

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR EDUARDO
HIROSHI MATSUSAKI
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 20 / 02 / 2009


ORIENTADOR

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

Eduardo Hiroshi Matsusaki

Metodologia para Medição de Tensões em Virabrequins Utilizando ESPI

Campinas, 2009.

067/2011

Eduardo Hiroshi Matsusaki

Metodologia para Medição de Tensões em Virabrequins Utilizando 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 Junior

Campinas

2009

Unidade BCL
T/UNICAMP

Cutter M429m

V. _____ Ed. 92859

Tombo BC _____

Proc. 16.130.2011

C _____ D 1

Preço R\$ 11,00

Data 11/10/2011

Cód. tit. 808014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M429m Matsusaki, Eduardo Hiroshi
Metodologia para medição de tensões em
virabrequins utilizando ESPI / Eduardo Hiroshi
Matsusaki. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Auteliano Antunes dos Santos Junior.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Interferometria. 2. Laser - Aplicações industriais.
3. Medidores de tensão. 4. Deformações e tensões. 5.
Testes não-destrutivos. I. Santos Junior, Auteliano
Antunes dos. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Stress measurements in crankshafts using ESPI

Palavras-chave em Inglês: Interferometry, Laser - Industrial applications, Stress
meters, Strain and stress, Non-destructive techniques

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Marco Lúcio Bittencourt, Pedro Paulo Balestrassi

Data da defesa: 20/02/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

PP 1379
P. 02

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Metodologia para Medição de Tensões em Virabrequins Utilizando ESPI

Autor: Eduardo Hiroshi Matsusaki

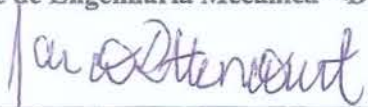
Orientador: Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Junior

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

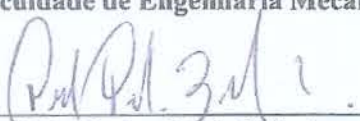
201164423


Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Junior

Faculdade de Engenharia Mecânica – Departamento de Projeto Mecânico – UNICAMP


Prof. Dr. Marco Lúcio Bittencourt

Faculdade de Engenharia Mecânica – Departamento de Projeto Mecânico – UNICAMP


Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi

Instituto de Engenharia de Produção e Gestão – Universidade Federal de Itajubá

Campinas, 20 de fevereiro de 2009.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais por todo o suporte que tenho recebido durante toda a minha vida até o presente momento. Mesmo estando já algum tempo longe de casa, o apoio deles tem sido fundamental nessa escalada.

Agradecimentos

A conclusão do trabalho merece meus agradecimentos a diversas pessoas:

Aos meus pais pelo suporte em todos os aspectos.

Ao meu orientador pela ajuda tanto nos momentos mais críticos quanto nos mais simples.

Ao Msc. Luis Galli pela oportunidade de desenvolver esse trabalho.

Gostaria de agradecer também a colaboração do Eng. Élcio Ferracini pela ajuda e apoio durante a realização dos experimentos na ThyssenKrupp. Também a colaboração dos Engs. Robson Cruz, Alex Rodrigues, Sergio Villalva.

Além de todos os professores e colegas do departamento pela ajuda prestada de forma direta ou indireta.

Muitas das coisas mais importantes do mundo foram conseguidas por pessoas que continuaram tentando quando parecia não haver mais nenhuma esperança de sucesso.
Dale Carnegie

Resumo

MATSUSAKI, Eduardo Hiroshi, *Metodologia para Medição de Tensões em Virabrequins Utilizando ESPI*, Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 131p. Dissertação (Mestrado).

Tensões mecânicas estão entre as principais causas de falhas de componentes estruturais. A medição de tais tensões pode ser feita com técnicas que relacionam alguma variável física a tensão existente. Técnicas destrutivas podem ser usadas para tal finalidade, mas apenas no controle de qualidade. Entre as técnicas não destrutivas destacam-se os Raios X, a difração de Nêutrons e a acustoelasticidade. Uma das técnicas mais promissoras envolve a Interferometria a Laser. Segundo essa técnica, a interferência entre feixes de luz permite a identificação de pontos da superfície e estes, quando deslocados sob a aplicação de esforços, possibilitam o cálculo das deformações e tensões. Este trabalho apresenta a aplicação da técnica de Interferometria Eletrônica entre Padrões de *Speckles* – ESPI para a medição de tensões em virabrequins. O estudo consistiu em uma revisão teórica do método; no estudo dos fatores que influenciam o resultado da medição; na validação da técnica para a medição de tensões, através da comparação com resultados do MEF e da extensometria; na aplicação da técnica para a medição em chapa entalhada e no emprego desta para a medição de tensões em virabrequins. O estudo permitiu também a ajustagem ótima dos parâmetros que influenciem a medição. Os resultados obtidos mostraram que o método é promissor quanto ao seu emprego generalizado; que a resolução obtida é adequada para o emprego na medição nos componentes analisados e que o método tem limitações importantes, que devem ser avaliadas para cada aplicação.

Palavras Chave:

Interferometria a laser, medição de tensões, tensões mecânicas, métodos não destrutivos.

Abstract

MATSUSAKI, Eduardo Hiroshi, *Metodologia para Medição de Tensões em Virabrequins Utilizando ESPI*, Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 131p. Dissertação (Mestrado).

Mechanical stresses are among the main causes of failure of structural components. The measurement of such stresses can be made with techniques that relate some physical variable with the stress. Destructive techniques can be used for this purpose, but only in quality control. Non-destructive methods such as the X rays, the neutron diffraction and acoustoelasticity, are among the most used techniques. One of the most promising techniques applies Laser Interferometry. In this technique, the interference between light beams identifies points on the surface and these, when displaced under external forces, enable the calculation of the deformations and of the stresses. This paper presents the employ of the Electronic Speckle Pattern Interferometry technique for measuring stresses in crankshafts. It consisted of a theoretical review of the method; the study of the factors that would compromise the measuring results; a validation of the technique to measure stresses, by comparing MEF with strain gauges results; using the technique to take measures in a entailed plate and in the stresses measurements of crankshafts. This work also allowed the optimum adjustment for the parameters inducing the measurements. The obtained results showed a promising method for its general use; showed too that the resolution obtained is proper to the use in parts analyzed and that the method has important limitations that should be analyzed in every situation.

Keywords:

Laser interferometry, stress measurement, mechanical stresses, non destructive techniques.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Componentes básicos de um motor de combustão interna contendo quatro cilindros em linha.	6
Figura 2.2: Outros arranjos para os cilindros (a) seis cilindros em V (b) quatro cilindros opostos.	6
Figura 2.3: Componentes de um virabrequim.	7
Figura 2.4: Modelo utilizado e direções das forças atuantes.	8
Figura 2.5: Esforços no virabrequim em função do ângulo deste.	9
Figura 2.6: Pontos de interesse analisados.	9
Figura 2.7: Tensões nos pontos de interesse. Fonte: Montazersadgh e Fatemi (2007).	10
Figura 2.8: Fluxograma dos níveis de análise.	11
Figura 2.9: Métodos por interferometria laser.	13
Figura 2.10: Sistema genérico para ESPI. (Cloud, 1998).	14
Figura 2.11: Sistema óptico sensível a deslocamentos tangenciais para ESPI.	15
Figura 2.12: Sistema óptico alternativo sensível a deslocamentos tangenciais para ESPI.	16
Figura 2.13: Sistema óptico sensível a deslocamentos normais para ESPI.	16
Figura 2.14: Sistema óptico alternativo sensível a deslocamentos normais para ESPI.	17
Figura 2.15: Esquema para novo sistema de coordenadas.	25
Figura 3.1: Fotografia do cabeçote principal do sistema 3D-ESPI Q-300.	34
Figura 3.2: Detalhes do sistema Q-300. Fonte: Manual do Equipamento.	35
Figura 3.3: Aparato óptico.	36
Figura 3.4: Esquema da máquina de aplicação de carga.	38
Figura 3.5: Geometria da placa plana. (a) Desenho 2D - Medidas em mm. (b) Croqui 3D.	40
Figura 3.6: Geometria do virabrequim analisado neste trabalho. Medidas em mm.	41
Figura 3.7: Geometria do dispositivo de fixação para placa plana. (a) Desenho 2D - Medidas em mm. (b) Croqui 3D.	42
Figura 3.8: Esboço do dispositivo de fixação para o virabrequim (a) 3D (b) Três vistas 2D.	43
Figura 3.9: Procedimento utilizado para a determinação das tensões.	44

Figura 3.10: Modelo geral de um processo de medição.....	46
Figura 4.1: Região e área ocupada pelo extensômetro na peça.....	59
Figura 4.2: Condições de contorno para a simulação.....	61
Figura 4.3: Deslocamentos nas direções x e y	61
Figura 4.4: Distribuição das tensões de Von Mises obtidas para carga de 200N.	62
Figura 4.5: Resultados experimentais ESPI.	66
Figura 4.6: Regiões analisadas.	73
Figura 4.7: Resultados para as tensões equivalentes de Von Mises.....	76
Figura A.1: Onda eletromagnética se propagando na direção do eixo x	91
Figura A.2: Difração de frente de onda plana em fenda única.....	96
Figura A.3: Difração de frente de onda plana em fenda dupla.	97
Figura A.4: Frente de onda plana atingindo rede de difração de diversas fendas.....	98
Figura A.5: Formação de <i>speckles</i> . Adaptada de Cloud (2007).....	101
Figura A.6: Geometria para observação de franjas holográficas. (Jones e Wykes, 1989).....	108
Figura A.7: Interferômetro com sensibilidade a deslocamentos superficiais normais. (Jones e Wykes, 1989).	114
Figura A.8: Modelo para obtenção de deslocamentos normais. (Jones e Wykes, 1989).	116
Figura A.9: Outro modelo para obtenção de deslocamentos normais. (Jones e Wykes, 1989). ..	117
Figura A.10: Arranjo para medição de deslocamentos tangenciais. (Leendertz, 1970).....	118

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Resultados para fator de concentração de tensões (K_t).	12
Tabela 2.2: Resumo dos resultados para processos de subtração e adição de sinais.	20
Tabela 2.3: Cossenos diretores para transformação de coordenadas.	25
Tabela 3.1: Propriedades e composição química do aço SAE 1040.	39
Tabela 3.2: Diretrizes a serem seguidas no desenvolvimento de experimentos.	47
Tabela 3.3: Fatores controláveis e respectivas classificações.	49
Tabela 3.4: Fontes de variabilidade e respectivas classificações.	51
Tabela 3.5: Resumo dos fatores de influência e fonte de variabilidade controlável e respectivos níveis avaliados.	52
Tabela 3.6: Planejamento experimental fração meia (2^{4-1}).	53
Tabela 3.7: Efeitos confundidos com os efeitos principais.	54
Tabela 3.8: Efeitos confundidos com os efeitos da interação entre dois fatores.	54
Tabela 3.9: Planejamento experimental adotado.	55
Tabela 3.10: Fatores controláveis relacionados à medição do perfil da superfície do virabrequim.	56
Tabela 3.11: Fatores de influência e respectivos níveis para a medição no virabrequim.	56
Tabela 3.12: Planejamento experimental adotado para o virabrequim.	57
Tabela 4.1: Resultados obtidos para os três níveis de tensão. Valores em MPa.	59
Tabela 4.2: Aleatorização dos ensaios e respectivos níveis das variáveis.	63
Tabela 4.3: Resultados para deslocamentos máximos nas direções x e y ($dx_{\max}$ e $dy_{\max}$). Valores médios das tensões de Von Mises ($\bar{\sigma}_{vm}$). Tensões de Von Mises normalizadas (σ_{vm}).	67
Tabela 4.4: Estimativas dos efeitos dos parâmetros combinados.	68
Tabela 4.5: Resultados para a análise de variâncias.	69
Tabela 4.6: Resultados para análise pela metodologia de Taguchi.	71
Tabela 4.7: Aleatorização dos ensaios.	72
Tabela 4.8: Resultados para deslocamentos e tensões de Von Mises.	77

Tabela 4.9: Resultados da análise de variâncias.	78
Tabela 4.10: Resultados para análise pela metodologia de Taguchi.	79
Tabela A.1: Guia para obtenção do sinal de N	109
Tabela A.2: Guia para obtenção do sinal de ϕ	125

Nomenclatura

Letras Latinas

a – tamanho ou diâmetro do orifício.	[mm]
A – amplitude de onda eletromagnética.	[-]
B – campo magnético.	[A/m]
Br – brilho na imagem.	[-]
C – vetor de sensibilidade.	[-]
d – deslocamento.	[mm]
E – módulo de elasticidade de Young.	[GPa]
f – frequência.	[Hz]
G – módulo de elasticidade transversal.	[GPa]
I – intensidade.	[-]
k – constante.	[-]
K – constante.	[-]
n – vetor diretor.	[-]
N – número de ordem de franja.	[-]
r – ponto no espaço.	[mm]
t – tempo.	[s]
u – deslocamento em relação a direção <i>x</i> .	[mm]
U – amplitude de onda num ponto.	[-]
v – deslocamento em relação a direção <i>y</i> .	[mm]
V – voltagem no CCD.	[Volts]
w – deslocamento em relação à direção <i>z</i> .	[mm]
x – direção, eixo coordenado.	[-]
y – direção, eixo coordenado.	[-]
z – direção, eixo coordenado.	[-]

Letras Gregas

γ – modulação de fase.	[-]
ϵ – deformação.	[-]
θ – inclinação de feixe.	[rad]
κ – contraste de feixe.	[-]
λ – comprimento de onda.	[nm]
ν – coeficiente de Poisson.	[-]
σ – tensão.	[MPa]

ϕ – fase de onda. [rad]
 ψ – diferença de fase. [rad]

Subscritos

0 – valor máximo.
T – valor total.
x – grandeza relativa à direção x.
y – grandeza relativa à direção y.
z – grandeza relativa à direção z.

