximo deslocamento

A vibração pode ser controlada quando as outras máquinas são desligadas. Portanto, o que será considerado será o ambiente com alto ruído de vibração e o ambiente sem o ruído de vibração. As vibrações externas não serão consideradas. Neste diagrama foi incluído a categoria Meio Ambiente, pois as vibrações são claramente influência externa enquanto nas outras variáveis esta categoria não se aplicou.

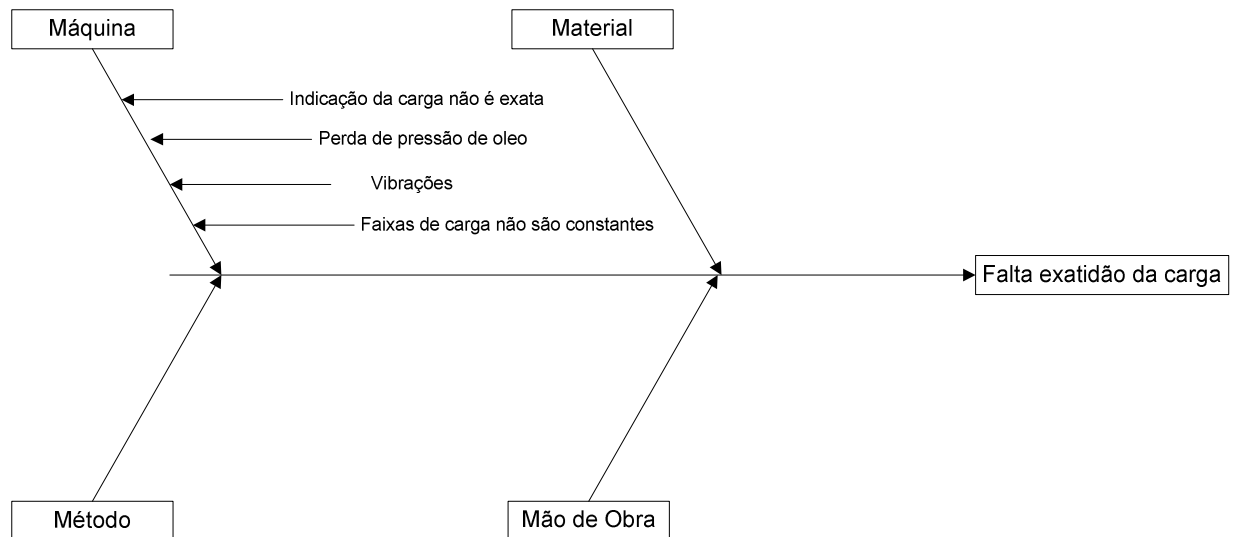


Figura 4.7 – Falta de exatidão da carga: a máquina utilizada foi adaptada para aplicação de cargas estáticas. A concepção original é para ensaios de fadiga, portanto a falta de exatidão é inerente. Deve ser tratado como erro inerente e os valores de cargas aproximados.

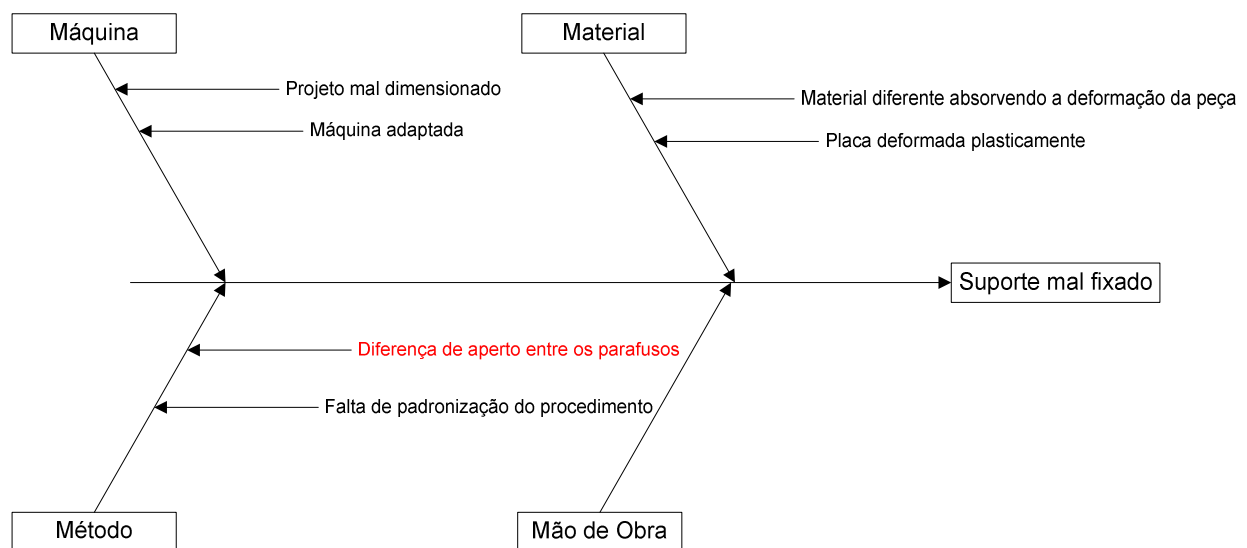


Figura 4.8 - Diagrama de análise de causas raízes para suporte mal fixado.

O suporte mal fixado possui diversos fatores influentes em diferentes categorias. No entanto, diversas causas já foram consideradas como variáveis anteriormente, como por exemplo, Placa deformada etc., e que serão tratadas posteriormente. As outras causas resumem-se a padronização de procedimento e que é de simples resolução controlando-se principalmente o torque aplicado aos parafusos e tomando-se o cuidado em se utilizar parafusos idênticos em dimensões e material.

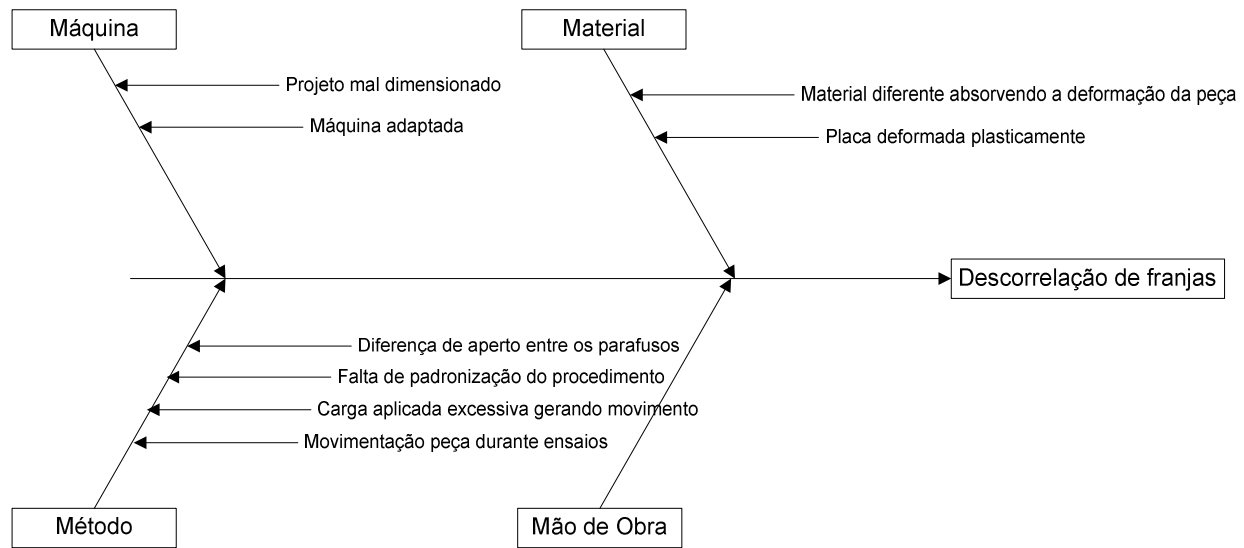


Figura 4.9 - Descorrelação de franjas – é considerado na literatura o maior causador de problemas nos resultados pois afeta a formação dos padrões de franjas, ou seja, o início do processo.

A descorrelação de franjas é gerada quando há movimentação da peça durante o ensaio, ou seja, é imprescindível que a peça permaneça fixa durante a aplicação das cargas de compressão e tração. Deve ser incondicionalmente evitada, pois compromete todo processo desde o seu início. A descorrelação possui as mesmas causas raízes de suporte mal fixado acrescido da Carga aplicada que pode movimentar a peça que também depende da exatidão da carga aplicada que foi tratado como erro inerente. Portanto, a descorrelação é um erro do processo e que tem como principal causador a má fixação do Suporte.

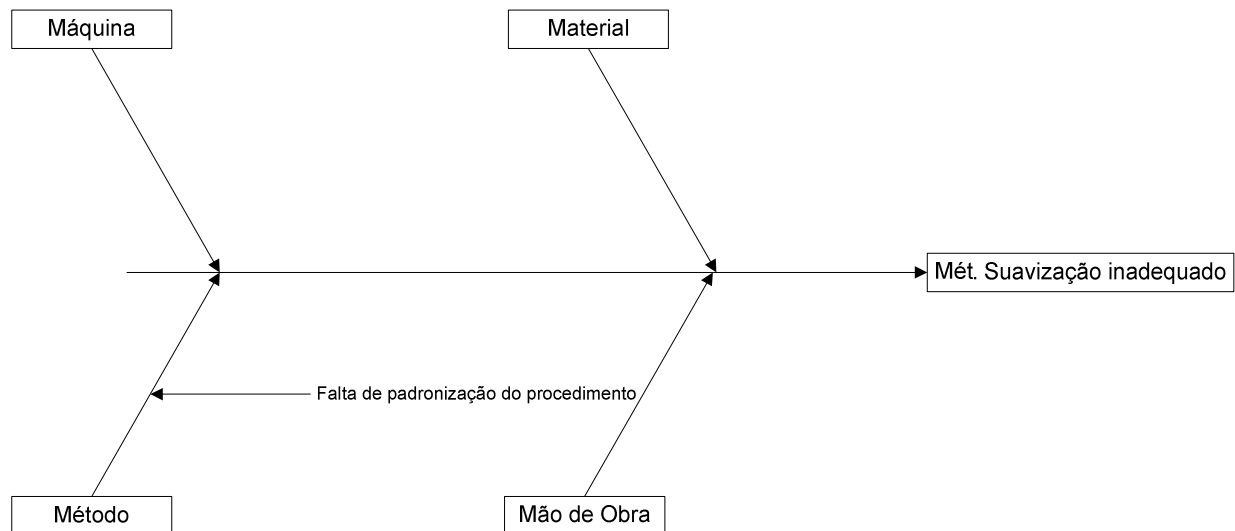


Figura 4.10 - A única causa raiz identificada para método de suavização foi a falta de padronização.

O método de suavização não possui uma recomendação da literatura nem do fabricante do software. Fica sempre a critério do técnico que analisa a suavização das franjas e julga adequado ou não. Dessa forma, considera-se como Variável de influência pois pode ser controlada padronizando a quantidade de suavizações.

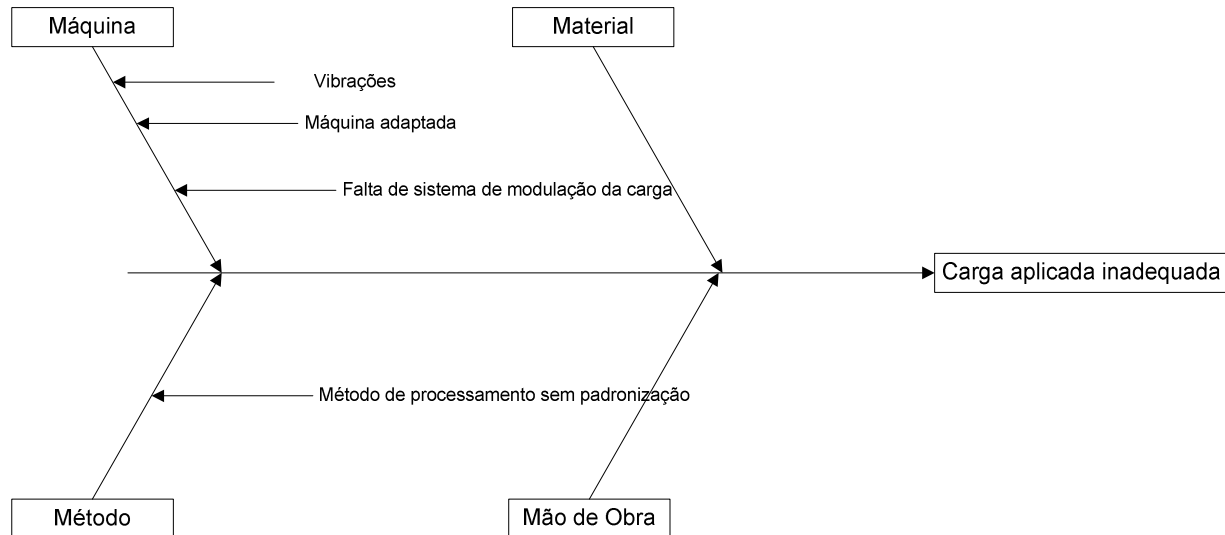


Figura 4.11 - Causas de carga inadequada concentram-se nas categorias Método e Máquina.

A categoria Máquina não pode ser controlada. Os métodos aplicados são dois: aplicação de cargas em série e aplicação única. Portanto deve ser considerada como variável de influência. Os ensaios devem ser feitos em ambos os métodos.

Os outros dois itens – Material dos Parafusos e Material do suporte de fixação – não serão analisados em termos de causas raízes por motivos óbvios. Deve-se ter o cuidado de utilizar parafusos uniformes e fabricados em aço de baixo carbono com propriedades mecânicas similares ao da peça ensaiada. Da mesma forma, o suporte de fixação deve seguir os mesmos conceitos.