Abreviações

C – fontes de variabilidade controláveis.
FI – fontes de variabilidade.
FR – fontes de ruído.
I – fontes de variabilidade incontroláveis.
MC – fatores mantidos constantes.
PV – fatores cuja variação é permitida.

Siglas

CAD – desenho assistido por computador (*computer aided design*).
CCD – dispositivo de carga acoplado (*charge-coupled device*).
CFRP – polímero de fibra de carbono reforçada (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*).
ESPI – Interferometria por correlação de padrões de *speckles* (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*).
PMMA – polimetilmetacrilato.
PZT – transdutor piezo elétrico.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Virabrequins em Motores de Combustão Interna	3
1.2	Objetivo.....	3
1.3	Apresentação do Trabalho.....	4
2	Conceitos Básicos e Revisão de Literatura	5
2.1	Descrição do virabrequim no motor.....	5
2.1.1	Tensões no virabrequim	7
2.2	Medições de tensão com interferometria laser.....	12
2.2.1	Interferometria Eletrônica entre Padrões de Speckles (ESPI).....	13
2.2.2	Relação tensão-deslocamento	22
	a) Superfícies planas	24
	b) Superfícies não-planas.....	24
2.3	Revisão Bibliográfica sobre Interferometria Laser	26
3	Planejamento Experimental.....	33
3.1	Equipamentos, Materiais e Geometrias.....	33
3.1.1	Equipamentos	34
3.1.2	Materiais	39
3.1.3	Geometria dos materiais.....	39
3.2	Método de medição	43
3.3	Aplicações simples – placa plana com fenda	45
3.3.1	Fatores relacionados ao processo	46
3.3.2	Classificação dos fatores	48
3.4	Aplicações em virabrequins	55
4	Resultados e Discussões.....	58
4.1	Placa Plana	58
4.1.1	Análise experimental inicial (extensômetro).....	58
4.1.2	Simulação do carregamento	60
4.1.3	Resultados experimentais ESPI.....	62

a) <i>Análise do planejamento meia fração</i>	63
b) <i>Análise do planejamento proposto (Taguchi)</i>	70
4.2 Virabrequim	72
a) <i>Análise de Variância</i>	77
b) <i>Análise pela metodologia de Taguchi</i>	79
4.3 Considerações finais.....	80
5 Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos	81
6 Referências Bibliográficas	84
Apêndice A.....	90
A.1 Características do laser e outros conceitos básicos	90
A.1.1 Interferência entre ondas de luz.....	92
A.1.2 Difração	95
A.1.3 Holografia.....	99
A.1.4 O efeito speckle	100
A.2 Interferometria holográfica.....	102
A.2.1 Técnica da dupla-exposição	103
A.2.2 Técnica tempo-real	104
A.2.3 Análise qualitativa das franjas de interferência.....	105
A.2.4 Análise quantitativa das franjas de interferência.....	106
A.2.5 Localização das franjas	109
A.2.6 Plataforma para interferometria holográfica	109
A.2.7 Mapeamento de perfis de superfície.....	110
A.3 Interferometria de speckles	110
A.3.1 Fotografia de speckles	111
A.3.2 Interferometria por correlação de padrões de speckles	113
A.4 Mudança de fase para o aprimoramento da interferometria.....	120
A.4.1 Técnica dos três passos.....	122
A.4.2 Técnica dos quatro passos	123
A.4.3 Técnica de Carré.....	124
A.4.4 Desempacotamento de fase	125
Apêndice B.....	127

B.1 Equacionamento das estimativas dos fatores – placa plana	127
B.2 Equacionamento da análise de variâncias – placa plana	128
B.2.1 Somas de quadrados	128
B.2.2 Graus de Liberdade (DOF – degrees of freedom)	129
B.2.3 Médias quadráticas	129
B.2.4 Estimadores F_0	130
B.3 Análise pela metodologia de Taguchi	130
B.4 Equacionamento da análise de variâncias – virabrequim	131
B.4.1 Somas de quadrados	131
B.4.2 Graus de Liberdade (DOF – degrees of freedom)	131
B.4.3 Médias quadráticas	132
B.4.4 Estimadores F_0	132

1 Introdução

Desde meados do século passado, as indústrias têm aumentado sua necessidade de reduzir os tempos de desenvolvimento de novos produtos, aumentando sua qualidade e tornando-os mais competitivos. A indústria automobilística é uma das principais afetadas; é notória a sua busca por produtos customizados para o cliente, que apresentem propriedades mecânicas e características de segurança adequadas. Um dos tópicos de pesquisa está relacionado ao desenvolvimento de novos materiais; em outro, busca-se reduzir a quantidade de material utilizada nos produtos atuais para diminuição de custos.

A avaliação das tensões em componentes mecânicos é uma peça chave para alcançar estes objetivos. As técnicas comumente utilizadas como, por exemplo a extensometria, permitem a avaliação das tensões em alguns pontos apenas e ainda assim requerem certo tempo e cuidado na preparação das amostras. Com o avanço da informática, a utilização de métodos computacionais para avaliação de tensões tem crescido e se aprimorado ao longo dos últimos anos. Apesar desse crescimento na capacidade de análise via simulação, a necessidade da realização de ensaios experimentais ainda existe.

A técnica de avaliação de tensões baseada na Interferometria Eletrônica entre Padrões de *Speckles* – ESPI (sigla para o termo em inglês *Electronic Speckle Pattern Interferometry*) apresenta diversas características que fazem com que esta seja uma ferramenta muito útil para a área estrutural. Ela é uma técnica não-destrutiva que não exige contato com o componente em análise e que permite a determinação dos deslocamentos tri-dimensionais nos componentes, com alta resolução, em toda a região analisada. No entanto, tal região deve ser visível sendo esta uma das restrições do método.

O método ESPI tem se difundido em diversas áreas, incluindo análise de vibrações, visualização de fluxo de fluidos e medição de deformação e tensões entre outras. Esta técnica se mostra vantajosa no que diz respeito à perda de material ensaiado, que é nula. Por se tratar de uma técnica não-destrutiva, é de grande interesse da indústria automobilística e aeronáutica, cujos produtos possuem grande valor agregado e qualidade extremamente elevada.

A origem da interferometria eletrônica por padrões de *speckles* está na holografia, cuja técnica permite que uma onda seja gravada e reconstruída posteriormente, mantendo exatamente as mesmas características da onda original. Em outras palavras, uma imagem tridimensional reproduz exatamente o objeto gravado anteriormente. Embora o princípio da holografia tenha sido proposto em 1948 (Gabor), a técnica se tornou prática somente com o advento do laser. A interferometria holográfica remete-se aos anos 60 e é embasada no princípio da reconstrução de ondas. A interferometria de *speckles* deriva desse princípio. O efeito *speckle* é uma interferência aleatória característica da reflexão de um feixe de luz coerente ao incidir em uma superfície opticamente rugosa, quando sua variação de altura é da ordem ou maior que o comprimento de onda da luz do feixe de iluminação. A característica do laser como feixe coerente e monocromático permitiu utilizar o efeito *speckle* como princípio de aplicação do método em problemas práticos através da formação de padrões de franjas. Através destas, é possível calcular os deslocamentos e as tensões em superfícies submetidas a cargas.

Com o processamento digital de imagens, processadores de alta velocidade e alta capacidade de armazenamento de dados, foi possível obter os padrões de franjas através do processamento por vídeo dos perfis de superfícies iluminadas por feixes de laser, gerando franjas de correlação por padrões de *speckles*. Por isso o método é conhecido como *Electronic Speckle Pattern Interferometry*. Foi primeiramente demonstrado por Butters e Leendertz (1971). A maior vantagem do ESPI é que permite a correlação de franjas em tempo-real, apresentando as imagens em um monitor, sem a necessidade de outros recursos como processamento fotográfico, etc. Essa facilidade de operação permite que a técnica seja estendida a uma grande variedade de aplicações mais complexas.

Atualmente existem diversos sistemas comerciais que se baseiam na técnica ESPI para os seus diversos fins. Para a análise de tensões e deformações em especial, existem desde sistemas capazes de realizar as tarefas mais simples como a medição unidirecional até os capazes de realizar medidas tri-dimensionais. Estes sistemas requerem a configuração de diversas variáveis que afetam os resultados já que, devido à alta sensibilidade do método, variações ambientais podem causar problemas nas medições. Assim sendo, a aplicação a determinados componentes requer o conhecimento mínimo básico sobre os conceitos relacionados às técnicas interferométricas e também sobre o componente em análise. A má utilização do sistema pode trazer resultados errôneos prejudicando o resultado da medição e as conclusões decorrentes destas.

1.1 Virabrequins em Motores de Combustão Interna

O virabrequim de um motor é o elemento responsável por transformar o movimento linear dos pistões em movimento rotativo, como uma manivela. Ele se localiza no bloco do motor, nele encontram-se conectadas bielas que por sua vez estão ligadas aos respectivos pistões. Numa das extremidades do virabrequim há uma polia, por onde se transmite energia para outros componentes do automóvel, enquanto que na outra extremidade tem-se o volante de motor, responsável pela transmissão de energia para as rodas através da caixa de transmissão.

As principais solicitações neste componente estão relacionadas a esforços de torção e flexão. Como as exigências técnicas e comerciais de hoje em dia exigem uma maior pressão de combustão, o conhecimento das tensões geradas devido aos carregamentos é muito importante para que estes componentes possam ser projetados de forma mais eficiente ou ainda na otimização de peças já existentes.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é a aplicação da metodologia ESPI para medição de tensões em virabrequins de motores a combustão em ensaios estáticos. Tal metodologia deverá ser robusta de

forma que os fatores capazes de causar variações no resultado das medições possam ter seus efeitos minimizados. Assim sendo, são estudados tais fatores e sua influência e é proposta a estratégia adequada para tal minimização.

1.3 Apresentação do Trabalho

No Capítulo 2 segue-se uma introdução sobre conceitos básicos abordados na dissertação, tais como: a descrição das cargas em serviço que ocorrem em virabrequins, interferometria eletrônica entre padrões de *speckles*, relação tensão-deslocamento. Ao final do capítulo uma revisão sobre o estado da arte é apresentada.

O Capítulo 3 apresenta, além da descrição dos materiais e equipamentos utilizados durante o trabalho e o planejamento experimental a ser seguido. Este foi dividido basicamente em duas aplicações, sendo uma delas mais simples (placas planas com fenda) e a outra em virabrequins propriamente ditos.

O Capítulo 4 apresenta uma análise para os resultados obtidos para ensaios em placas planas; ainda, uma comparação dos resultados experimentais com os obtidos pelo método dos elementos finitos é realizada. Apresenta-se também os resultados obtidos para o planejamento experimental proposto para o virabrequim.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais e também as propostas para futuros trabalhos.

2 Conceitos Básicos e Revisão de Literatura

Este capítulo apresenta os conceitos básicos para a compreensão do trabalho a ser desenvolvido. Inicia-se descrevendo o componente a ser analisado, bem como as cargas e tensões sofridas por este em serviço. Em seguida, mostram-se os métodos de interferometria laser que servem como base para compreensão do método que será utilizado, iniciando-se com uma breve revisão sobre laser e outros conceitos básicos relacionados à óptica, posteriormente detalhando-se os métodos. Ao final, uma revisão dos estudos sobre a aplicação do método é realizada.