As variáveis que irão compor o planejamento experimental ao final do estudo das causas raízes estão na Tabela 4.2.

Variável de Influência		Níveis		
A	Distância Lente > Superfície	150mm	225mm	300mm
B	Suavização	1	2	3
C	Método	Série	Carga única (alta amplitude)	Carga única (baixa amplitude)
D	Ponto Inicial	Ponto de mínimo deslocamento	Ponto de médio deslocamento	Ponto de máximo deslocamento
Fonte de Variabilidade		Níveis		
E	Vibrações	Máquinas Ligadas	Máquinas desligadas	
F	Camada de Spray	Camada única	Camada dupla	
G	Smooth	Aplicado	Não aplicado	

Tabela 4-2 – Variáveis de Influência e Fontes de Variabilidade finais.

Variável	Comentários
Calibração do Piezo elétrico fora	A calibração deve ser feita em cada setup
Complexidade da peça	O sistema foi concebido para detectar micro deslocamentos. Dessa forma, independe da complexidade da peça desde que se tenha um campo de visão suficiente.
Tensões residuais não triviais	Caso haja micro estruturas com má formação e que possam eventualmente acumular tensões residuais, estas aparecerão nos mapas de fases gerados pelos padrões de franjas..
Bordas mal dimensionadas	As bordas dependem da habilidade do operador do equipamento.
Spray superfície inadequado	Foi testado um spray revelador diferente sem

	que houvessem mudanças. Porém, o que se pode variar são quantas camadas são aplicadas. Deve ser ensaiada como Fonte de Variabilidade, pois não possui um controle rígido. Depende da habilidade de quem aplica. Portanto, considera-se camada única e dupla camada.
Temperatura ambiente	A temperatura do ambiente conta com um equipamento de ar condicionado e não deve variar muito.
Placa deformada plasticamente	Dependendo do processo de fabricação da peça, pode ter havido ou não alívio das tensões residuais ou outro tratamento que influa nas propriedades mecânicas. Neste caso, não houve nenhum tratamento.
Projeto sistema de fixação mal dimensionado	O projeto foi bem dimensionado.

Tabela 4-3 – Itens considerados não influentes porém compondo o quesito Pré-requisitos.

4.2 Planejamento Experimental

O planejamento da análise da placa plana utilizará a metodologia de Taguchi RPD (*Robust Parameter Design*), ou seja, Design Robusto de Parâmetros. Segundo Montgomery (2005), a utilização dessa metodologia deve levar em conta um dos focos a seguir:

1. Projetar produtos ou processos robustos em relação às condições ambientais uma vez que o produto já está em utilização;
2. Projetar produtos que sejam robustos quanto à variabilidade dos seus componentes;
3. Projetar processos tal que o produto manufaturado seja mais próximo possível ao projeto inicial;
4. Determinar as condições de operação para um processo tal que as características críticas do processo sejam mais próximas possíveis aos valores padrões minimizando a variabilidade em torno de um valor nominal.

Segundo Taguchi (1986), há três tipos de fonte de ruídos:

5. Ruído externo: causado por efeitos do meio externo tais como umidade, temperatura externa etc.;
6. Ruído interno ou deteriorização: deteriorização do próprio produto causando falha no desempenho original;
7. Ruído unidade para unidade: diferença entre os produtos que são fabricado sob as mesmas especificações.

O termo robusto utilizado aplica-se aos produtos que se apresentem insensíveis as variáveis de difícil controle. Neste caso, há muitas variáveis listadas no item anterior de difícil controle e que são inerentes ao processo. Segundo Taguchi (1986), as etapas do desenvolvimento de um produto ou processo são separadas em Projeto do Sistema, Projeto dos parâmetros e Projeto das Tolerâncias. Como o sistema já foi concebido incluindo o algoritmo de processamento das imagens, o que se busca aqui é a padronização dos parâmetros e as tolerâncias que minimizem a influência das variáveis no resultado final. Como se tem como referência os valores da simulação e valores aproximados das cargas aplicadas, o objetivo do experimento baseado no método de Taguchi se aplica, neste caso, em minimizar a diferença dos valores medidos com relação a nominal e minimizar a influência das fontes de variabilidade.

Dois planejamentos são empregados para o projeto de parâmetros: ortogonal L_9 para variáveis de influência – denominado arranjo interno - e um arranjo ortogonal L_4 para as fontes de variabilidade, denominado arranjo externo.

Neste caso utilizou-se somente 3 (três) Fontes de variabilidade com dois níveis cada. A fonte de variabilidade “Vibrações” devido a excesso de ensaios simultâneos foi considerada como constante – nas devidas proporções – mantendo-se os outros equipamentos desligados durante os testes. Portanto, $E=2$, ou seja, variável E mantida no nível 2 (máquinas desligadas), resultando em um arranjo externo L_4 . O método pode utilizar um arranjo ortogonal maior que permita observar as interações entre os ruídos, o que não foi considerado neste caso, pois as duas variáveis restantes – Camada de Spray e Smooth – são ruídos completamente independentes: o primeiro é uma aplicação de mistura química fisicamente enquanto o segundo é uma rotina do *software* para interpolação da imagem. Isso foi constatado testando-se somente estas duas

variáveis isoladamente dos outros parâmetros já que não há custo nem limitação de tempo para tal. Taguchi (1986) enfatiza o custo nas decisões finais e neste caso, não houve restrições.

Finalmente, o layout completo do projeto de parâmetros apresenta a combinação dos dois arranjos. Essas variáveis serão preenchidas com as variáveis da Tabela 4.2 na Tabela 4.4.

		Ensaio						
			1	2	3	4		
	Fontes	E	2	2	2	2	2	
		F	1	1	2	2		
		G	1	2	1	2		
		Variáveis						
Ensaio		A	B	C	D	Resultados das Medições	y	SN
1		1	1	1	1			
2		1	2	2	2			
3		1	3	3	3			
4		2	1	2	3			
5		2	2	3	1			
6		2	3	1	2			
7		3	1	3	2			
8		3	2	1	3			
9		3	3	2	1			

Tabela 4-4– Layout completo: cada uma das nove combinações do arranjo interno é testado nas oito combinações do arranjo externo o que resulta numa amostra de 36 ensaios.

O método de Taguchi propõe que o arranjo interno seja analisado em termos de resposta média de cada combinação, enquanto a variabilidade – arranjo externo – seja analisada em termos de uma taxa sinal-ruído (SN) apropriado de acordo com o tipo de resposta buscada (Montgomery, 1991):

1. Melhor Nominal SN_T : utilizada para reduzir a variabilidade em torno de um valor nominal:

$$SN_T = 10 \cdot \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad (4.1)$$

2. SN_L : máximo valor, quando se busca maximizar a variável resposta:

$$SN_L = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.2)$$

3. SN_S : mínimo valor, quando se busca minimizar a variável resposta:

$$SN_S = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4.2)$$

No caso do presente trabalho, o que se tem como parâmetros são os valores de tensões equivalentes da placa com furo resultado de simulações, o que torna a comparação tanto quantitativa quanto qualitativa devido à distribuição das tensões ao longo da chapa metálica. O furo se caracteriza – e foi devidamente premeditado – como local onde se observam as maiores tensões. Portanto, tem-se como referência o valor da maior tensão em torno deste furo (~16MPa) segundo a simulação via Pro-Engineer®/PTC. Dessa forma, os níveis ótimos das variáveis de influência são aqueles que reduzem a diferença dos valores de tensões medidos nos ensaios com relação ao valor referência simulado ($SN = SN_S$), e que minimiza a influência das fontes de variabilidade nos resultados (máximo SN).

5 Aplicações e Resultados

Os ensaios foram realizados no laboratório de fadiga no departamento de Garantia da Qualidade da empresa Thyssenkrupp, em Campo Limpo, SP.

Os resultados aqui apresentados são os ensaios em placas planas com orifício.

Todo setup do equipamento segue os pré-requisitos citados anteriormente incluindo as variáveis listadas no capítulo anterior onde foram desdobrados de maneira sistemática através de uma análise de causas raízes.

A primeira parte do capítulo traz resultados da simulação feita no software Pro-Engineer®/PTC. Esses resultados devem servir como referência para os valores dos ensaios.

O item seguinte apresenta os resultados dos ensaios planejados no capítulo anterior na metodologia de Taguchi aplicando a combinação dos arranjos de Variáveis de influência e Fontes de Variabilidade.

5.1 Simulação

A Figura 5.1 mostra um mapa de deslocamentos simulado, nos eixos x e y. A deformação se encontra no intervalo aproximado de 0.1 a 0.3 μm no eixo X e 2.0 a 7.5 μm no eixo Y. A Figura 5.2 apresenta o mapa de tensões equivalentes de von Mises cujos valores na região próxima ao orifício onde se encontram as maiores tensões são da ordem de 12 a 23MPa. O valor referência adotado para cálculo da diferença dos valores medidos será de 16MPa.

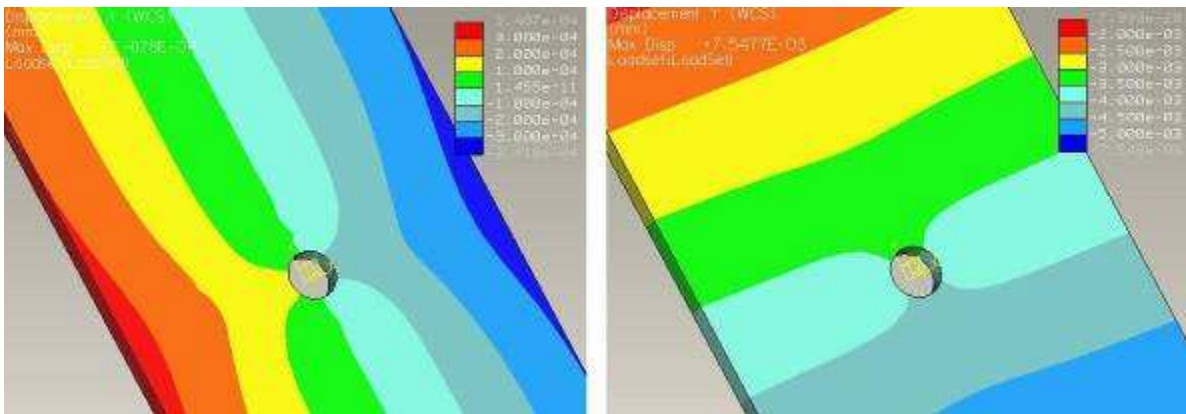


Figura 5.1 - Mapa de deslocamentos na direção x e direção y.

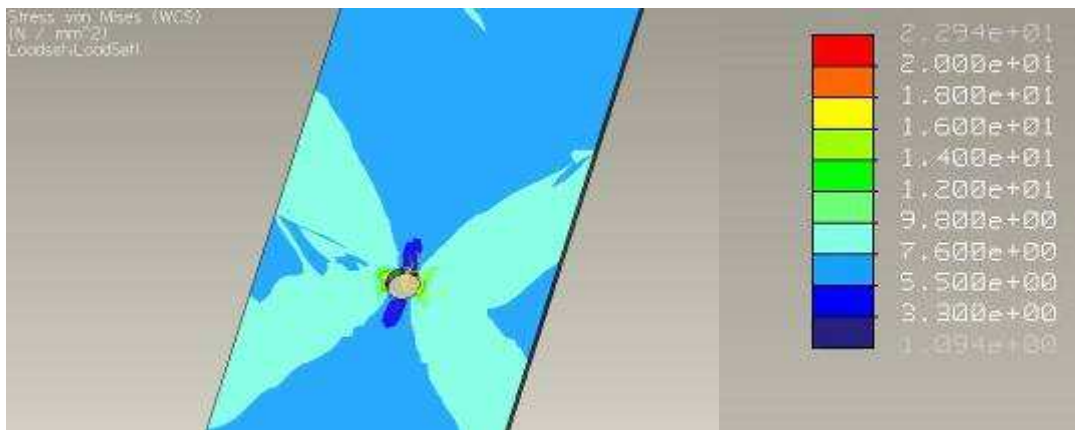


Figura 5.2 - Campo de tensões equivalentes de Von Mises

5.2 Aplicações em Placa com orifício

A grande dificuldade em se estruturar um plano experimental e aplicar ferramentas estatísticas para uma metodologia com base em padrões de imagens é que o resultado não é único quantitativo ou qualitativo, ou seja, não se analisa um fator único como, por exemplo, um torque, uma força, tempo etc. o que se busca aqui são resultados qualitativos que levam a resultados quantitativos confiáveis. Dessa forma, mapas de fases de franjas com boa qualidade levam a resultados de deformações e tensões confiáveis. Portanto, para cada combinação, devem-se avaliar a qualidade da correlação de franjas, mapas de fases e deslocamentos. Os resultados quantitativos são comparados aos resultados aproximados de simulações com foco nas regiões mais críticas, ou seja, o maior valor de tensão no furo (16MPa).