2.1 Descrição do virabrequim no motor

Um motor de combustão interna é uma máquina térmica que converte a energia química presente em um combustível em energia térmica (combustão), que por sua vez gera energia mecânica para um eixo de saída. A maioria desses motores é do tipo recíproco, sendo estes utilizados para os mais diversos fins, sendo seu uso mais freqüente para a propulsão de veículos.

Grande parte dos motores recíprocos apresenta pistões que se movimentam simultaneamente para cima e para baixo dentro do cilindro, estando localizados no bloco do motor. Para que esse movimento linear possa ser transformado em movimento rotacional, utiliza-se do mecanismo biela-manivela. A biela é a principal conexão entre o pistão e o virabrequim do motor. Numa das extremidades do virabrequim, encontra-se o volante do motor, que transmitirá a energia de rotação do motor à caixa de transmissão e, posteriormente, ao eixo de saída (no caso de aplicação em veículos). A Figura 2.1 ilustra os componentes básicos de um motor de combustão interna recíproco de quatro cilindros em linha. Existem diversos outros

arranjos de cilindros possíveis, podendo-se citar o arranjo em V e também o de cilindros opostos, ambos ilustrados na Figura 2.2.

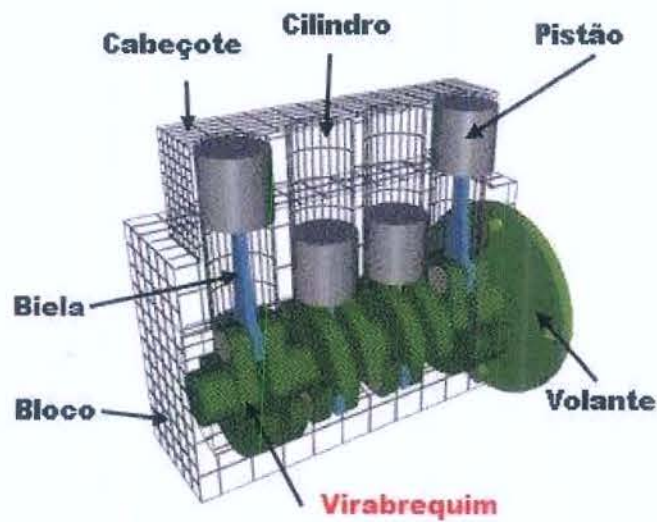


Figura 2.1: Componentes básicos de um motor de combustão interna contendo quatro cilindros em linha.

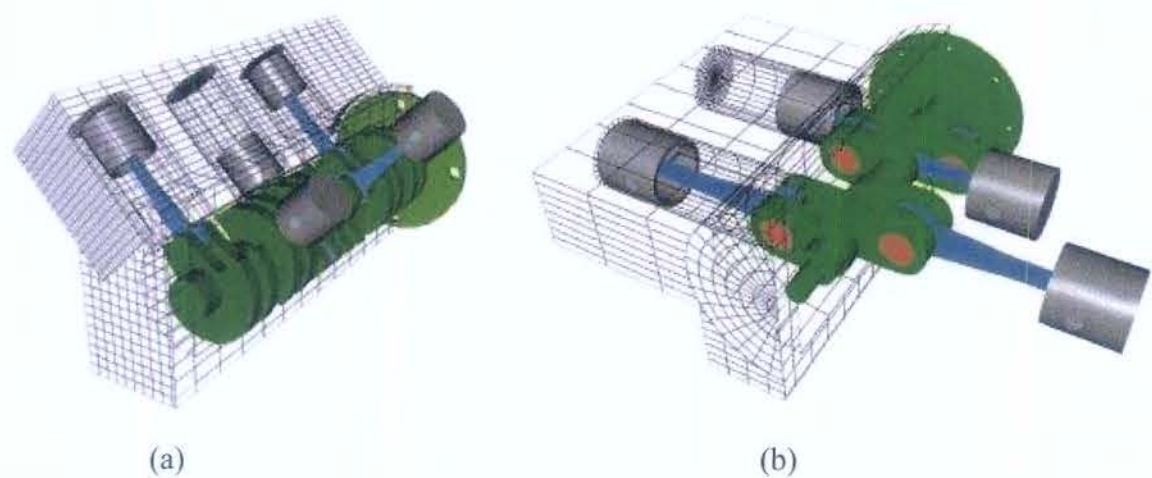


Figura 2.2: Outros arranjos para os cilindros (a) seis cilindros em V (b) quatro cilindros opostos.

Um virabrequim é composto de manivelas, sendo esta quantidade dependente do número de cilindros existentes no motor. Cada manivela é constituída de três partes principais: moentes, munhões e braços, podendo haver ainda contrapesos. Numa das extremidades encontra-se um flange para conexão do volante do motor. Outros itens podem ser citados como os furos de óleo

de lubrificação e os furos para redução de peso. A Figura 2.3 ilustra estes componentes. Cada munhão é o centro de rotação para cada conjunto de manivela que por sua vez é constituído por dois braços de face e um moente – local onde a biela é acoplada. Os contrapesos se localizam juntamente aos braços.

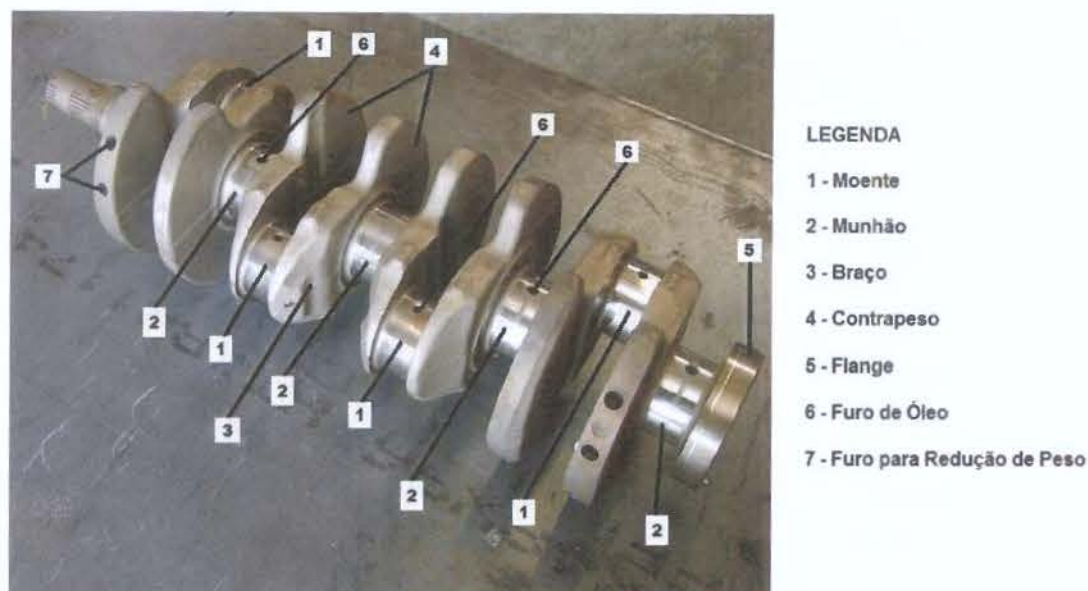


Figura 2.3: Componentes de um virabrequim.

Baseado na breve descrição dos princípios básicos de funcionamento de um motor de combustão interna, nota-se que o virabrequim é um componente de geometria complexa sujeito a diversos tipos de solicitações durante seu uso. Estas ocorrem de forma alternada, podendo levar a falhas por fadiga. Dessa forma, torna-se importante o conhecimento dos efeitos de tais solicitações para a vida do componente, ou seja, deve-se conhecer as tensões que ocorrem no virabrequim durante seu uso.

2.1.1 Tensões no virabrequim

Bayarakçeken et al (2007) analisaram falhas em virabrequins de motores diesel com um cilindro. Este tipo de virabrequim apresenta menores balanceamentos estático e dinâmico, devido às diferentes etapas – tempos – do ciclo do motor, quando comparado aos virabrequins de motores com mais cilindros. Segundo eles, a maioria das falhas em virabrequins está relacionada

à fadiga mecânica, podendo esta vir de diversas fontes como: desalinhamento do eixo, flexão-rotação, vibração de mancais e altas concentrações de tensões nas concordâncias. Dois virabrequins de mesmas dimensões e aplicações foram analisados, no entanto, o primeiro deles foi apenas recozido enquanto que o segundo passou por um tratamento térmico de têmpera e revenimento. Ambos sofreram falha por fadiga com trinca iniciada na região da concordância, sendo que os furos de lubrificação no segundo virabrequim podem ter desencadeado uma mudança de direção na propagação da trinca e aceleração do processo de crescimento da trinca.

Montazersadgh e Fatemi (2007) realizaram uma análise dinâmica de cargas e tensões num virabrequim utilizando o método dos elementos finitos e posterior comprovação através de extensômetros. A Figura 2.4 mostra o modelo utilizado, assim como as direções das forças que atuam no virabrequim, sendo que F_x , F_y e F_z correspondem às componentes de flexão, torsional e longitudinal, respectivamente. Existem duas fontes de cargas atuando no virabrequim, uma relativa à combustão e outra relacionada à inércia do conjunto pistão-biela. A Figura 2.5 mostra como esses esforços atuam no virabrequim em função do ângulo de rotação deste. No entanto, as tensões de Von Mises apresentam pouca contribuição dos esforços de torção podendo estes ser desconsiderados. O método dos elementos finitos foi aplicado utilizando-se a superposição de carregamentos estáticos para simular o carregamento dinâmico. Além disso, foi repetida a simulação diversas vezes aplicando-se a direção e magnitude da força dinâmica.

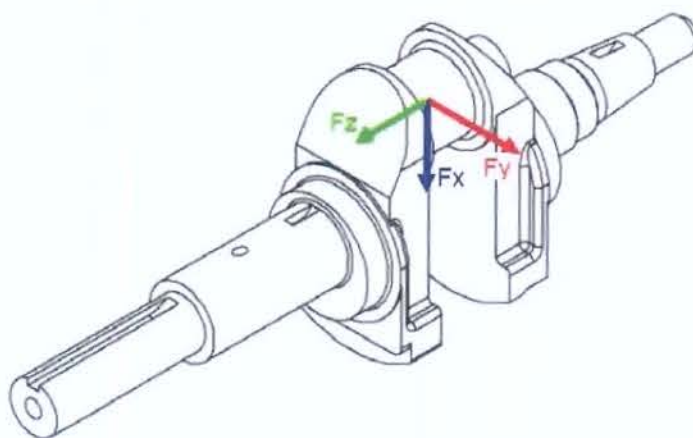


Figura 2.4: Modelo utilizado e direções das forças atuantes.

Fonte: Montazersadgh e Fatemi (2007).

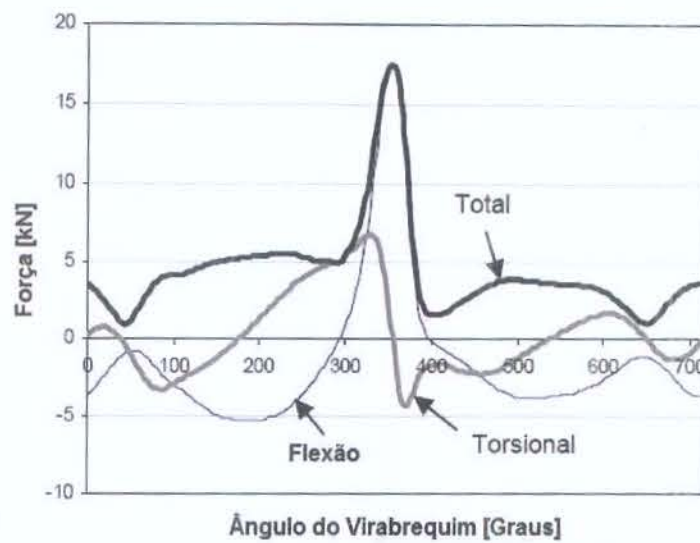


Figura 2.5: Esforços no virabrequim em função do ângulo deste (Montazersadgh e Fatemi, 2007).

Alguns pontos de interesse foram definidos na análise dos resultados e também para aplicação de extensômetros para posterior comparação de resultados. Na Figura 2.6, os algarismos de 1 a 7 identificam os pontos analisados pelas simulações, enquanto que as letras (a, b, c, d) os locais analisados experimentalmente. Já a Figura 2.7 mostra a variação das tensões nos pontos indicados, onde nota-se uma elevada tensão no ponto 2, devido a região ser característica concentradora de tensões. Além disso, a comparação dos resultados simulados com os experimentais apresentou boa concordância, tendo diferenças menores que 7%.

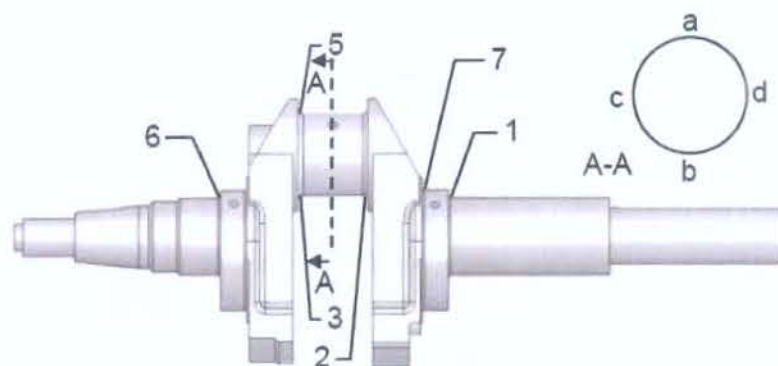


Figura 2.6: Pontos de interesse analisados.

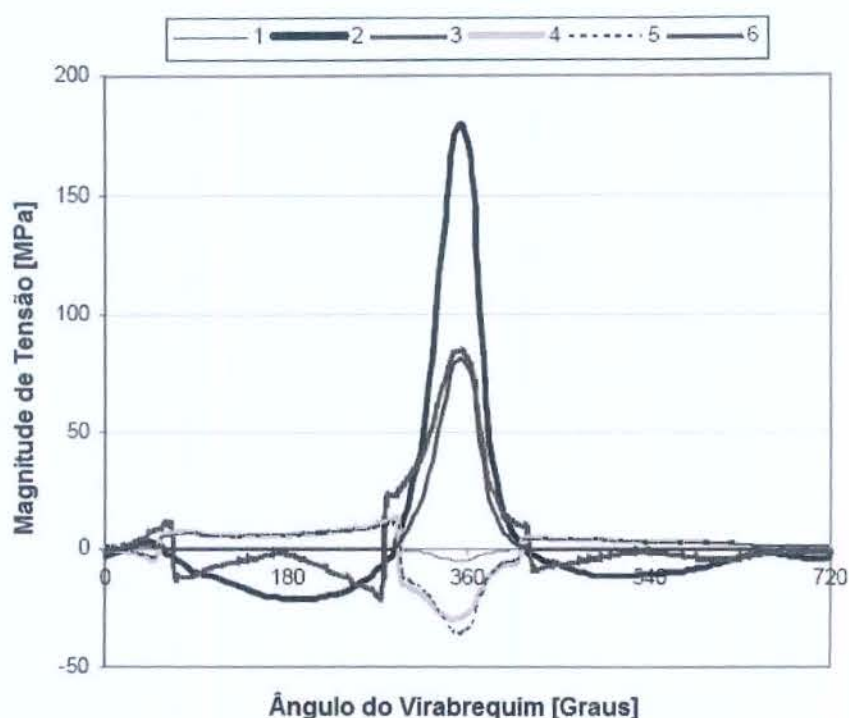


Figura 2.7: Tensões nos pontos de interesse (Montazersadgh e Fatemi, 2007).

Heath e McNamara (1990) mostraram uma metodologia para análise de tensões em virabrequins por elementos finitos. A Figura 2.8 apresenta um fluxograma para os cinco níveis principais de análise propostos. As principais cargas são de flexão e torção, sendo que a cada nível tem-se um maior refinamento da análise, melhorando os resultados que se aproximam mais do caso real, no entanto, muitas vezes aumentando o custo computacional. Esta metodologia não considerou as interações com os filmes de óleo de lubrificação existentes em diversas interfaces da peça com outras peças, durante o uso.

No nível **1**, tem-se uma modelagem paramétrica da peça através de CAD baseada em dados relacionados às forças de combustão e de inércia do sistema, de forma bem simples. Neste nível as forças torsionais não são calculadas, sendo obtidas através de uma análise prévia. No próximo nível (**2**), tem-se uma análise de tensões detalhada realizada a partir de um modelo estaticamente determinado para obtenção das cargas e os torques são obtidos a partir de um modelo de vibração torsional amortecido com excitação. Para o nível **3**, tem-se a análise do nível anterior realizada pelo método dos elementos finitos. Já para o nível **4**, tem-se uma análise de tensões por elementos finitos sendo as cargas de inércia obtidas através de um modelo estaticamente

indeterminado. No último nível (5), a análise de tensões por elementos finitos se baseia num modelo de vibração tri-dimensional completo do virabrequim. A decisão sobre qual nível utilizar depende principalmente do tipo e severidade de uso do motor. Concluíram que a conjugação deste tipo de análise, juntamente com outros, o experimental por exemplo, pode ajudar no processo de desenvolvimento de novos componentes e também na otimização dos já existentes.

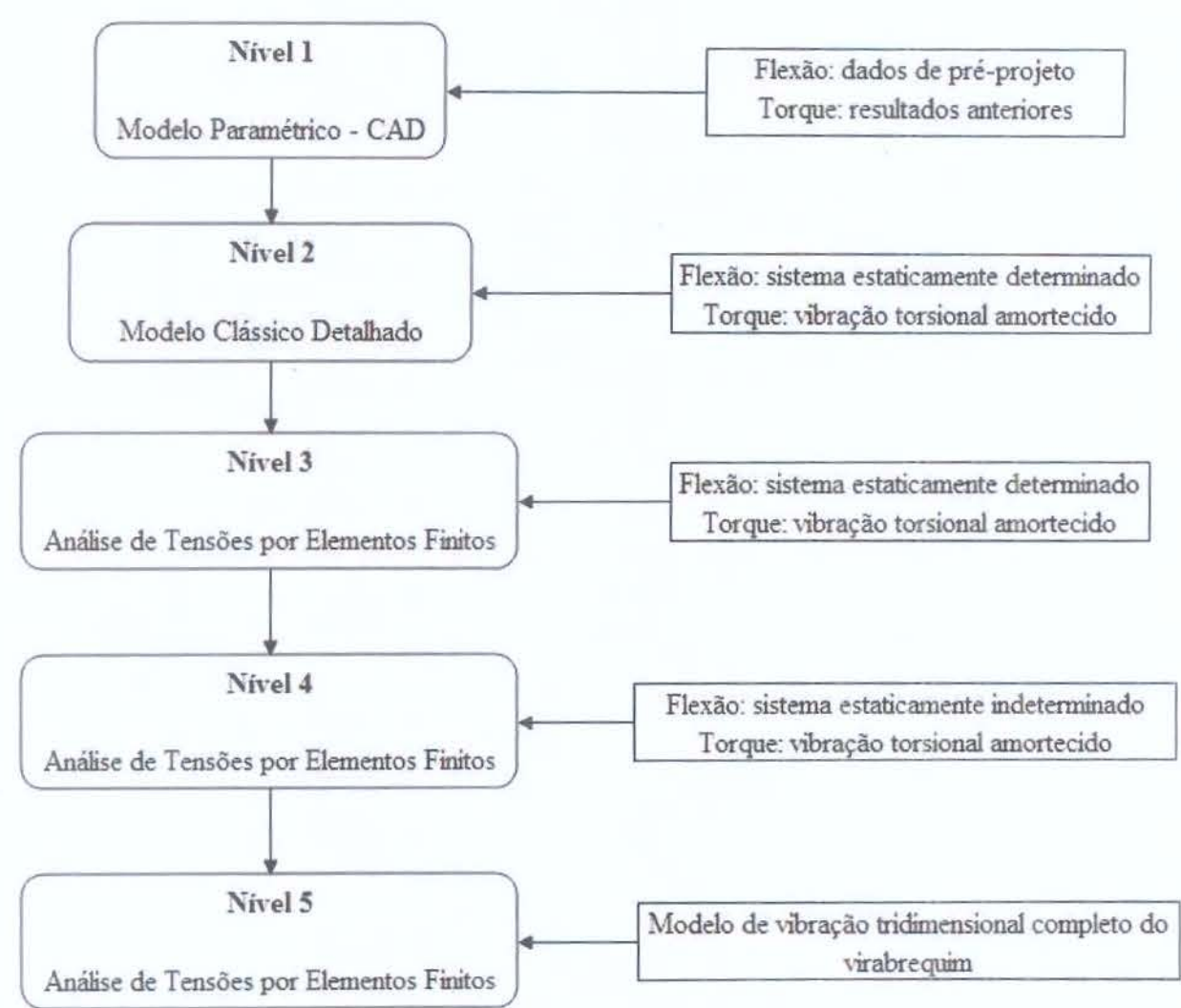


Figura 2.8: Fluxograma dos níveis de análise.

Guagliano et al (1993) analisaram a concentração de tensões de flexão em um virabrequim de motor diesel marinho. Inicialmente buscaram fórmulas analíticas obtidas pela literatura e então procederam uma análise experimental, utilizando extensômetros, na região de arredondamento entre a manivela e o moente. Um modelo por elementos finitos tridimensional foi utilizado para

determinar o fator de concentração de tensões nesta região (K_t). No entanto, estes métodos demandam um certo custo computacional e a utilização de modelos bidimensionais seria mais interessante. Sendo assim, realizaram esta análise tanto experimental quanto numérica, obtendo resultados próximos ao tri-dimensional. Foram utilizados dois modos de carregamento, sendo um deles centrado em relação ao eixo de rotação dos munhões e o outro excêntrico em relação a esse mesmo eixo. Os resultados obtidos numericamente e experimentalmente para o fator de concentração de tensões encontram-se na Tabela 2.1. As variações dos resultados foram de 6,9% e 8,6% para as cargas centrada e excêntrica, respectivamente.

Tabela 2.1: Resultados para fator de concentração de tensões (K_t).

	Carga Centrada		Carga Excêntrica	
	Numérico	Experimental	Numérico	Experimental
Virabrequim	4,3	-	6,9	7,0
Modelo Plano	4,6	4,4	7,5	-

2.2 Medições de tensão com interferometria laser

Após a descoberta do laser, que ocorreu em 1960 (Vasconcellos, 2001), técnicas para medição de deslocamentos que necessitam de uma fonte de luz com as características apresentadas por ele foram sendo desenvolvidas e aprimoradas. Muitas destas, apesar de terem sido iniciadas anteriormente à descoberta do laser, só puderam ser implementadas após este ter sido descoberto. Uma destas técnicas é a interferometria holográfica, que se baseia no princípio da holografia inicialmente proposto por Gabor, em 1948. Tal técnica apresenta conceitos semelhantes aos das técnicas de interferometria entre padrões de *speckles*.

A Figura 2.9 apresenta esquematicamente como estão organizados os métodos aqui citados baseados na interferometria laser. Nota-se uma divisão principal entre interferometria holográfica e interferometria entre padrões de *speckles*. No caso da interferometria holográfica, temos a do tipo tempo-real e a de franjas fixas. Já para a interferometria entre padrões de *speckles*, temos a fotografia de *speckles* e a interferometria por correlação de padrões de *speckles*, inserindo-se nesta última o método ESPI. No Apêndice A encontram-se mais detalhes destas técnicas.