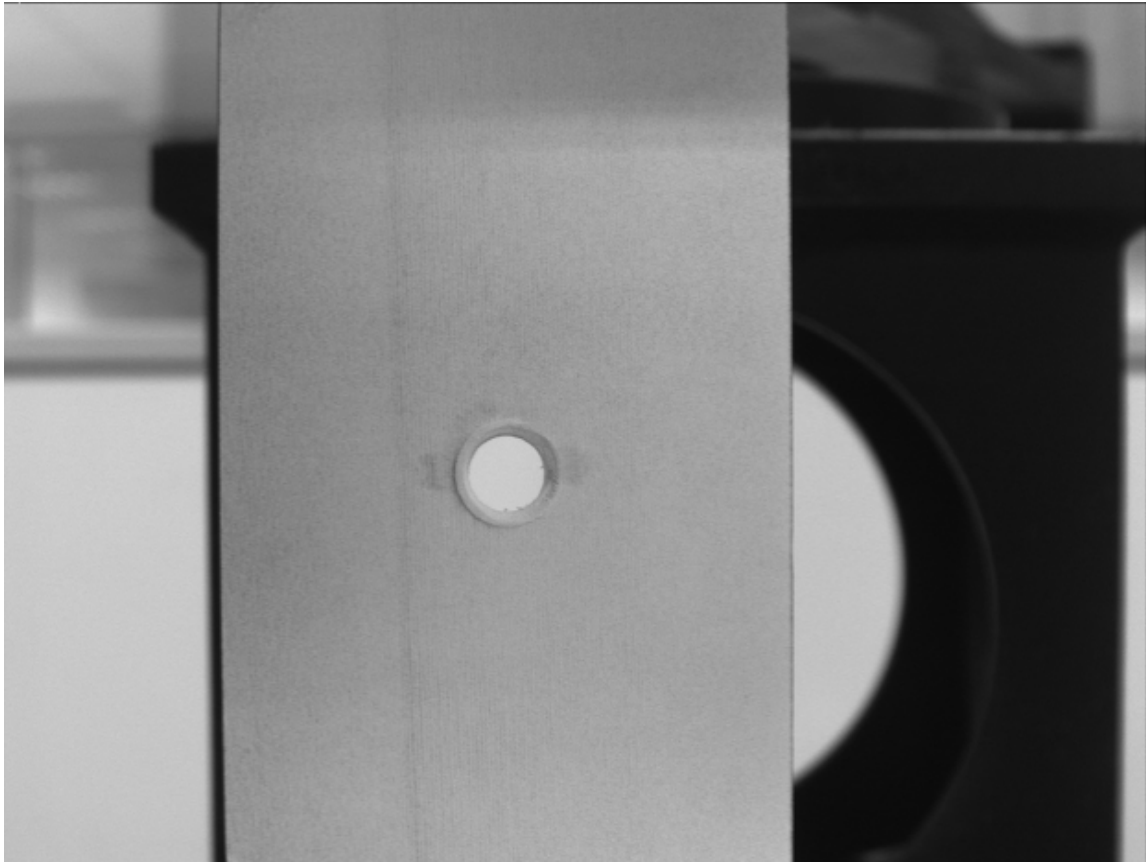


Figura 5.3 - Placa com orifício central. A superfície deve ser recoberta por um spray revelador para torná-la opaca a fim de evitar a reflexão da luz na superfície polida dificultando a tomada da câmera.

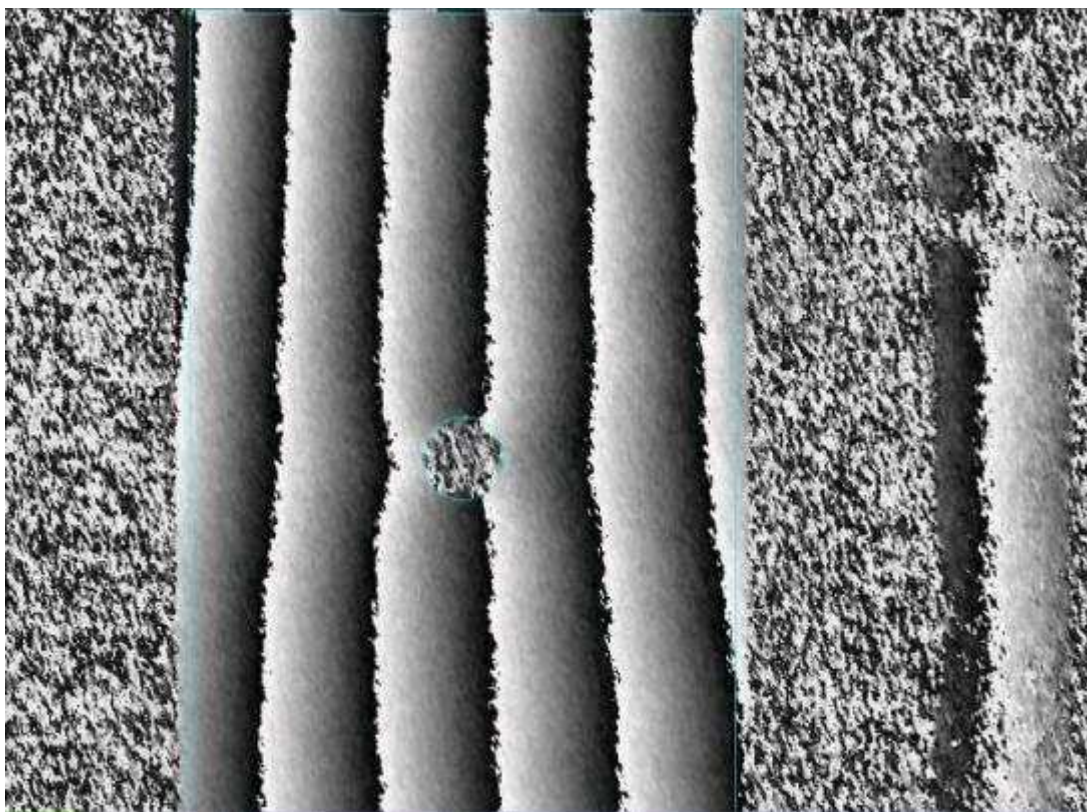


Figura 5.4 - Detalhe da borda que delimita a área de varredura do algoritmo para detecção das transições de fases.

Para todos os resultados com a fonte de variabilidade $E=1$ – máquinas ligadas -, houve excesso de vibração e em muitos casos, descorrelação de franjas. Com o intuito de evitar que seja repetitivo e tedioso, segue abaixo alguns casos em que houve movimentação da placa e as franjas ficaram comprometidas e até mesmo ocorrendo a descorrelação de franjas.

. O resultado da análise quando há movimentação da peça muitas vezes fica comprometido. O mapa de deslocamentos fica sujeito a ruídos e conseqüentemente o cálculo das tensões não corresponde ao real.

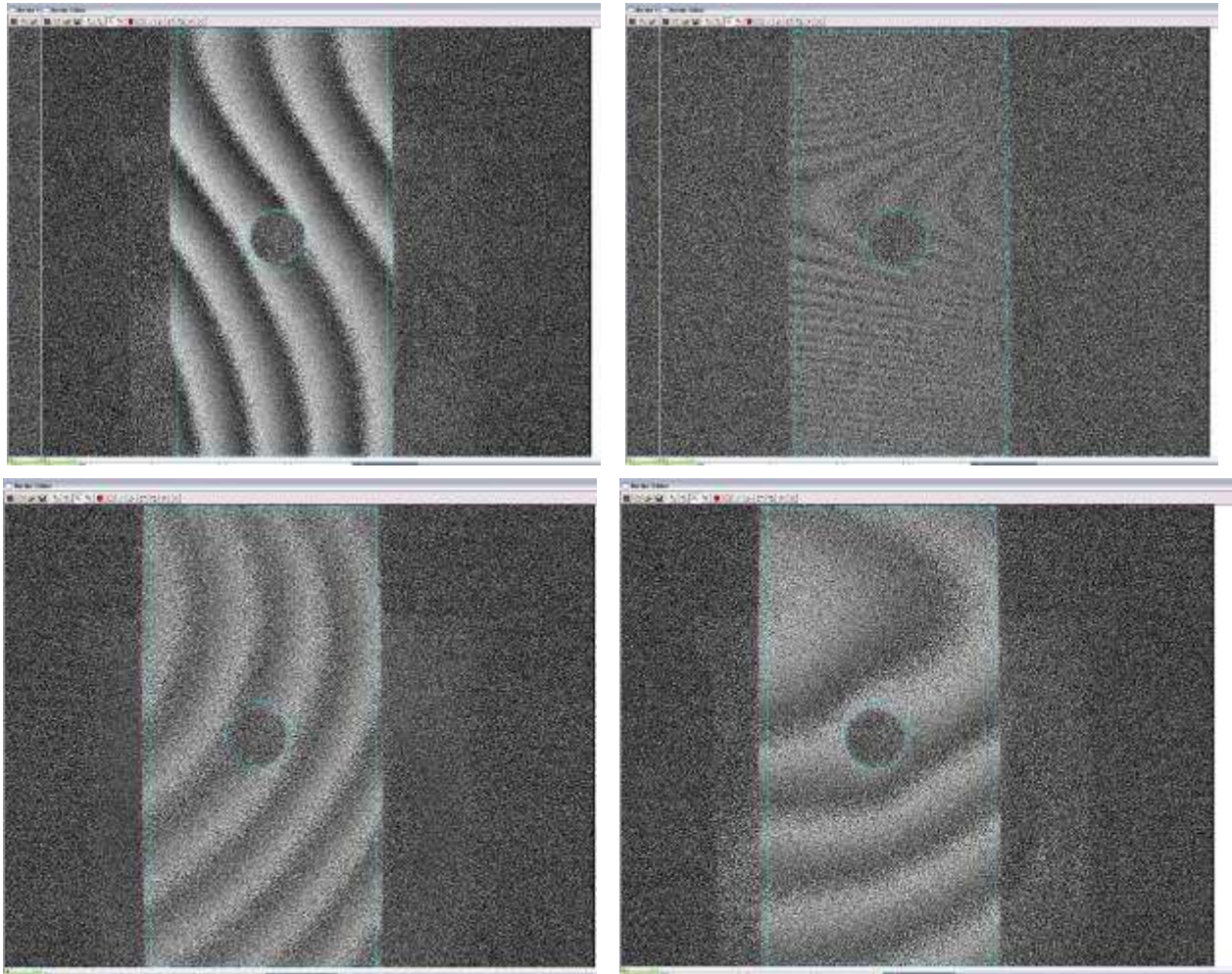


Figura 5.5 - Detalhe da formação de franjas durante a aplicação da tração: houve claramente movimentação irregular da peça devido a má fixação influenciado também pela alta vibração do local.

Caso se leve em conta esses valores, para efeitos dos cálculos de média e desvio padrão, os resultados finais ficam comprometidos, pois o cálculo das tensões perde a referência de deslocamento resultando em valores irreais.

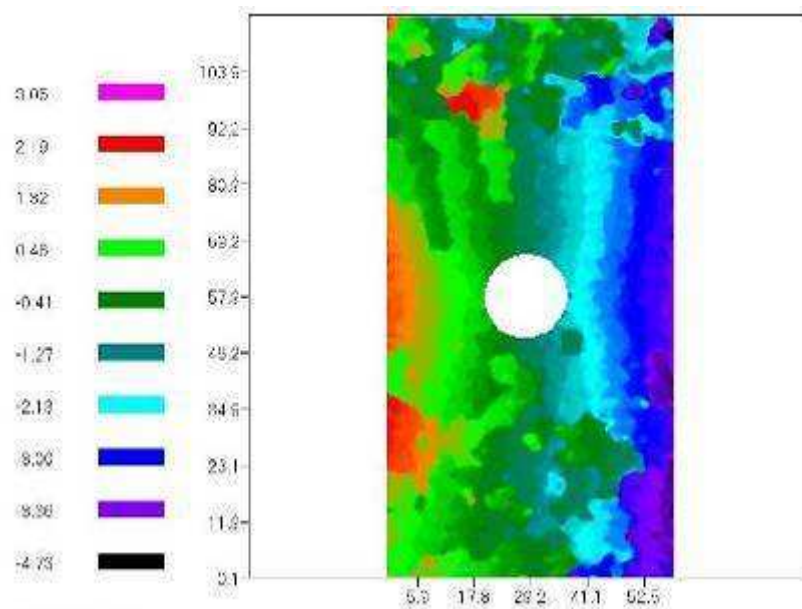


Figura 5.6 - Mapa de deslocamentos do eixo X: presença de ruídos provocados pela descorrelação de franjas.

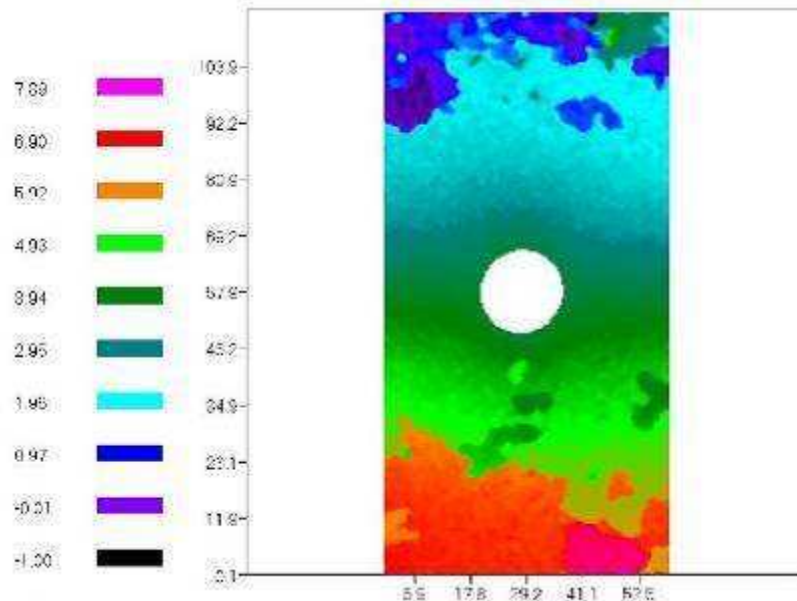


Figura 5.7 - Descorrelação e ruídos no mapa de deslocamentos do eixo Y.

Observa-se que a descorrelação das franjas é interpretado como um deslocamento da superfície e conseqüentemente, uma deformação da peça muito pouco provável, conhecendo-se o sistema de fixação e aplicação das cargas. Na figura 5.7, é apontada uma deformação na região inferior próximo ao engaste da placa, o que não é observado na peça fisicamente.

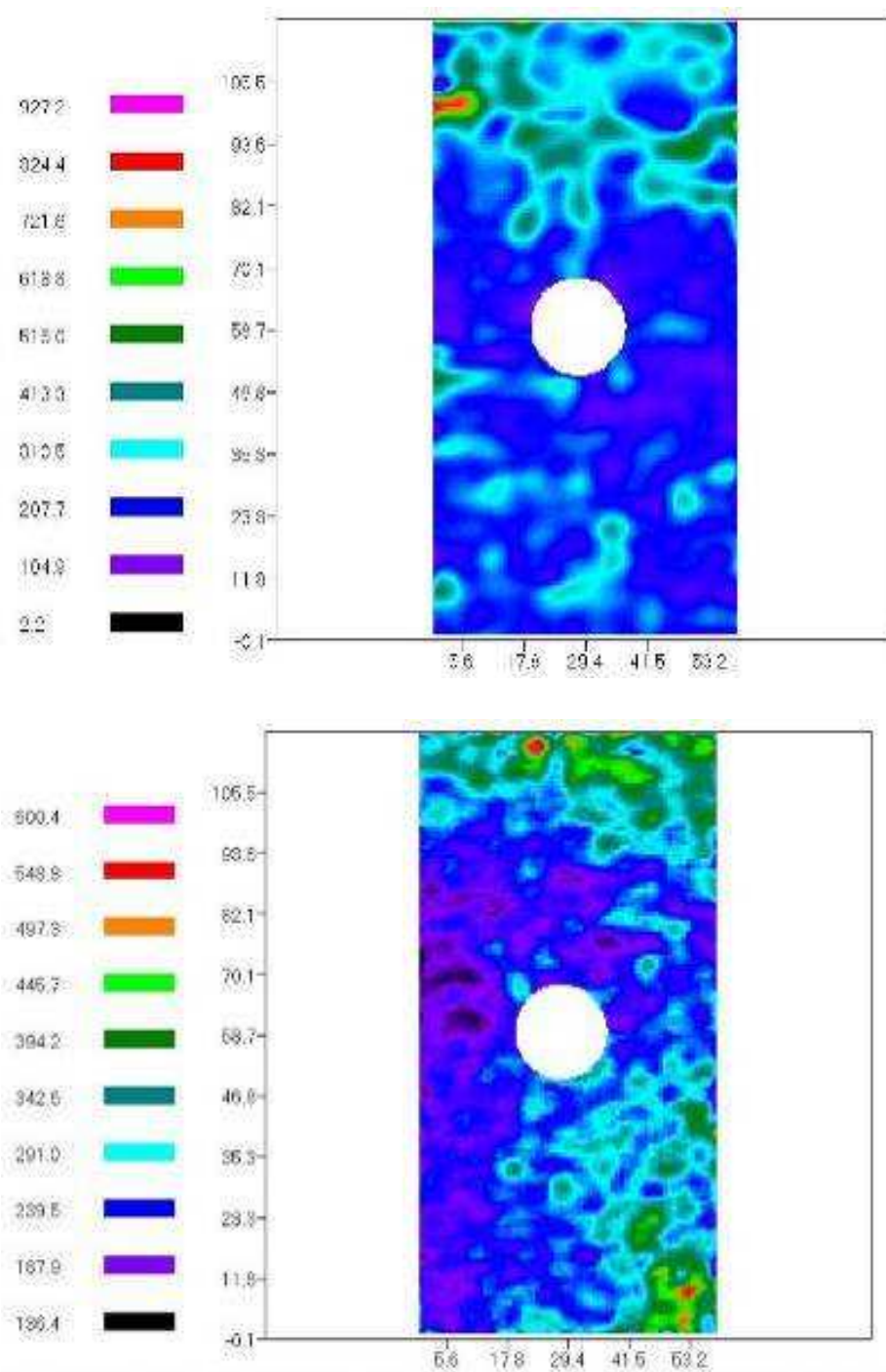


Figura 5.8 - Tensões equivalentes de Von Mises não correspondem ao real. A região onde há maior tensão (próximo ao orifício) não apresentou nenhuma variação.

Prontamente, a fonte de variabilidade E (vibrações) interfere diretamente nos resultados finais gerando ruídos e descorrelação das franjas. O que resta são outros 36 ensaios embora seja impossível eliminar todas as fontes externas de vibrações reais, resultado na prática em um arranjo $L_9 \times L_4$.

Foi realizada a sequência de 36 experimentos variando-se os níveis das Variáveis de Influência e as Fontes de Variabilidade apresentado os resultados que seguem na tabela 5.1.

					Ensaio		1	2	3	4		
					Fontes	E	2	2	2	2		
						F	1	1	2	2		
						G	1	2	1	2		
	Variáveis											
Ensaio	A	B	C	D		Resultados das Medições					y	SN
1	1	1	1	1		9,4	8,8	9	8,4	8,9	-18,9949	
2	1	2	2	2		8	7,4	7,6	7	7,5	-17,5113	
3	1	3	3	3		7,8	7,2	7,4	6,8	7,3	-17,277	
4	2	1	2	3		9,2	8,6	8,8	8,2	8,7	-18,7978	
5	2	2	3	1		3,3	7,2	1,4	0,3	3,05	-12,0938	
6	2	3	1	2		8,2	7,6	7,8	7,2	7,7	-17,7393	
7	3	1	3	2		9,1	8,5	8,7	8,1	8,6	-18,6976	
8	3	2	1	3		11,9	11,3	11,5	10,9	11,4	-21,1424	
9	3	3	2	1		9,6	9	9,2	8,6	9,1	-19,1876	

Tabela 5-1 – Valores resultantes do ensaio.

O primeiro resultado é qualitativo e pode ser monitorado durante a aplicação das cargas. As combinações das franjas são observadas em tempo real sendo possível abortar o ensaio caso haja descorrelação de franjas. Caso há boa qualidade nas franjas – e essa característica deve levar em conta o conhecimento prévio da peça e das cargas aplicadas – os resultados quantitativos conseqüentemente serão próximos ao simulado.

As médias resultantes são valores da diferença entre os valores das maiores tensões em torno do furo e tensões simuladas referências ($y = Y_{real} (MPa) - Y_{referencia} (MPa)$). O valor sinal/ruído é resultante da equação SN_s .

A partir das representações gráficas dos resultados da tabela 5.1 é possível identificar o “vencedor” de acordo com a função SN aplicada (Montgomery, 1991). Dessa forma, a partir dos gráficos 5.9, 5.10, 5.11 e 5.11 é possível identificar os níveis requeridos.

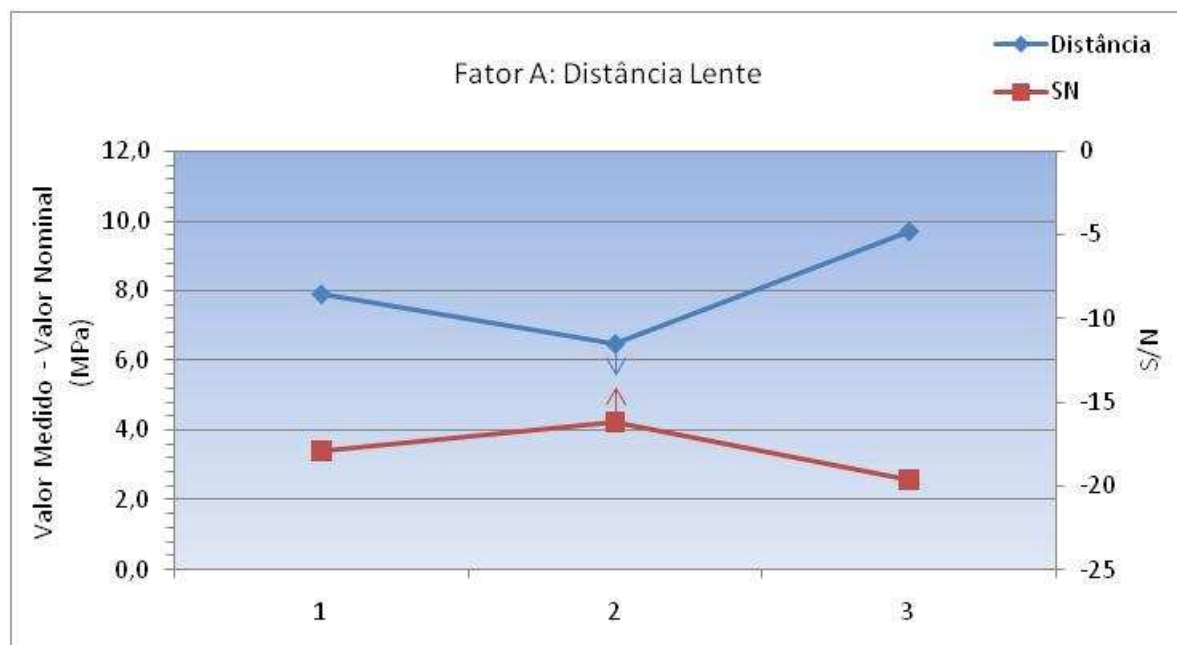


Figura 5.9 – Melhor nível para item Distância:2.

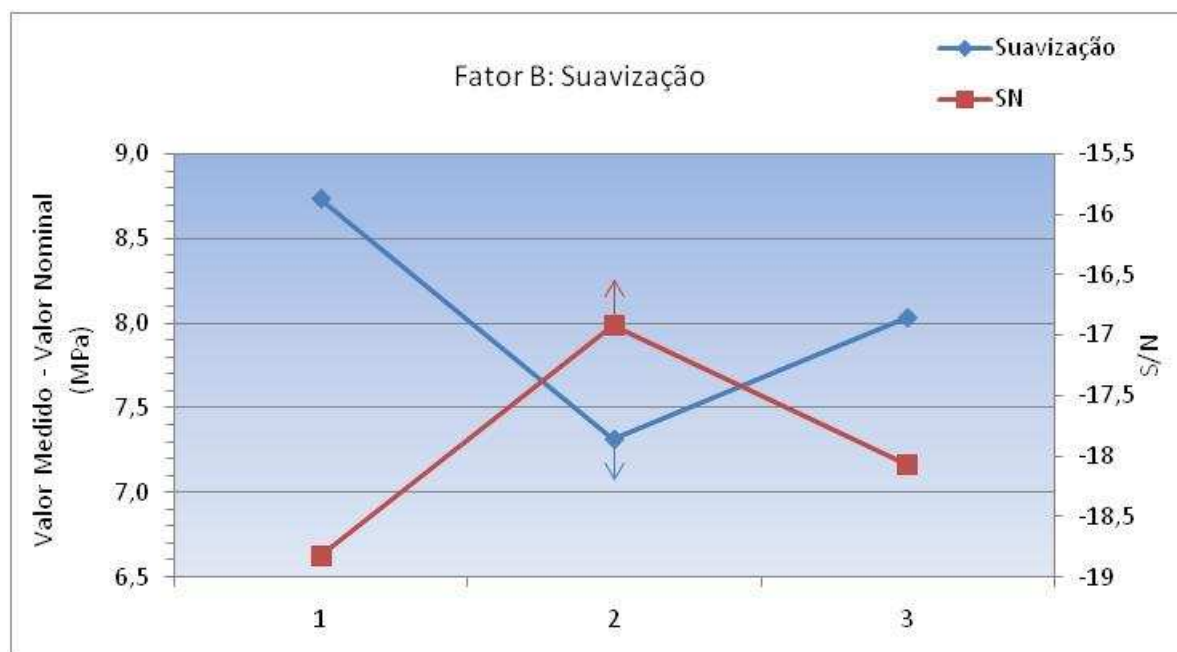


Figura 5.10 – Melhor nível para item Suavização:2.

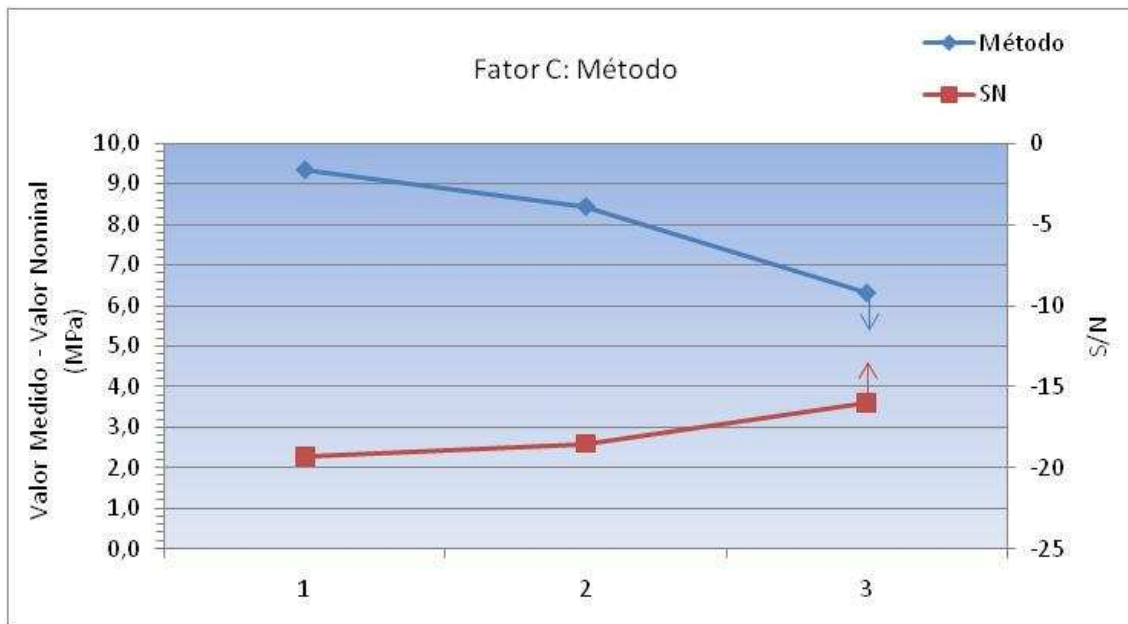


Figura 5.11 – Melhor nível para item Método:3.