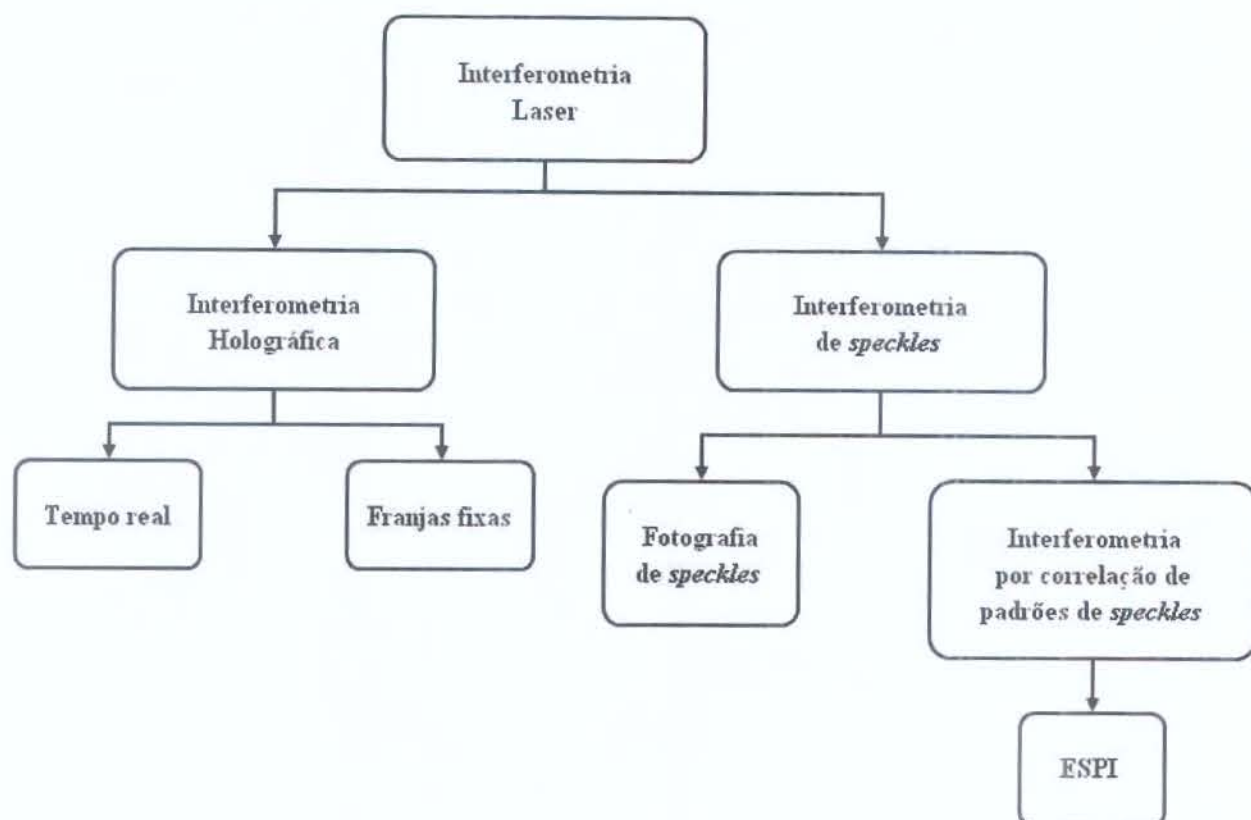


Figura 2.9: Métodos por interferometria laser.

2.2.1 Interferometria Eletrônica entre Padrões de Speckles (ESPI)

Apesar de seus méritos, as técnicas de interferometria holográfica, fotografia de *speckles* e interferometria por correlação de *speckles* fotográfica não foram amplamente adotadas por indústrias e pesquisadores (Cloud, 1998), uma vez que as necessidades de estabilidade mecânica são grandes. O processamento de filmes fotográficos consome certo tempo, além de necessitar de ambientes especiais para revelação e o pós-processamento das franjas obtidas pelas figuras de interferência necessita de pessoal altamente treinado. No entanto, é importante salientar que os métodos de interferometria por correlação de *speckles* necessitam de meios de gravação com resoluções menores do que as necessárias em interferometria holográfica e fotografia de *speckles*.

O tamanho mínimo dos *speckles* fica entre 5 e 100 μm , de forma que é possível se utilizar meios eletrônicos para gravação dos *speckles*, a partir do qual um processamento das imagens pode ser realizado computacionalmente. Dessa forma, os métodos atuais de interferometria por

correlação de *speckles* substituem o filme fotográfico pela aquisição eletrônica. Além disso, realizam processamento destes sinais eletronicamente, obtendo-se ainda o pós-processamento da imagem eletronicamente, gerando os resultados desejados. A junção dos recursos à técnica é chamada de Interferometria Eletrônica entre Padrões de *Speckles*. Tal método foi inicialmente proposto por Butters e Leendertz (1971). A Figura 2.10 apresenta um diagrama de blocos de um sistema genérico para ESPI. Os itens apresentados nesta, são detalhados a seguir

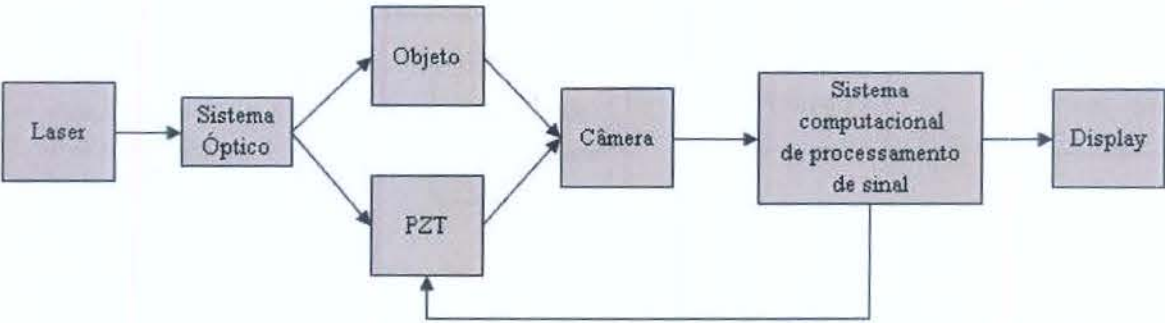


Figura 2.10: Sistema genérico para ESPI. (Cloud, 1998).

Laser

Diversos tipos de lasers podem ser utilizados, de acordo com a potência necessária a aplicação. No entanto, é mais usual utilizar os que apresentam comprimento de onda próximo de $0,6\mu m$.

Sistema óptico

A Figura 2.11 apresenta um sistema sensível a deslocamentos tangenciais, onde se tem uma frente de onda plana U_P iluminando o objeto diretamente. Esta frente de onda incide num espelho M , localizado perpendicularmente a superfície do objeto D , gerando assim um segundo feixe incidindo sobre o objeto a um mesmo ângulo que o anterior. Os feixes refletidos pelo objeto atravessarão o conjunto lente-orifício L , formando assim um padrão de *speckles* no plano I .

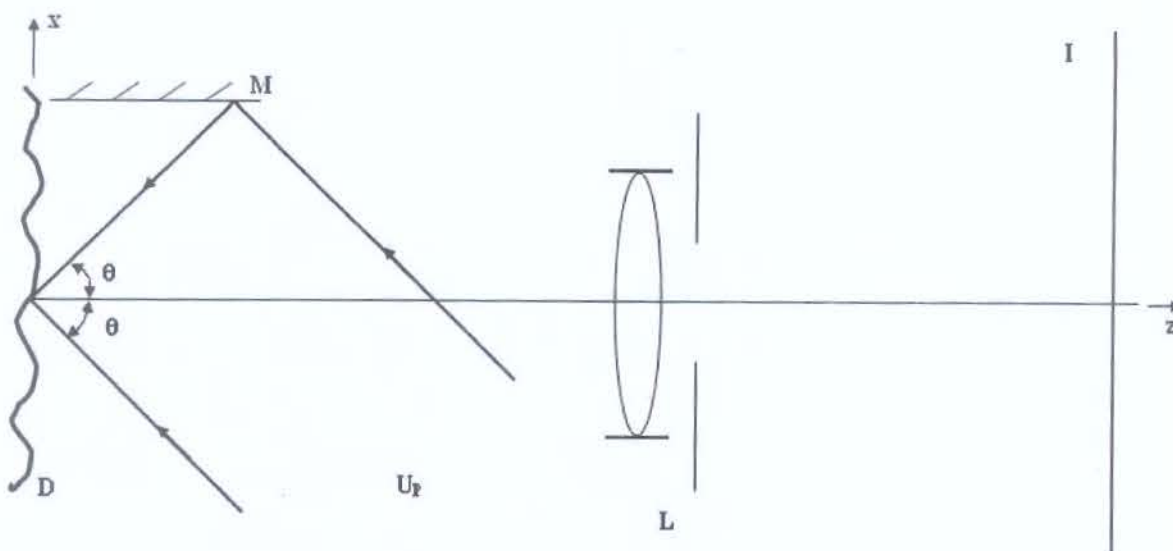


Figura 2.11: Sistema óptico sensível a deslocamentos tangenciais para ESPI.

Caso seja inconveniente alocar um espelho na posição indicada pelo sistema anterior, pode-se optar pelo sistema mostrado na Figura 2.12. Neste, tem-se uma fonte de laser que é expandida e colimada pelo conjunto de lentes L_1 e L_2 , obtendo-se assim uma frente de onda plana U_p . Este feixe atinge o prisma refletor P , separando-o em duas frentes de onda planas dadas por U_0' e U_0'' . Estas são então refletidas pelos espelhos M_1 e M_2 , atingindo o objeto. Os feixes são refletidos pelo espelho M_3 até o conjunto lente-orifício L , formando assim um padrão de *speckles* no plano I .

A Figura 2.13 apresenta um sistema óptico com sensibilidade a deslocamentos normais, proposto por Stetson (1970). O feixe de referência é inicialmente pré-expandido por uma lente L_1 e então focalizado através de uma lente L_2 num orifício Q , criando uma frente de onda esférica. Este feixe é então refletido através de um separador de feixes (B), atingindo o plano I . Este sistema pode apresentar ruídos devido a possível presença de partículas de pó no separador de feixes. U_0 é o feixe de iluminação.

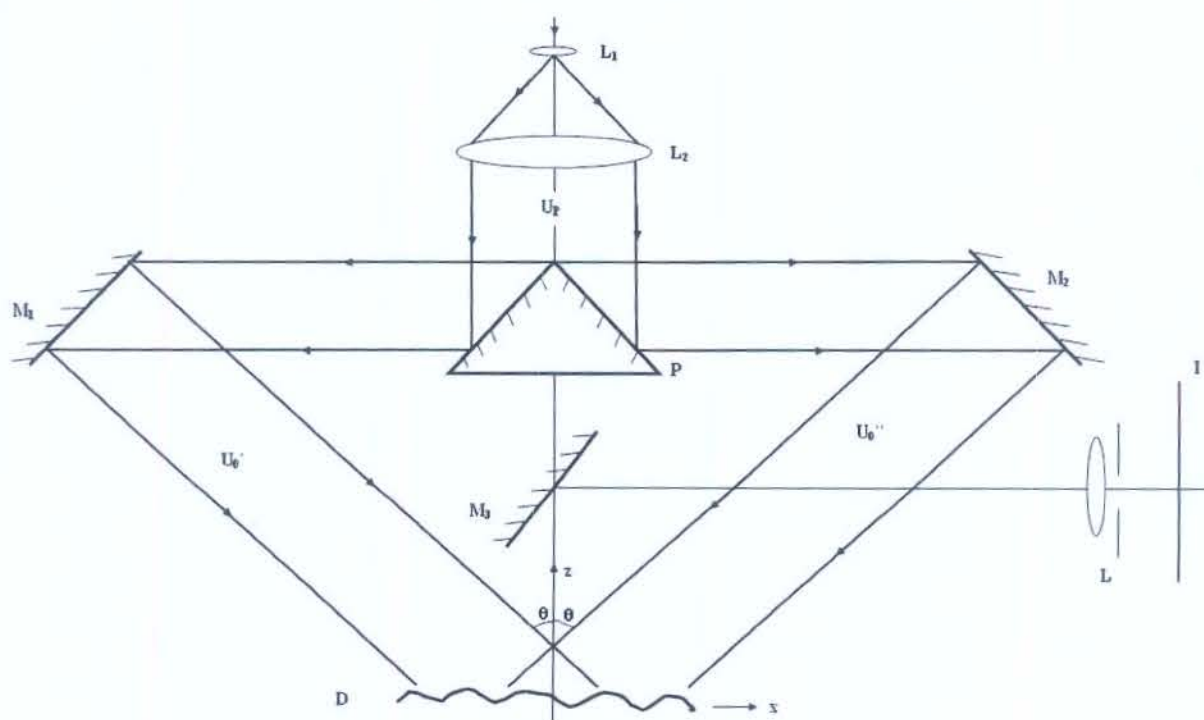


Figura 2.12: Sistema óptico alternativo sensível a deslocamentos tangenciais para ESPI.