Figura 5.12 – Melhor nível para item Ponto Inicial:1..

Consolidando os dados anteriores para o melhor ajuste das variáveis tem-se:

	Variável de Influência	Níveis		
A	DISTÂNCIA LENTE > SUPERFÍCIE		225mm	
B	SUAVIZAÇÃO		2	
C	MÉTODO			Carga única (baixa amplitude)
D	PONTO INICIAL	Ponto de mínimo deslocamento		
	Fonte de Variabilidade	Níveis		
E	Vibrações		Máquinas desligadas	
F	Camada de Spray	Camada única	Camada dupla	
G	Smooth	Aplicado	Não aplicado	

Tabela 5-2 – Valores ideais para o ensaio da placa com orifício

A camada de spray independe da quantidade. Foi utilizado um spray revelador branco. Já o item *Smooth* demonstra valores muito próximos do real.

Após o estabelecimento dos melhores parâmetros, o experimento foi testado variando-se a carga aplicada tanto em Tração quanto em Compressão. Os valores da tensão de Von Mises está no intervalo de 15 a 24MPa enquanto o deslocamento na direção X em torno de 0,19µm, muito próximos dos valores de referência.

5.2.1 Ensaio 01

Partindo-se dos parâmetros estabelecidos na tabela 5.2, foi aplicada a seguinte configuração de carga:

- Tração
- Carga única = 2,1kN;

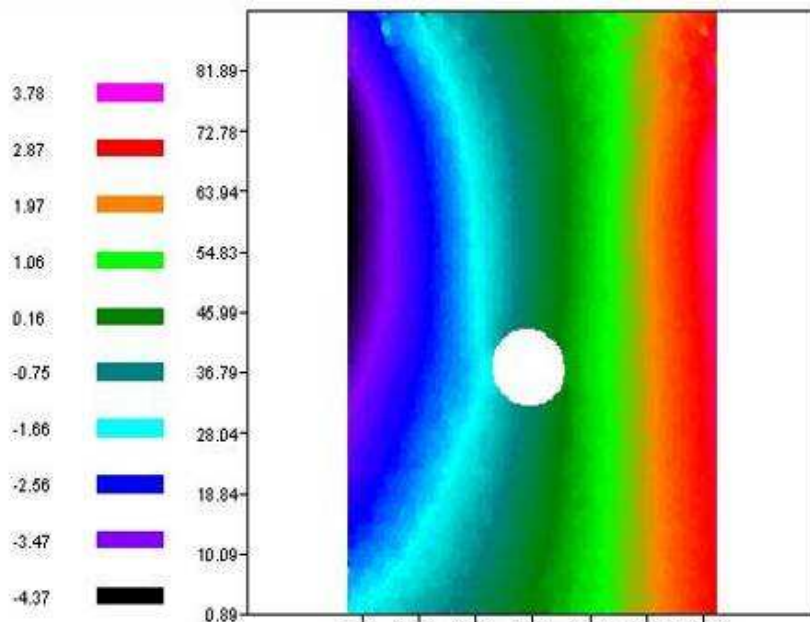


Figura 5.13 - Mapa de deformação do eixo X. Percebe-se que houve movimentação da placa causando má formação das franjas

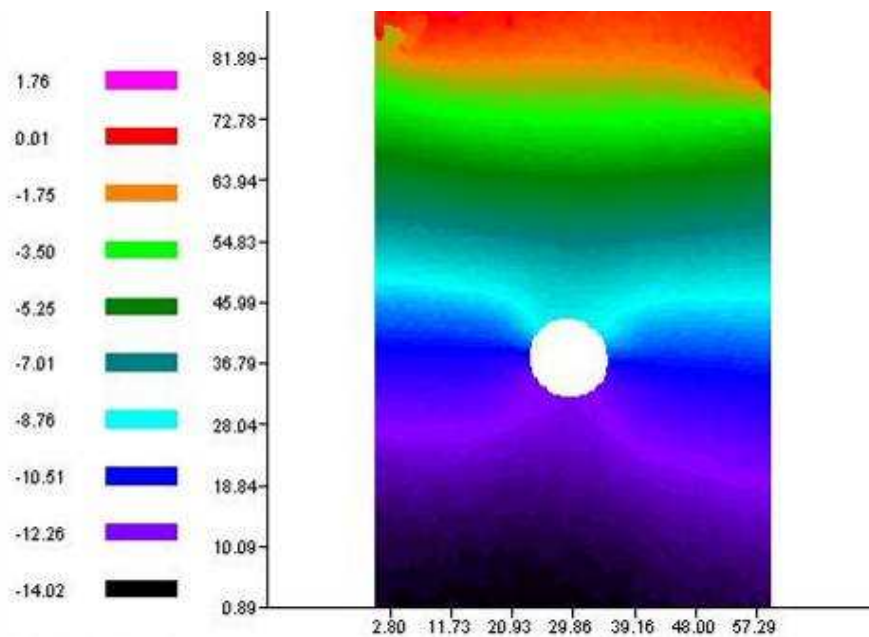


Figura 5.14 - Mapa de deformação do eixo Y.

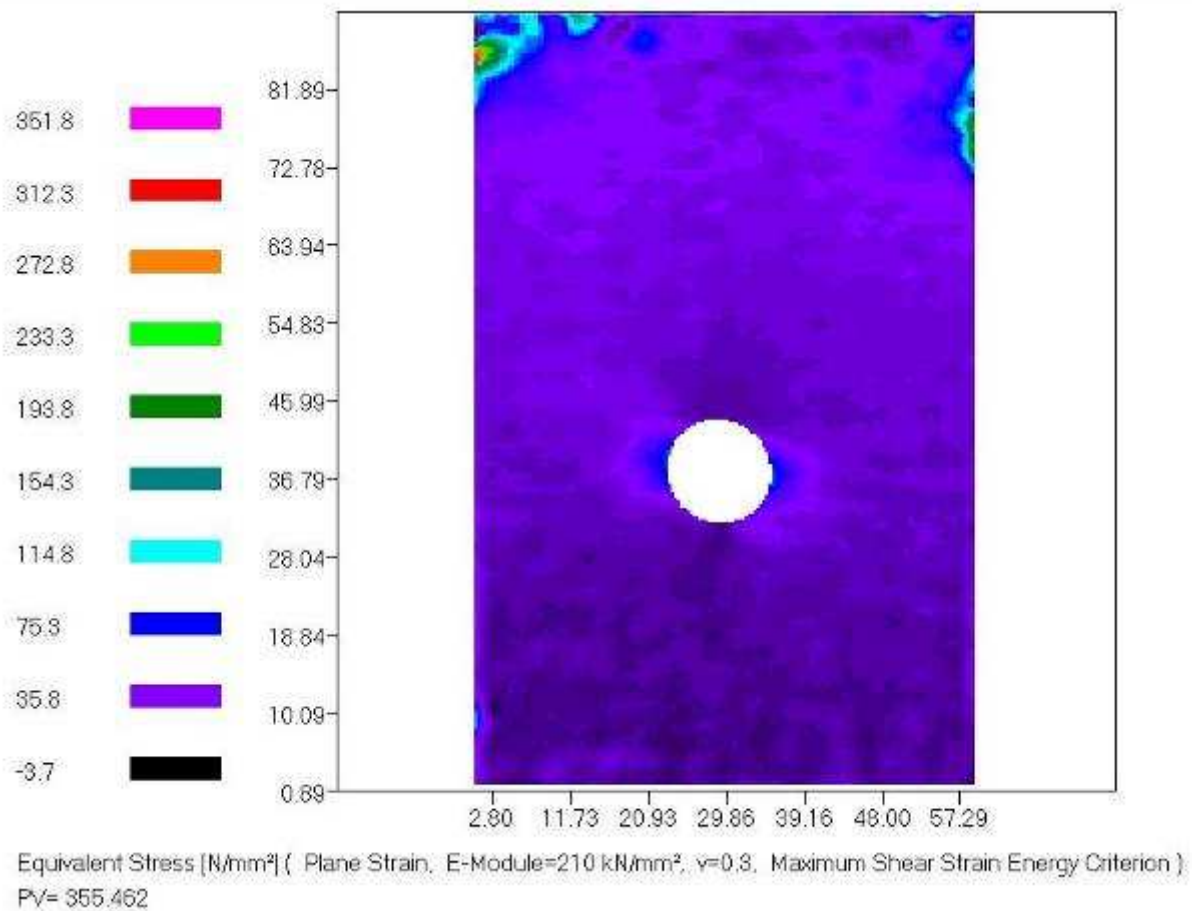


Figura 5.15 - Mapa de tensões de Von Mises.

O primeiro ensaio apresenta valores ainda pouco exatos com relação aos valores da simulação devido à translação da peça durante o ensaio percebido na direção das franjas da figura 5.13 e 5.14. No entanto, a região de maiores tensões está indicada próxima ao orifício, ou seja, qualitativamente razoável, porém quantitativamente com um grande desvio.

5.2.2 Ensaio 02

Parâmetros utilizados:

- Tração
- Carga única = 4.1kN

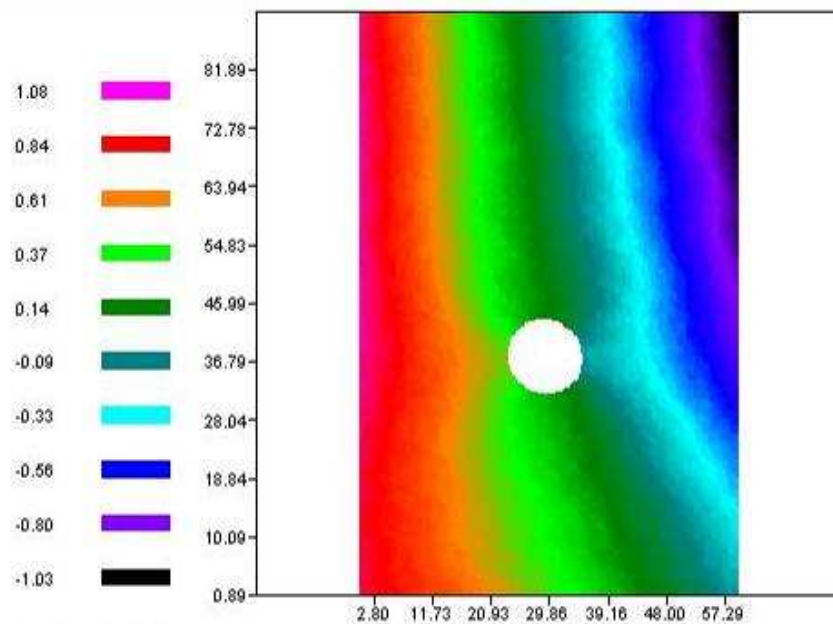


Figura 5.16 –Mapa de deformação do eixo X. A placa apresenta melhor alinhamento em comparação com o ensaio anterior.

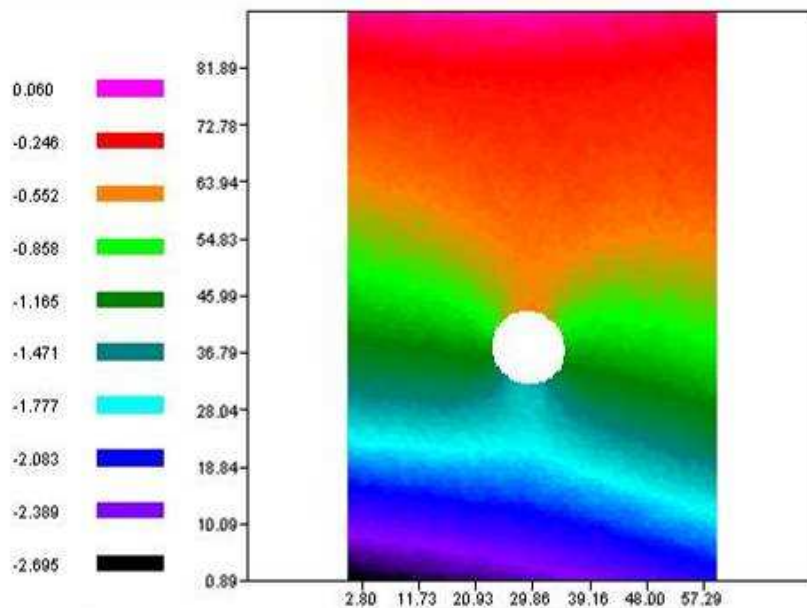


Figura 5.17 –Mapa de deformação do eixo Y com leve deslocamento do padrão de franjas..
Deformação em μm .

O Mapa das Tensões de Von Mises da Figura 5.18 mostra corretamente a região de acúmulo de tensões próxima ao orifício. Os valores no intervalo de 16.1 a 18.4 MPa estão na faixa de valores da simulação se mostrando, portanto, corretos tanto qualitativamente observando-se as regiões de maiores tensões quanto quantitativamente nos valores de maiores tensões em torno de 16.1 N/mm².