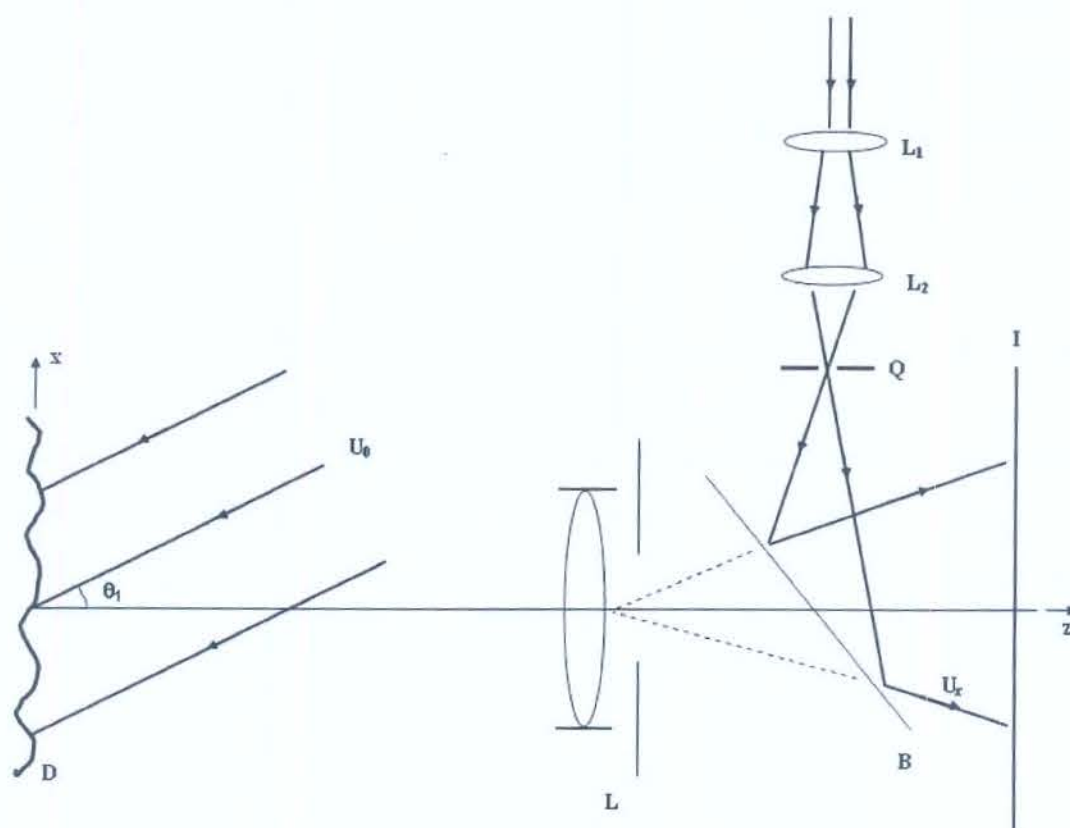


Figura 2.13: Sistema óptico sensível a deslocamentos normais para ESPI.

Um sistema também sensível a deslocamentos normais e menos suscetível aos erros possíveis no sistema anterior é apresentado na Figura 2.14. O feixe de referência é inicialmente expandido pela lente L_1 e então é focalizado no furo de um espelho (M) através da translação de uma lente L_2 . O feixe refletido pelo objeto atravessa um conjunto lente-orifício (L), atingindo o espelho M e então formando um padrão de *speckles* no plano I .

PZT (Transdutor Piezo-Elétrico)

O transdutor piezo-elétrico é utilizado para realizar mudanças de fases conhecidas no feixe de referência. A discussão sobre tal mudança encontra-se no apêndice A. Em síntese, sua função é determinar a fase da onda através da introdução de mudanças de fase conhecidas.

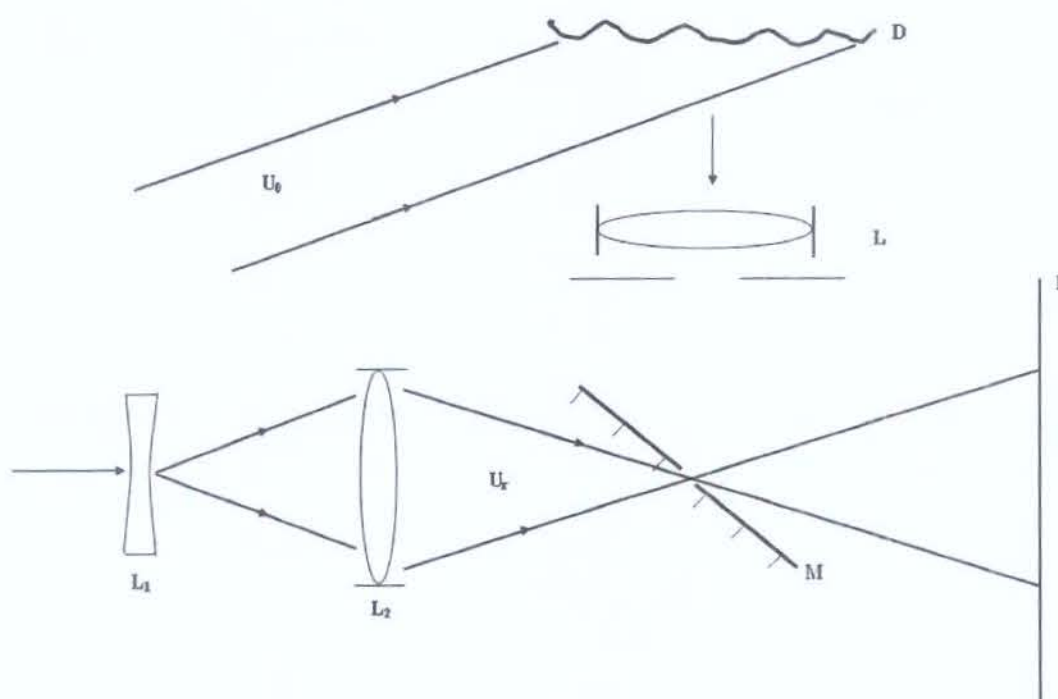


Figura 2.14: Sistema óptico alternativo sensível a deslocamentos normais para ESPI.

Câmera

Atualmente, as imagens para a técnica ESPI são obtidas através de câmeras CCD devido a sua vasta gama de linearidade, baixo ruído a baixas intensidades, elevada taxa sinal para ruído e

pico de resposta espectral próximo de $0,6\mu m$. Basicamente, este tipo de câmera consiste numa malha de foto-detectores que transformam os sinais de intensidade em um sinal de saída em voltagem. As franjas de interferência podem ser obtidas a partir de duas formas básicas: subtração dos sinais de vídeo ou adição dos sinais de vídeo.

Na obtenção do padrão de franjas por subtração de sinais de vídeo, um padrão de *speckles* é obtido a partir do estado inicial (não deformado) do objeto e então tem-se seu sinal armazenado na memória RAM. O objeto é então deformado e/ou deslocado para que se obtenha um segundo padrão de *speckles* cujo sinal será subtraído do primeiro. Nos locais onde não há variação do padrão de *speckle*, obter-se-á regiões de sinal nulo, enquanto que onde houver mudança haverá sinais não nulos. As intensidades num ponto da imagem, antes e após a deformação podem ser dadas pelas Equações 2.1 e 2.2, respectivamente, onde I_1 e I_2 representam as intensidades de cada um dos respectivos feixes que incidem sobre o objeto, ψ a diferença de fase entre os feixes e $\Delta\phi$ a diferença de fase referente ao deslocamento.

$$I_{i1} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \psi \quad (2.1)$$

$$I_{i2} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\psi + \Delta\phi) \quad (2.2)$$

Caso os sinais de saída da câmera ($V1$ e $V2$) sejam proporcionais às intensidades das imagens, o sinal subtraído será dado pela Equação 2.3.

$$\begin{aligned} V_{sub} &= (V_1 - V_2) \propto I_{i1} - I_{i2} = 2\sqrt{I_1 I_2} [\cos \psi - \cos(\psi + \Delta\phi)] \\ &= 4\sqrt{I_1 I_2} \operatorname{sen}\left(\psi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \operatorname{sen}\left(\frac{1}{2}\Delta\phi\right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Tal sinal conterà valores positivos e negativos. Apesar disso, valores negativos seriam apresentados como valores nulos. Para evitar esta perda de sinal, V_{sub} é modificado antes de atingir o monitor, de forma que o brilho no monitor será proporcional ao valor absoluto do sinal subtraído. Logo o brilho poderá ser dado pela Equação 2.4, onde K é uma constante.

$$Br = 4K \sqrt{I_1 I_2 \sin^2 \left(\psi + \frac{1}{2} \Delta \phi \right) \sin^2 \left(\frac{1}{2} \Delta \phi \right)} \quad (2.4)$$

Valores médios do brilho ao longo de linhas de $\Delta \phi$ constantes irão variar entre mínimos e máximos, como mostram as Equações 2.5 e 2.6, respectivamente.

$$Br_{\min} = 0 \quad \Delta \phi = 2n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.5)$$

$$Br_{\max} = 2K \sqrt{I_1 I_2} \quad \Delta \phi = (2n+1)\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.6)$$

Já na adição de sinais de vídeo, os sinais obtidos para os estados inicial e deformado são somados de forma a se obter um padrão de intensidades que também é proporcional ao sinal de voltagem. O resultado obtido mostra que para os locais onde há máxima correlação entre os *speckles*, têm-se picos de contraste e conforme a correlação vai se tornando menor, o contraste também diminui, no entanto, não atingindo o valor nulo. Como a voltagem é proporcional à intensidade, o sinal de adição pode ser dado pela Equação 2.7.

$$V_{ad} = 2I_1 + 2I_2 + 4\sqrt{I_1 I_2} \cos \left(\psi + \frac{1}{2} \Delta \phi \right) \cos \left(\frac{1}{2} \Delta \phi \right) \quad (2.7)$$

O contraste de um padrão de *speckles* pode ser definido como sendo o desvio padrão da intensidade. Para uma linha de $\Delta \phi$ constante, tem-se o contraste dado pela Equação 2.8, onde κ_1 e κ_2 representam os contrastes dos respectivos feixes incidentes. Nota-se que estes irão variar entre os valores mínimo e máximo expressos, respectivamente, pelas Equações 2.9 e 2.10.

$$\kappa_{12} = 2 \left[\kappa_1^2 + \kappa_2^2 + 8 \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle \cos^2 \left(\frac{1}{2} \Delta \phi \right) \right] \quad (2.8)$$

$$[\kappa_{12}]_{\min} = 2\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad \Delta \phi = (2n+1)\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.9)$$

$$[\kappa_{12}]_{\max} = 2\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2I_1 I_2} \quad \Delta \phi = 2n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.10)$$

Enquanto o contraste varia, o valor médio das intensidades ao longo de uma linha de $\Delta\phi$ constante é o mesmo, sendo $\langle I_{i1} + I_{i2} \rangle = 2\langle I_1 \rangle + 2\langle I_2 \rangle$. Logo, quando dois padrões de *speckles* são adicionados eletronicamente, a intensidade média é constante e a variação da correlação é mostrada através de variações de contraste no padrão de *speckles* resultante, mas não na intensidade. A componente contínua no sinal é removida através de filtros, de modo que o brilho resultante possa ser considerado como sendo proporcional a raiz quadrada do contraste, sendo então dado pela Equação 2.11.

$$Br = K \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle \cos^2\left(\frac{1}{2}\Delta\phi\right)} \tag{2.11}$$

Os padrões de subtração mostram intrinsecamente uma melhor visibilidade de franjas, uma vez que os locais onde há máxima correlação a intensidade é nula, enquanto que o mesmo não ocorre para quando se procede a adição de sinais. Nota-se ainda que as franjas de máxima para os processos de subtração correspondem às franjas de mínima para os processos de adição e vice-versa. Tais resultados encontram-se resumidos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Resumo dos resultados para processos de subtração e adição de sinais.

	Brilho das franjas	
	SUBTRAÇÃO	ADIÇÃO
Máxima correlação	Mínimo	Máximo
Mínima correlação	Máximo	Mínimo

Existe um valor mínimo de intensidade que deve atingir a câmera para que o sinal de voltagem obtido supere o ruído eletrônico. Além disso, existe também um limite de intensidade que pode ser lido, após o qual, qualquer acréscimo gerará o mesmo sinal de voltagem para a intensidade máxima, definindo-se tal intensidade como intensidade de saturação. Sejam $\langle I_T \rangle$ a média da intensidade e σ_T seu desvio padrão, pode-se evitar perdas de informação do sinal seguindo a relação dada pela Equação 2.12, que define que a câmera irá operar abaixo da saturação em 95% da imagem.

$$\langle I_T \rangle + 2\sigma_T < I_{sat} \quad (2.12)$$

Como principais vantagens do método é possível citar: a velocidade de obtenção de dados que é muito maior se comparada a métodos que utilizam interferometria gravada em filmes fotográficos; não há a necessidade de um ambiente altamente estável (livre de vibrações) necessário para interferometria convencional; o sistema pode ser utilizado em locais iluminados, não havendo necessidade de salas escuras durante a aquisição e processamento de dados; como não há necessidade de filmes fotográficos, o custo de material por experimento é baixo e potenciais problemas de segurança são minimizados.

Já as limitações podem ser agrupadas em: sensibilidade na medição; tamanho do objeto e condições de superfície.

A sensibilidade a franjas para um interferômetro que mede deslocamentos tangenciais é dada por $(\lambda/2)\sin\theta$, onde λ é o comprimento de onda da luz utilizada e θ o ângulo de incidência do feixe iluminado. Para um interferômetro que mede deslocamentos normais, tem-se uma sensibilidade de $\lambda/2$. Como não é possível detectar menos do que uma franja de forma precisa utilizando um sistema ESPI, os valores apresentados acima representam as sensibilidades máximas do sistema.

A área a ser observada é limitada pela potência do laser e a sensibilidade da câmera. Caso se queira realizar medições de deslocamentos tangenciais é necessário que as frentes de onda sejam planas para gerar maior sensibilidade. Para grandes áreas torna-se necessário o uso de grandes lentes colimadoras, caso contrário a interpretação dos padrões de franja torna-se difícil.

A discussão realizada até o momento levou em consideração que não ocorriam mudanças microscópicas nas superfícies, que por sua vez podem ocorrer devido a oxidação, recristalização ou outros eventos. Tais mudanças têm uma alta probabilidade de gerar perda de correlação dos *speckles*. Além disso, as características de superfície podem influenciar na sensibilidade a inclinação em cada ponto. Ao se utilizar a interferometria com dupla iluminação para medição de deslocamentos tangenciais, a superfície também é importante, uma vez que esta deve ser

totalmente difusora, de modo que o objeto normalmente é coberto por uma fina camada de tinta branca ou pó.

2.2.2 Relação tensão-deslocamento

Os métodos de interferometria laser descritos até o momento são capazes de medir os deslocamentos da superfície em relação aos três eixos coordenados. Logo, torna-se necessário obter uma relação entre os deslocamentos e tensões para cada um dos pontos analisados na superfície do objeto. Seja o deslocamento de um ponto numa superfície dado pela Equação 2.13. Tal grandeza é vetorial, de forma que u, v e w referem-se as respectivas componentes relativas aos eixos cartesianos x, y e z .

$$\vec{d}(x, y, z) = (u, v, w) \quad (2.13)$$

Da mecânica do contínuo é possível definir um tensor de deformações infinitesimais, como o apresentado por Lai et al (1995), exposto na Equação 2.14. Este é um caso mais geral, onde o tensor de segunda ordem apresenta-se completo. A diagonal principal do tensor indica as deformações normais aos respectivos eixos, enquanto os outros termos indicam a metade do ângulo formado entre os eixos definidos pelos sub-índices de cada componente, sendo tal relação expressa pela Equação 2.15. Nota-se ainda que o tensor é simétrico, tendo-se apenas seis valores diferentes e não nove.

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \gamma_{ij} \quad \text{se } i \neq j \quad (2.15)$$

Obtendo-se as deformações, as tensões podem facilmente ser obtidas aplicando-se a Lei de Hooke generalizada, dada pela Equação 2.16. Além disso, a relação entre o módulo de elasticidade (E), o coeficiente de Poisson (ν) e o módulo de elasticidade transversal (G) é dada pela Equação 2.17. Assim, é necessário que se conheça apenas duas das constantes do material, sendo a terceira obtida em função das duas anteriores.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] \quad (2.16a)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})] \quad (2.16b)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] \quad (2.16c)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (2.16d)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad (2.16e)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad (2.16f)$$

$$G = \frac{E}{1 - \nu} \quad (2.17)$$

As equações anteriores que, relacionam o deslocamento com a deformação (2.14) e as que relacionam deformação com tensão (2.16), foram desenvolvidas para o caso mais geral onde o tensor de tensões de segunda ordem encontra-se completo. No entanto, os métodos de medição de tensões por interferometria laser, em especial o ESPI, são capazes de obter as deformações de superfície, portanto as tensões na superfície. Para o caso em que não há a atuação de forças externas na superfície do objeto, não existirão tensões normais à superfície. Logo cada ponto da superfície apresentará um estado plano de tensões.

a) Superfícies planas

Para superfícies planas, a medição das componentes de deslocamento no plano da superfície é suficiente. Caso a superfície esteja no plano xy , deve-se obter os deslocamentos $u(x,y)$ e $v(x,y)$, relativos respectivamente aos eixos x e y . A partir deste campo de deslocamentos é possível se obter as deformações a partir da Equação 2.18. Assim, as tensões podem ser obtidas pela Equação 2.19.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \gamma_{xy} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{xx} + \nu \varepsilon_{yy}) \quad (2.19a)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{yy} + \nu \varepsilon_{xx}) \quad (2.19b)$$

$$\tau_{xy} = G \gamma_{xy} \quad (2.19c)$$

b) Superfícies não-planas

Através do método ESPI é possível obter os deslocamentos em relação aos três eixos cartesianos relativos ao sistema. Para superfícies planas as coordenadas seguem as mesmas orientações e as tensões podem ser obtidas a partir dos deslocamentos nestas coordenadas. Apesar disso, quando se tem superfícies não-planas cada ponto desta superfície pode definir um novo sistema de coordenadas onde a direção normal (n) é uma projeção do eixo z e as direções tangenciais (t_1 e t_2) são projeções dos eixos x e y , de forma que este novo sistema de coordenadas defina um estado plano de tensões para as direções tangenciais, uma vez que superfícies sem a presença de cargas externas não apresentam tensões normais. Pfeifer et al (1998) apresentam esquematicamente este novo sistema de coordenadas como ilustra a Figura 2.15.

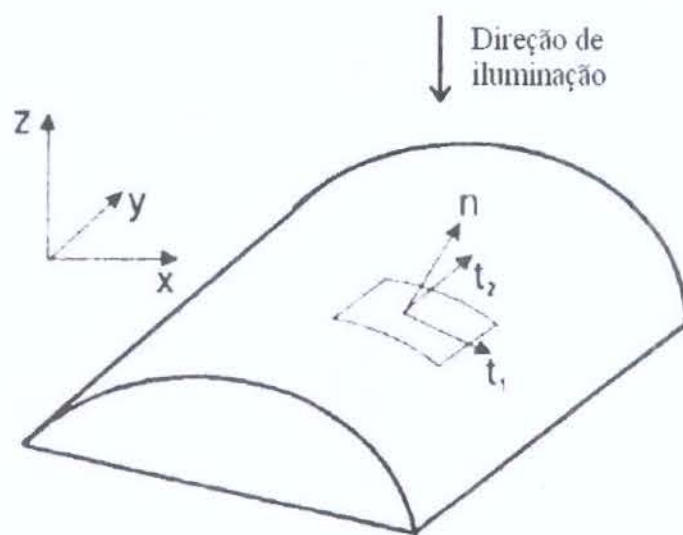


Figura 2.15: Esquema para novo sistema de coordenadas para superfícies não-planas.

Seguindo esta idéia, é possível transformar o campo de deslocamentos dado pelos componentes $u(x,y)$, $v(x,y)$ e $w(x,y)$ no sistema de coordenadas $Oxyz$ para o sistema de coordenadas de cada ponto $Ox'y'z'$ (t_1 , t_2 e n – representados por x' , y' e z' – são as projeções de x , y e z), de forma que sejam obtidos os deslocamentos $u'(x',y')$, $v'(x',y')$ e $w'(x',y')$ relacionados aos anteriores pela Equação 2.20. A matriz nesta equação indica os cossenos diretores entre os eixos originais e os eixos transformados, relacionados na Tabela 2.3. Neste novo sistema de coordenadas, cada ponto irá caracterizar um estado plano de tensões.

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Tabela 2.3: Cossenos diretores para transformação de coordenadas.

	x	y	z
x'	l_1	m_1	n_1
y'	l_2	m_2	n_2
z'	l_3	m_3	n_3

Para a determinação destes ângulos é necessário realizar uma medição do formato desta superfície, na região analisada, o que por sua vez pode ser obtido pelo próprio sistema ESPI. Tendo-se estes dados, as deformações podem ser obtidas, seguindo as Equações 2.21.

$$\varepsilon'_{xx} = \frac{\partial u'}{\partial x'} = \frac{\partial u'}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x'} = \frac{\partial u'}{\partial x} l_1 \quad (2.21a)$$

$$\varepsilon'_{yy} = \frac{\partial v'}{\partial y'} = \frac{\partial v'}{\partial y} m_2 \quad (2.21b)$$

$$\gamma'_{xy} = \frac{\partial u'}{\partial y'} + \frac{\partial v'}{\partial x'} = \frac{\partial u'}{\partial y} m_2 + \frac{\partial v'}{\partial x} l_1 \quad (2.21c)$$

As tensões podem então ser obtidas de forma análoga as definidas pelas Equações 2.19, sendo apresentadas pelas Equações 2.22.

$$\sigma'_{xx} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon'_{xx} + \nu \varepsilon'_{yy}) \quad (2.22a)$$

$$\sigma'_{yy} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon'_{yy} + \nu \varepsilon'_{xx}) \quad (2.22b)$$

$$\tau'_{xy} = G \gamma'_{xy} \quad (2.22c)$$

2.3 Revisão Bibliográfica sobre Interferometria Laser

Leendertz (1970) descreveu a teoria relacionada a medição de deslocamentos baseando-se no efeito de *speckles*. Definiu ainda algumas condições do sistema a ser utilizado. Além disso, introduziu um arranjo óptico que permite a detecção de deslocamentos tangenciais e que não apresenta sensibilidade a deslocamentos normais. Foi apresentado também um arranjo que apresenta sensibilidade a deslocamentos normais com baixa sensibilidade a deslocamentos tangenciais.

Ettemeyer (1996) introduziu um sensor de deformações óptico utilizando laser, capaz de realizar medições de deformações de campo. O sistema apresentado é capaz de obter aspectos

qualitativos sobre as deformações numa determinada direção em superfícies planas. Algumas aplicações são mostradas: obtenção de deformações em uma placa sujeita a cargas de tração; deformações da região próxima ao entalhe de uma placa sujeita a cargas de tração, onde o sistema permite identificar a localização da concentração de deformações; caracterização das deformações ao longo de um ciclo de fadiga em baixo ciclo para um objeto e ainda na obtenção de deformações para um material compósito.

Moore e Tyrer (1996) demonstram uma técnica capaz de medir duas componentes do deslocamento tangencial mutuamente ortogonais, evidenciando o aparato óptico e o processamento das imagens. Para automatizar a obtenção dos deslocamentos utiliza-se do método de mudança de fase, podendo-se assim obter os deslocamentos e conseqüentemente as deformações. Uma demonstração experimental é realizada em um corpo de prova característico para testes de fratura, obtendo-se resultados qualitativos e quantitativos (comparados ao modelo analítico) que concordam razoavelmente com os previstos.

Scalea *et al* (1998) analisaram, através de ESPI, as tensões para uma placa plana em tração, numa região próxima a um furo onde um pino exerce uma carga. Posteriormente, os resultados experimentais foram comparados aos obtidos por elementos finitos. Utilizou-se um interferômetro de dupla iluminação, analisando apenas uma componente de deslocamento, sendo esta no sentido da carga de tração. A análise qualitativa dos deslocamentos e deformações obtidos pelos dois métodos mostrou boa concordância. Uma análise quantitativa mais criteriosa mostrou que os resultados experimentais apresentaram variações de baixa amplitude ao longo de uma linha constante para o modelo de elementos finitos. Estes resultados evidenciam a sensibilidade do sistema que consegue captar a não-homogeneidade do material. Além disso, outras discrepâncias observadas podem estar relacionadas a presença de tensões residuais.

Pfeifer *et al* (1998) introduziram a idéia da necessidade de medição do formato de superfícies não-planas para obtenção das direções que irão definir as transformações de coordenadas para cada ponto na superfície. Mostraram ainda a aplicação na medição de tensões e deformações em alguns componentes, comparando os resultados com os obtidos através de extensômetros, buscando verificar a necessidade de se obter o formato da superfície. Ao analisar

as deformações em uma placa de alumínio após um furo ser realizado, poucos problemas em relação as tensões e deformações ocorreram, não sendo necessário realizar a análise do perfil da superfície. Um bloco de alumínio contendo uma fenda também foi analisado e os resultados foram comparados aos obtidos por um extensômetro próximo a região da fenda. Mostrou-se que o ESPI apresenta resultados com maiores detalhes, uma vez que gradientes dificilmente podem ser resolvidos pelos extensômetros. Uma peça de metal com um certo perfil foi analisada e os resultados para as deformações obtidos considerando-se o perfil da superfície foram comparados ao caso em que o perfil não é considerado, evidenciando a necessidade de tal análise, uma vez que quando se considera o perfil, tem-se melhores resultados.