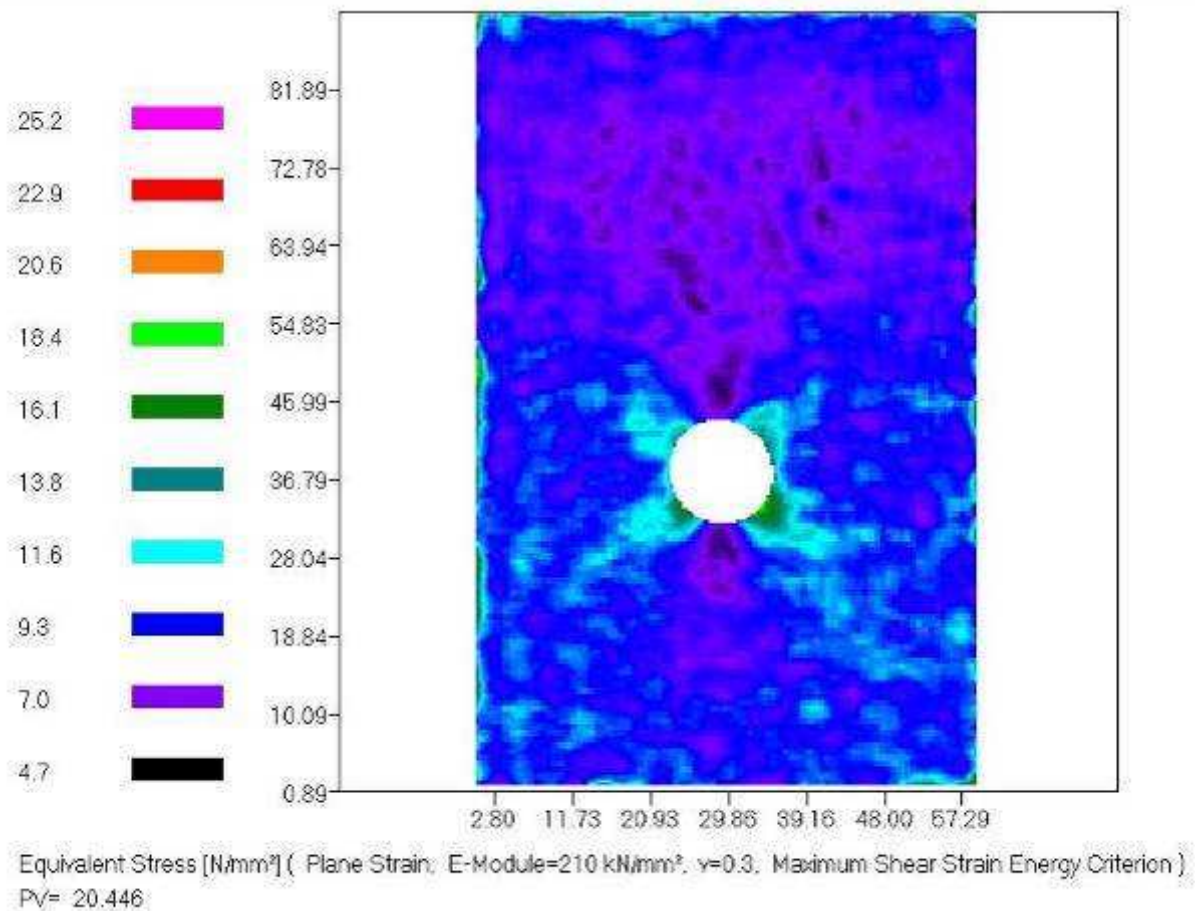


Figura 5.18 - O plano de tensões equivalente Von Mises.

5.2.3 Ensaio 03

Parâmetros utilizados:

- Tração
- Carga única = 3.3kN

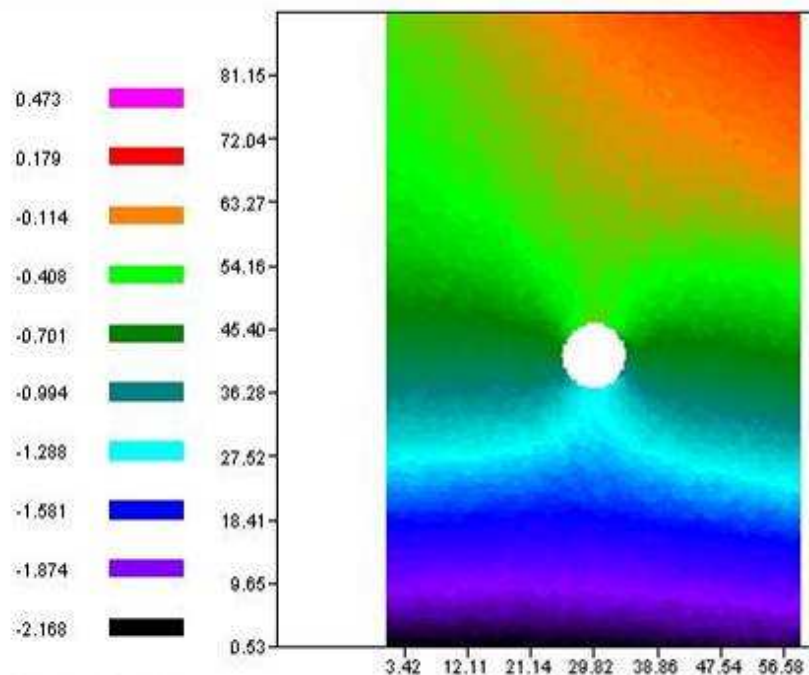


Figura 5.19 – Após a varredura do algoritmo na região limitada pelas bordas, chega-se ao mapa de fases contínuo.

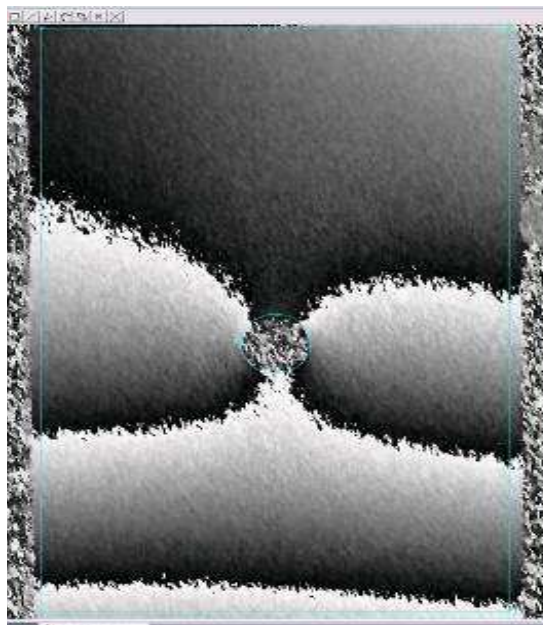


Figura 5.20 - Mapa de formação dos padrões de franjas com o detalhe da borda.

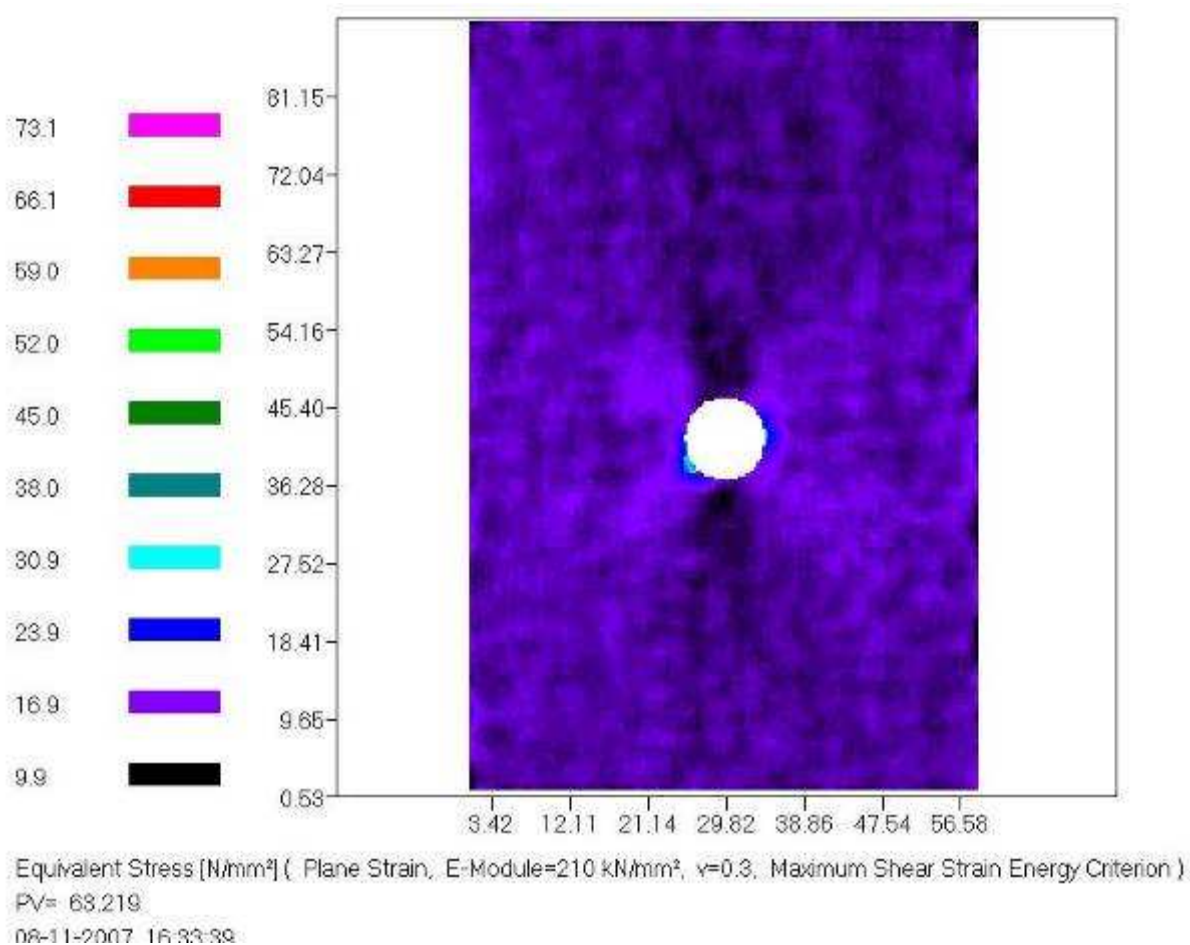


Figura 5.21 - Mapa de Tensões Equivalentes.

O Mapa das Tensões de Von Mises da Figura 5.21 mostra corretamente a região de acúmulo de tensões próxima ao orifício. No entanto, e da mesma forma como ocorreu no ensaio 1, com valores de tensões abaixo de 4 kN, houve desconexão devido a leve translação sendo observadas nos mapas de franjas das figuras 5.19 e 5.20. O resultado são valores de tensões ainda fora dos limites esperados em comparação com o esperado.

5.2.4 Ensaio 04

Parâmetros utilizados:

- Ensaio de tração
- Carga única = 5.1kN

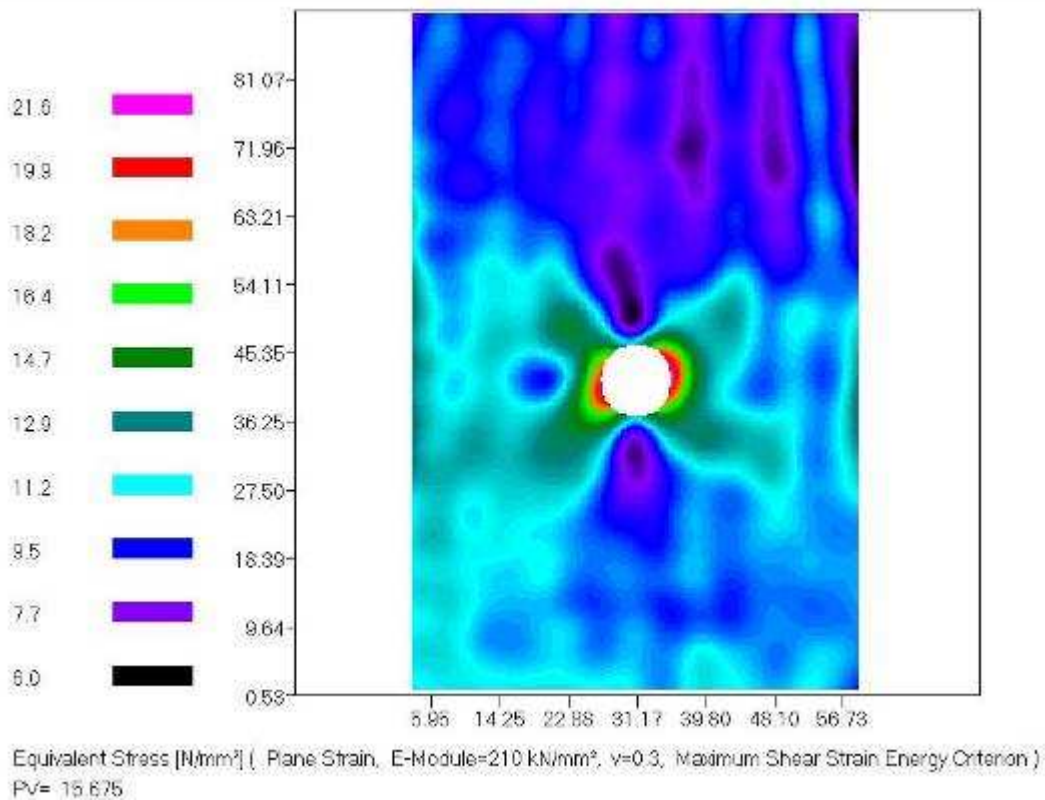


Figura 5.22 – Tensões equivalentes de Von Mises. Após dupla suavização, os ruídos foram excluídos e os valores entraram na faixa coerente com a simulação.

O mapa de tensões de Von Mises da figura 5.22 está muito semelhante ao mapa resultante nas simulações apresentando-se qualitativamente de acordo com o esperado. Os valores de tensões nas regiões de maiores valores também se apresentam de acordo com o esperado entre 19.9 N/mm² em máximas tensões em torno da abertura.

5.2.5 Ensaio 05

Parâmetros utilizados:

- Ensaio de tração
- Carga Única 4.3 kN

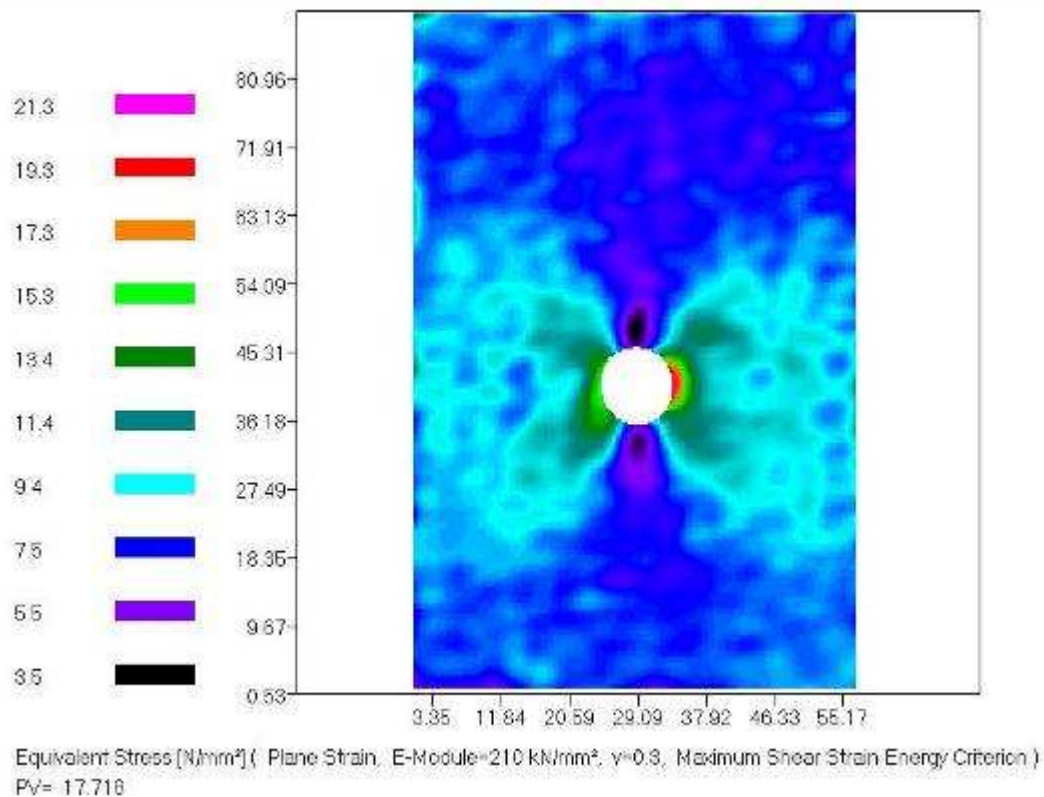


Figura 5.23 – Nestas condições as imagens estão de acordo com a simulação. As regiões de acumulo de tensão conferem com o esperado e os valores estão na faixa de valores corretos.

Novamente, o mapa de tensões de Von Mises da figura 5.23 está muito semelhante ao mapa resultante nas simulações apresentando-se qualitativamente de acordo com o esperado. Os valores de tensões nas regiões de maiores valores também se apresentam de acordo com o esperado entre 19.3 N/mm² em máximas tensões em torno da abertura.

5.2.6 Ensaio 06

Parâmetros utilizados:

- Ensaio de Compressão
- Carga única = 4.3kN

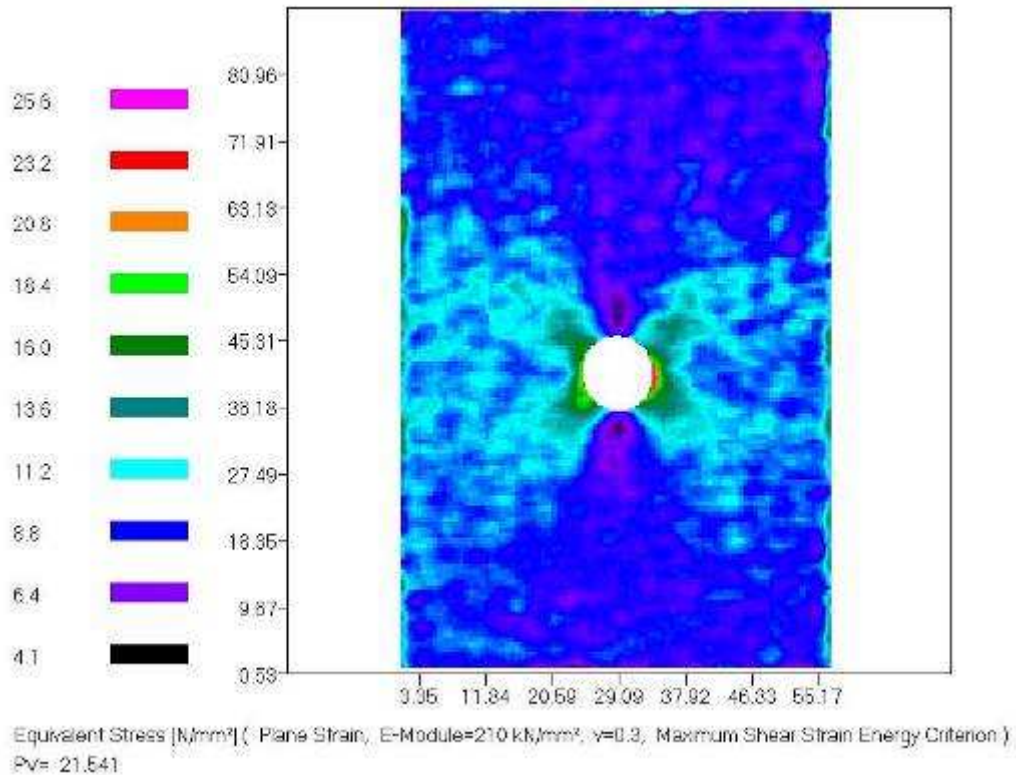


Figura 5.24 - Ensaio de compressão apresentou os mesmos resultados da tração.

Neste ensaio, a principal característica é que, diferentemente dos ensaios anteriores, trata-se de um ensaio de compressão. Mesmo assim, e novamente, o mapa de tensões de Von Mises da figura 5.24 está muito semelhante ao mapa resultante nas simulações apresentando-se qualitativamente de acordo com o esperado. Os valores de tensões nas regiões de maiores valores também se apresentam de acordo com o esperado entre 16N/mm² e 23.2 N/mm².

5.2.7 Ensaio 07

Parâmetros utilizados:

- Ensaio de tração
- Carga única = 4.5kN

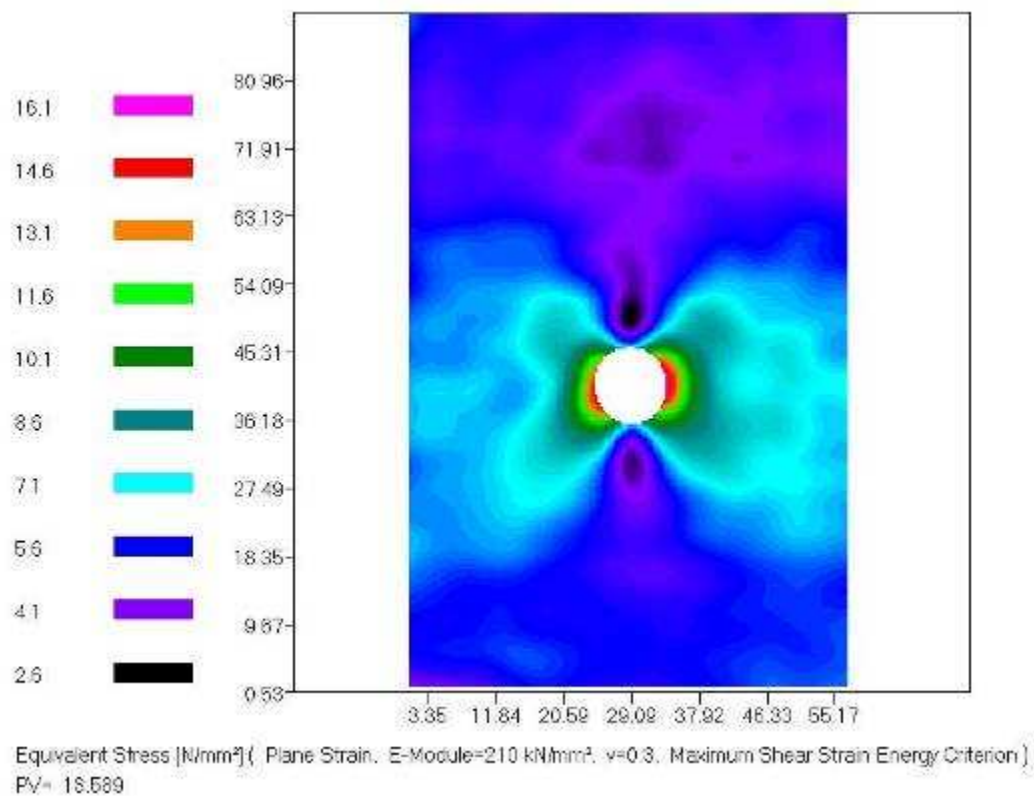


Figura 5.25 – Após dupla suavização os valores continuam na faixa correta melhorando a resolução dos mapas.

O mapa de tensões de Von Mises da figura acima está muito semelhante ao mapa resultante nas simulações apresentando-se qualitativamente de acordo com o esperado. Os valores de tensões nas regiões de maiores valores também se apresentam de acordo com o esperado entre 14.6 N/mm² e 16.1 N/mm².

5.2.8 Ensaio 08

Parâmetros utilizados:

- Ensaio de Compressão
- Carga única = 4.6kN

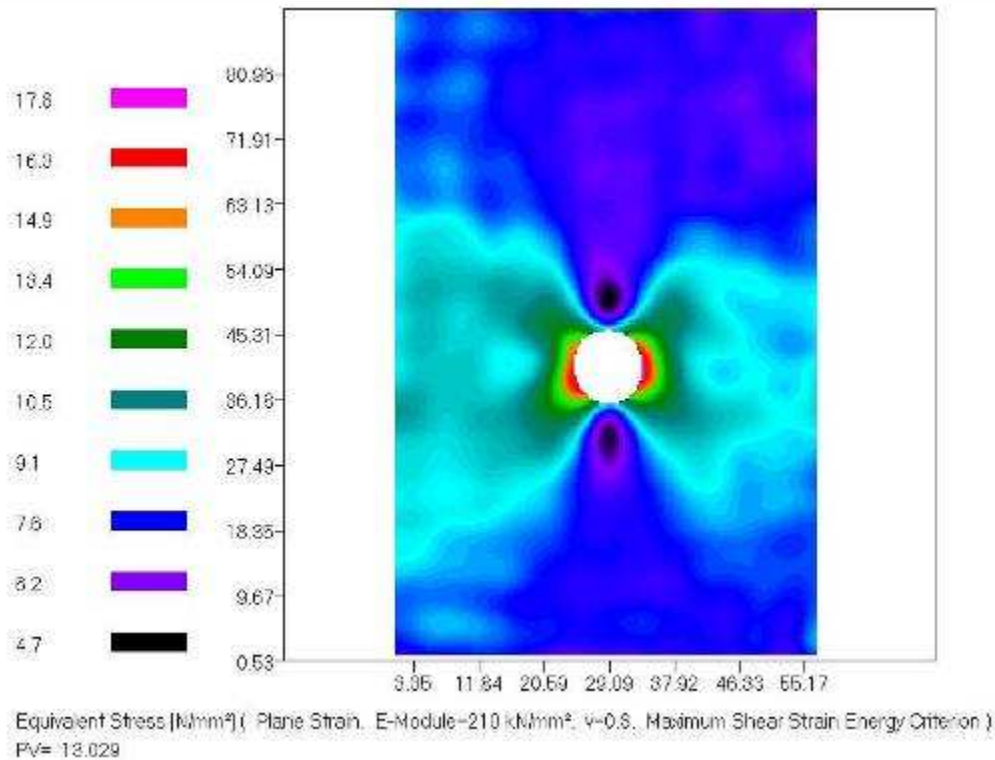


Figura 5.26 - Ensaio de compressão apresentou os mesmo resultados da tração.

Neste ensaio, a principal característica igualmente ao ensaio 6, a aplicação da carga é em compressão. O mapa de tensões de Von Mises da figura 5.26 está muito semelhante ao mapa resultante nas simulações apresentando-se qualitativamente de acordo com o esperado. Os valores de tensões nas regiões de maiores valores também se apresentam de acordo com o esperado entre 14.9 N/mm² e 16.3 N/mm².

6 CONCLUSÃO

O sistema ESPI aplicado neste trabalho apresentou resultados muito próximos aos simulados tanto qualitativamente quanto quantitativamente. Esses resultados demonstram a sua aplicabilidade em componentes mecânicos sendo expansível a diversas geometrias destacando como grande vantagem o não contato com a peça podendo analisar regiões complexas onde extensômetros não podem ser fixados, característica não destrutível e alta sensibilidade aos mínimos deslocamentos. Isso tem como consequência a utilização de um equipamento menos robusto para aplicação das cargas.

A metodologia *Taguchi* em que foram tratadas as variáveis de influência e fontes de variabilidade mostrou uma maneira sistemática do planejamento experimental. A tratativa do problema partindo-se da identificação das variáveis envolvidas, análise e estratificação em Variáveis influentes e Fontes de Variabilidade Definidas as variáveis, demonstrou a aplicabilidade do método. O resultado é a matriz experimental a partir da qual os ensaios foram realizados variando-se os níveis estabelecidos. Os resultados dos ensaios levaram a identificar uma terceira variável que foi facilmente manipulada, a tensão aplicada. Os ensaios mostraram a faixa com melhores resultados – acima de 4kN – pois, na prática, essa tensão estabilizou a peça não permitindo a translação. Por fim, os resultados se mostraram confiáveis com respostas qualitativas das regiões de maiores tensões bem definidas e valores dentro da faixa dos valores simulados anteriormente.

O método foi aplicado partindo-se de valores de referência resultantes de simulação via *software*. Dessa forma, o método ainda não apresenta total independência de outras metodologias que norteiam os resultados do ESPI. No entanto, mostrou grande potencial como ferramenta de confirmação e apoio as simulações computacionais.

6.1 DIFICULDADES

Há alguns itens levantados durante a estratificação das causas que podem ser levantadas com as variáveis que inserem dificuldades na aplicação do método ESPI.

Variável	Dificuldades
Vibrações externas	Devido à alta sensibilidade do sistema ESPI, a mínima vibração é detectada durante a aquisição das franjas. Portanto, deve-se ter o cuidado no momento da aquisição e identificar a estabilização do sistema antes de concluir o mapa de franjas.
Equipamento de aplicação da carga inadequado	Devido à característica de aplicações em análise de fadiga, o equipamento utilizado apresenta um déficit na aplicação de tensão única e constante.
Projeto sistema de fixação mal dimensionado	O sistema ESPI tem como pré-requisito uma ampla área de visualização e aquisição da correlação das franjas em função da deformação das microestruturas da superfície. O sistema de fixação mal dimensionado pode dificultar o campo de visão ou permitir a translação da peça. Além disso, caso o metal do sistema de fixação tenha rigidez inferior ao corpo de prova, as tensões serão deslocadas para o sistema de fixação influenciando nos resultados.
Complexidade da peça	O sistema foi concebido para detectar micro deslocamentos. Dessa forma, o sistema ESPI independe da complexidade da peça desde que se tenha um campo de visão suficiente.
Bordas mal dimensionadas	As bordas dependem da habilidade do operador do equipamento.
Corpo de prova com deformação plástica	Deve-se ter o cuidado na aplicação da carga para que esta não ultrapasse a faixa elástica do corpo de prova pois o sistema ESPI detecta deslocamentos da superfície independente da faixa plástica ou elástica. Dessa forma pode haver falsa leitura e descorrelação das franjas.

Tabela 6.1 – Variáveis e respectivas dificuldades.

6.2 SUGESTÕES

O método se mostra aplicável a componentes mecânicos, sendo, portanto aplicável a componentes de motores a combustão como as bielas e virabrequins. A aplicação nestes componentes fica como sugestão para próximos estudos e aplicação.

Como sugestão para se diminuir as dificuldades levantadas anteriormente, seguem os itens:

Variável	Dificuldades
Vibrações externas	Para se evitar a influencia externa das vibrações, devem-se realizar os testes em ambiente controlado que minimize as vibrações.
Equipamento de aplicação da carga inadequado	O sistema ESPI é muito sensível. Portanto, não há necessidade de se utilizar um equipamento muito robusto com aplicação de grandes cargas, mas deve-se utilizar uma aplicação de carga que não varie durante o teste.
Projeto sistema de fixação mal dimensionado	O sistema de fixação é o item de maior importância no setup do sistema ESPI. Deve-se ter o cuidado com o campo de visão, material e principalmente, projetar o sistema de modo a eliminar as translações da peça que pode levar a descorrelação das franjas.
Complexidade da peça	Para o setup do sistema é recomendado que se padronize um procedimento de testes iniciais antes da aplicação no componente mecânico final com uma peça de menor complexidade e comportamento previamente estudado.
Bordas mal dimensionadas	No mesmo procedimento anterior, deve-se padronizar o delineamento das bordas que limitam a área de interesse.

Tabela 6.2 – Variáveis e respectivas dificuldades: para cada item o presente trabalho sugere ações que minimizam as dificuldades.

Apêndice A

Dados técnicos – Q300

As principais características do equipamento Q-300 Dantec Dynamics utilizado no presente trabalho são apresentadas na tabela XX:

Dados Técnicos	Q300
Sensibilidade de Medição:	0.03 - 1 μm ajustável.
Range de medição:	(10 - 100 μm por passo)
Área de medição:	Até 200 x 300 mm ² (8"x12")
Modos de operação:	Automatic, manual, 1D, 2D, 3D
Interface	TIFF, ASCII, Windows metafile
Velocidade de aquisição:	3.5 s para análise 3D
Análise dos dados:	Automático serial ou manual (a partir de qualquer carga)
Comprimento base de iluminação:	Min. 120 mm (4.7")
Dimensões da cabeça (sem os braços):	80 x 80 x 120 mm ³ (3.1" x 3.1" x 4.7")
Peso:	2.5 kg (5.5 lbs)
Laser:	Laser diodo, Potência 2 x 75 mW, comprimento de onda 785nm
Processador (hardware):	Pentium PC
Sistema operacional:	Windows 2000, XP

Tabela A1: Este é um exemplo de como utilizar tabelas

O sistema modular permite as diversas configurações dependendo da aplicação (dimensões) requerida como segue:

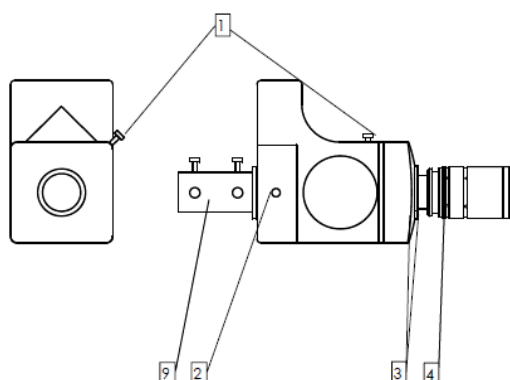


Figura A.1 - 1D fora-do-plano sem sensor de iluminação.

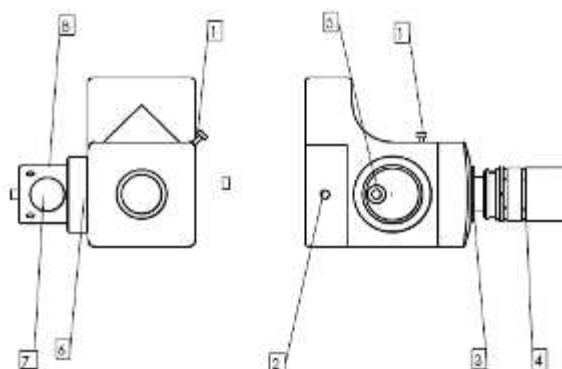


Figura A.2 – 1D fora-do-plano com sensor de iluminação.

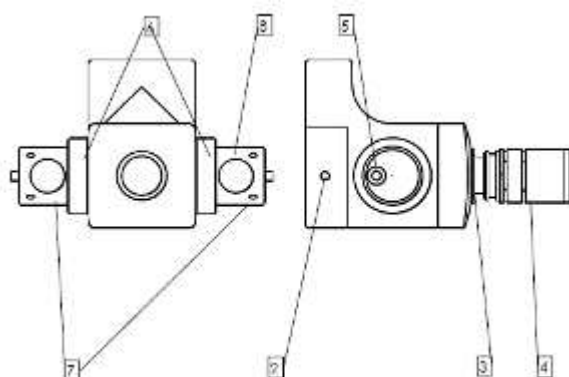


Figura A.3- 1D plano.

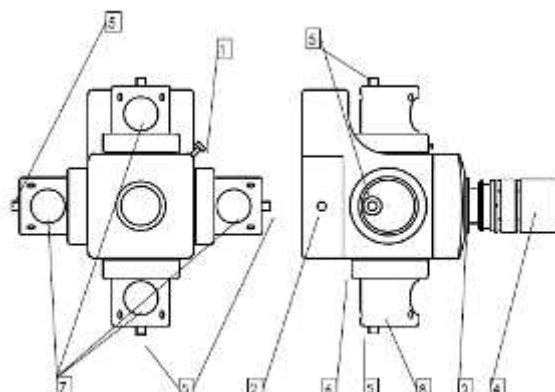


Figura A.4- 2D/3D.

Item	Descrição	Item	Descrição
1	Parafuso de ajuste para feixe de referência.	6	Anel protetor para ajuste do braço.
2	Aperto da tampa	7	Abertura de passagem dos feixes
3	Anel de ajuste das lentes	8	Braços de iluminação
4	Lentes	9	
5	Parafuso de ajuste para feixe de iluminação (radial)		

Tabela A.2 – Descrição detalhada dos itens construtivos

Referências Bibliográficas

- BAGNATO, V.S., **Os Fundamentos da Luz Laser**. Instituto de Física de São Carlos. Disponível em : <URL: <http://www.sbfisica.org.br/v1/>>. Acesso em 09/06/2009.
- BUTTERS, J. N. e LEENDERTZ, J. A. Holographic and video techniques applied to engineering measurements. *Journal Measurement and Control*, v.4, (12), pp.349-354, 1971.
- BUTTERS, J. N. e LEENDERTZ, J. A. *Application of Coherent Light Techniques to Engineering Measurement*. Applied Optics, Vol. 11, Issue 6, pp. 1436-1437 (1972)
- CHEN, Joseph C., LI, Ye, COX, Ronald A *Taguchi-based Six Sigma approach to optimize plasma cutting process: an industrial case study*, Int J Adv Manuf Technol , Londres, 41:760–769, (2009).
- CLOUD, G. *Optical Methods of Engineering Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, 503p.
- CLOUD, G. Optical Methods in Experimental Mechanics. Part 08: *Michelson Interferometry*. Experimental Techniques, pp.15-17, Michigan, 2003
- CLOUD, G. Optical Methods in Experimental Mechanics. Part 17: *Laser Doppler Interferometry*. Experimental Techniques, pp.27-30, Michigan, 2002
- CLOUD, G. Optical Methods in Experimental Mechanics. Part 18: *Geometric Moiré Phenomena and Simulations*. Experimental Techniques, pp.15-18, Michigan, 2005
- CLOUD, G. Optical Methods in Experimental Mechanics. Part 24: *Demonstrations of Laser Speckle Phenomena*. *Experimental Techniques*, v.31, (1), pp.27-30, Michigan, 2006.

- CLOUD, G. Optical Methods in Experimental Mechanics. Part 25: Objective *Speckle*. *Experimental Techniques*, v.31, (1), pp.15-17, 2007.
- CLOUD, G. Optical Methods in Experimental Mechanics. Part 26: Subjective *Speckle*. *Experimental Techniques*, v.31, (1), pp.17-19, 2007.
- CLOUD G., *Speckle Interferometry made simple and Cheap*. Experimental Techniques. Califórnia, 2003.
- CHU T., MAHAJAN A., and LIU C. T., *An Economical Visio-based method to obtain whole-field deformation profiles*. Experimental Techniques. Califórnia, 2002.
- ETTEMEYER., A. Laseroptical Strain Sensor for Non Contact and Whole Field Strain Analysis. In: 17th Congress of the International Commission for Optics. *Proceedings SPIE, Optics for Science and New Technology*. Bethel: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1996, v.2782, pp. 420-423.
- GOODMAN, J. W. Statistical Properties of Laser *Speckle* Patterns. In: *Laser Speckle and Related Phenomena*, Topics in Applied Physics, v.9. Berlin e New York: Springer-Verlag, 1975.
- GUELORGET B. et al. *Strain rate measurement by Electronic Speckle Pattern Interferometry: A new look at the strain localization onset*, Materials Science and Engineering. Elsevier: França, 2005, p. 234-241.
- HALLIDAY, D., RESNICK, R., Walker, J. *Fundamentos de Física 4 – Óptica e Física Moderna*. Rio de Janeiro: LTC, 1996, 355p.
- HARIHARAN, P., OREB, B. F., and BROWN, N., 1982, “A Digital Phase-Measurement System for Real-Time Holographic Interferometry,” Opt. Commun.,41_6_, pp. 393–396.

- HONGWEI, G., ZHAN Z., MINGYI, C., 2007, “Efficient iterative algorithm for phase-shifting interferometry” *Optics and Lasers in Engineering*, 45, pp. 281–292.
- JONES, R., WYKES, C. *Holographic and Speckle Interferometry*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989, 353p.
- LEENDERTZ J.A. *Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect*. *Journal of Physics*, v.3, Grã Bretanha, 1970, p. 214-218.
- LI, Ming-Hsien C. *The alpha risk of the Taguchi method for STB type quality characteristic*, *Int J Adv Manuf Technol*, Londres, 2005, 25: 571–578
- MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 3^a edição, J. Wiley and Sons, 1991, p.414-433.
- MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 6^a edição. J. Wiley and Sons, 2005, p. 464-480
- M. NIEMZ M , *Laser–tissue interactions: fundamentals and applications, 2nd Edition*, *Optics and Lasers in Engineering*; Springer, Berlin, 2002, p. 119-120.
- NATIONAL INSTRUMENTS, *Strain Gauge Measurement – A tutorial*. Disponível em: <URL: <http://www.scribd.com/doc/12921011/NI-Strain-Gauge-Tutorial>>. Acesso em 10/06/2010.
- PATIL A, LANGOJU R., RASTOGI P., *Phase shifting interferometry using a robust parameter estimation method*. *Optics and Lasers in Engineering* v.45 (2007) 293–297. Disponível em : <URL: <http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 10/07/2008.

ROSS, P. J. *Taguchi techniques for Quality Engineering*; New York, NY: McGraw-Hill, 1996. v.2, p. 23-40.

RESTIVO, G. e CLOUD, G. L. Embedded Digital *Speckle* Pattern Interferometry for Three-dimensional Strain Analysis. *Experimental Mechanics*, Online First, January 2008. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/b22xq7k12425m585/>> Acessado em 25 de março de 2008.

SHENOY, P. S., FATEMI, A. Dynamic analysis of loads and stresses in connecting rods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, v.220, (5), pp.615-624, 2006.

TAGUCHI, G. *System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Cost*, UNIPUB, White Plains, NY. 1987.

TAGUCHI, G. *Introduction to Quality Engineering: Design Quality into Products and Process*. Asian Productivity Organization, Tokyo, 1986.

TILBURY, R. J. The prediction and measurement of axial forces, bending moments and accelerations in an engine connecting rod. *Strain*, v.18, (2), pp.55-59, 1982.

WERKEMA, Cristina. *Ferramentas Estatísticas básicas para o gerenciamento de processos*. 1ed. Belo Horizonte: Werkema Editora Ltda., 2006, pp 95-110.