Baseando-se na idéia de combinar a medição do perfil da superfície com a dos deslocamentos, Ettemeyer (2000) mostrou algumas aplicações baseando-se em tal combinação. Além disso, tratou a superação de uma outra dificuldade apresentada nas medições utilizando ESPI, que é a compensação do movimento de corpo rígido da peça em análise, de forma que foi desenvolvido um sistema miniatura que pode ser acoplado diretamente a região de interesse, fazendo com que os problemas de movimento de corpo rígido deixem de existir. O método foi aplicado em uma conexão T. Analisando-se uma região próxima a solda de dutos, comparou-se os resultados obtidos com e sem a transformação de coordenadas, sendo aquele comparado com alguns pontos que foram medidos utilizando-se extensômetros, obtendo-se concordância adequada entre os resultados. Aplicou-se ainda o sistema miniatura para a análise das tensões na parede de um motor diesel, sendo que as cargas presentes devem-se a pressão interna do óleo, torção e cargas de tração.

Dando continuidade a avaliação de deformações tri-dimensionais, Yang e Ettemeyer (2003) descreveram as capacidades, as limitações e as aplicações para ESPI neste tipo de avaliação. Como capacidades cita-se: a capacidade de resolver campos completos de tensão/deformação sem a necessidade de haver contato com o componente, sendo capaz de obter picos elevados de deformação em regiões de altos gradientes de deformação; alta sensibilidade, gerando dados de tensão/deformação precisos; não há necessidade de calibrar o sistema ou preparo da região a ser analisada como polimento, por exemplo; o sistema ESPI pode ser utilizado em diversos tipos de materiais e em objetos de geometria simples ou complexa; uma gama ampla de cargas pode ser

aplicada. A limitação, como qualquer outro método de medição de superfície, dá-se pelo fato de não ser possível obter todo o tensor gradiente de deslocamento, uma vez que as componentes do deslocamento estão relacionadas a apenas duas coordenadas. O sistema ESPI foi aplicado na medição de tensões em uma caixa de transmissão de um veículo de médio porte, os resultados obtidos em alguns pontos foram comparados com os obtidos por extensômetros mostrando concordância adequada entre estes.

Wegner *et al* (2005) trataram a possibilidade de se sobrepor os resultados obtidos pelo sistema ESPI aos desenhos assistidos por computador (CAD) e então realizar comparações entre os resultados medidos e os obtidos através de elementos finitos. Ao se utilizar dessa ferramenta é possível diminuir o tempo de execução de novos projetos, uma vez que a validade dos métodos computacionais testados torna-se elevada. Apresenta ainda, uma aplicação na análise de uma placa de alumínio “espumado” da parte traseira de um automóvel sob carregamento de torção. Oito pontos de interesse são analisados e então exportados para comparação com resultados obtidos por elementos finitos.

Mostafa *et al* (2006) utilizaram o método ESPI para a medição de deslocamentos normais em uma placa de material compósito em flexão, analisando diferentes condições de contorno para aplicação de cargas. Foram analisadas três condições de contorno. Os resultados obtidos através das medições por ESPI apresentaram boa concordância quando o contato real entre os apoios e o objeto e a carga e o objeto são considerados na modelagem por elementos finitos.

Yu *et al* (2006) estudaram o desenvolvimento de dois sistemas de mudança de fase para ESPI, aplicando-os para medições de deslocamentos tri-dimensionais. O primeiro sistema é baseado em componentes ópticos comuns como lentes, espelhos e separadores de feixes, sendo a mudança de fase efetuada por transdutores piezo-elétricos que atuam sobre espelhos. Apesar de ser mais fácil de se montar, necessita de mais elementos e também dos devidos ajustes. Já o segundo sistema é baseado na utilização de fibras ópticas que diminuem a quantidade de elementos necessários no sistema ESPI. A mudança de fase também é controlada por um transdutor piezo-elétrico preso a extremidade das respectivas fibras ópticas. Os resultados apresentados para o erro relacionado a mudança de fase são baixos, podendo ser desconsiderados.

Martinez e Rayas (2007) avaliaram os erros relacionados ao vetor deslocamento obtido através de um sistema ESPI quando se considera a matriz relacionada aos vetores de sensibilidade completa, comparando tais resultados aos obtidos quando a matriz baseia-se apenas nas componentes que apresentam maior sensibilidade para cada uma das respectivas direções. Para tal avaliação utilizou-se uma placa plana e de pequena espessura, onde uma carga de tração seria aplicada na direção x e uma de flexão na direção z , para que as três direções pudessem ser analisadas. As diferenças obtidas foram pequenas, sendo menores para as direções relacionadas aos deslocamentos tangenciais e um pouco maiores para os deslocamentos normais. Observaram então que a utilização da matriz de sensibilidade incompleta gera resultados relevantes, simplificando os cálculos.

Para validar um novo método de avaliação dos fatores de intensidade de tensão modo I, modo II e modo misto, a partir de campos de deslocamentos, Yoneyama *et al* (2007) utilizaram ESPI como parte da instrumentação. Este seria utilizado para a avaliação de campos de deslocamentos na região próxima a uma trinca causada por fadiga. Durante o teste de fadiga, este era interrompido para que as imagens pudessem ser obtidas e então os campos de deslocamentos caracterizados.

Hack e Schumacher (2007) analisaram as deformações para uma viga de concreto reforçada com polímero de fibra de carbono reforçada (CFRP) quando esta encontra-se sujeita a cargas de flexão. Duas análises foram realizadas, sendo que em uma delas a carga era aplicada em pequenos passos para obtenção dos padrões (passo a passo) que seriam avaliados juntamente após o carregamento total. Uma segunda análise consistia em aplicar a carga total e então compensar o movimento de corpo-rígido do componente através de uma modificação no padrão de *speckles* deformado, para que este voltasse a ter correlação. A segunda análise apresentou melhores resultados uma vez que o ruído de *speckles* era muito menor e que a perda de correlação da segunda análise estava relacionada principalmente ao movimento de corpo-rígido e não a mudanças na superfície. Além disso, a comparação dos resultados experimentais com os obtidos por elementos finitos mostrou ser promissora, mas não conclusiva, uma vez que devido a grande diferença entre as heterogeneidades do material real e do simulado, os resultados calculados precisariam ser refinados para posterior comparação.

Martinez *et al* (2008) realizaram uma comparação entre duas configurações ópticas em ESPI. Uma delas (*A*) consiste em iluminar o objeto a partir de três circuitos diferentes, sendo que em dois deles utilizam-se dois feixes de iluminação e no terceiro um feixe de iluminação juntamente com um feixe de referência. Na outra configuração (*B*) ilumina-se o objeto em três direções linearmente independentes mais um feixe de referência. Em ambas as técnicas, a mudança de fase é aplicada para obtenção das fases absolutas. Os experimentos foram realizados em uma placa plana submetida a tração, sendo que uma das extremidades permanecia fixa enquanto a outra era carregada por meio de um dispositivo piezo-elétrico. Os resultados obtidos mostraram que a configuração *A*, devido a sua maior sensibilidade, apresenta melhores resultados para pequenos deslocamentos. No entanto, tal configuração necessita de mais feixes de iluminação do que a configuração *B*.

Restivo e Cloud (2008) apresentaram resultados para medição de deslocamentos em planos que se encontravam no interior de meios transparentes. Dois casos foram analisados, sendo um deles o de uma viga em flexão e o outro um disco em compressão.

Para o primeiro caso, utilizou-se dois tipos de viga feitas de polimetilmetacrilato (PMMA), uma delas denominada *sólida*, onde uma superfície foi pintada e a outra denominada *embutida*, consistindo de duas vigas de diferentes espessuras, coladas com adesivo cianoacrilato e contendo uma camada de pó de alumínio na região adesiva. Na primeira viga mediu-se inicialmente os deslocamentos na superfície pintada e logo após os deslocamentos através da superfície transparente. Na segunda viga cada um dos lados foi analisado, ou seja, cada uma das espessuras. Os resultados obtidos para as deformações, analisando-se os planos através dos meios transparentes, mostraram concordância adequada com os resultados obtidos através de extensômetros.

No segundo caso, onde se analisou um disco em compressão diametral, dois tipos de discos foram utilizados sendo um de polimetilmetacrilato e outro feito a partir de uma resina fotoelástica. Ambos tiveram uma de suas superfícies recobertas por tinta e então foram analisados a partir da superfície recoberta e também pelo lado transparente. Devido aos resultados obtidos, mais outros dois experimentos foram realizados, um a partir de um disco de PMMA de maior

espessura e outro onde um disco totalmente transparente não se deslocaria, estando descolado da superfície a ser deformada. A comparação dos resultados obtidos para a análise das deformações diretamente na superfície com a solução clássica teórica mostrou concordância adequada. Apesar disso, a análise através do material transparente não mostrou resultados tão satisfatórios, podendo relacionar tal erro ao gradiente do índice de refração causado por mudanças nas densidades locais.

Badhuri *et al* (2008) analisaram dois algoritmos de mudança de fase aplicada em ESPI. Estes foram denominados: método da fase das diferenças (PDM) e método da diferença das fases (DPM). No primeiro (PDM) aplica-se mudanças de fases conhecidas na obtenção de padrões de *speckles* para ambos os estados deformado e não-deformado e então a diferença de fase relativa à deformação pode ser obtida através de uma relação entre os padrões de intensidade. Foram utilizados os algoritmos (1,5) e (5,1), sendo que no (1,5) cinco mudanças de fase são aplicadas para o estado deformado enquanto que no (5,1) cinco mudanças de fase são aplicadas ao estado não-deformado. Já o segundo método (DPM), a mudança de fase conhecida também deve ser aplicada para ambos os estados. No entanto, obtém-se as fases para cada um dos estados, a partir dos padrões de intensidades e então a diferença de fase é obtida através da subtração de uma pela outra. O PDM que utiliza o algoritmo (1,5) mostrou ser útil para medições de deformações estáticas, já o algoritmo (5,1) apesar de ser útil para este tipo de medição apresenta melhores resultados para medições quase-dinâmicas. Já o método DPM se encaixa melhor na medição de deslocamentos estáticos com grande redução de ruído, caso o tempo de gravação não seja um problema.

3 Planejamento Experimental

Neste capítulo serão descritos os equipamentos, materiais e geometrias utilizados durante o trabalho. Além disso, a abordagem a ser seguida para a realização dos experimentos também será descrita, caracterizando dessa forma o delineamento dos experimentos. Os experimentos serão realizados no Laboratório de Testes da empresa ThyssenKrupp Metalúrgica Campo Limpo, localizada no município de Campo Limpo Paulista-SP.

A aplicação de métodos conhecidos e estudados pela literatura visa otimizar o processo de medição, sem perda da sensibilidade. A idéia é planejar uma série de medições em componentes similares, em condições definidas, com controle dos fatores de influência para verificar seu efeito.

3.1 Equipamentos, Materiais e Geometrias

A trabalho foi desenvolvido utilizando-se um sistema 3D-ESPI Q-300[®] da Dantec Dynamics GmbH[®]. Este sistema vem acompanhado de um software (ISTRA) para aquisição, processamento e pós-processamento das imagens obtidas, podendo gerar resultados para deslocamentos, deformações e tensões.

As cargas foram aplicadas através de uma máquina de ensaios por fadiga. No entanto, as cargas são estáticas. Uma célula de carga é utilizada para obter a indicação da carga aplicada.

Duas aplicações serão realizadas, sendo uma em peças de geometria mais simples (placa plana com fenda) e a outra em peças de geometria mais complexa (virabrequim de motor de combustão interna). Além disso, dispositivos para fixação das peças na máquina de fadiga foram projetados e desenvolvidos com a participação do autor deste trabalho.

A realização de experimentos em peças de geometria mais simples, apesar de não ser o principal objetivo deste trabalho, permite uma melhor compreensão do método assim como uma base de validação, já que os resultados para tais componentes foram muito estudados e utilizados pela literatura, uma fonte destes resultados pode ser encontrada em (Norton, 2004).

3.1.1 Equipamentos

A Figura 3.1 apresenta o sistema 3D-ESPI Q-300. Nota-se a presença de quatro braços, sendo que o conjunto de braços verticais é utilizado para as medições de deslocamentos na direção y , enquanto que o conjunto de braços horizontais pode ser utilizado para a medição dos deslocamentos tanto na direção x quanto na direção z . A Figura 3.2 apresenta alguns detalhes do equipamento.

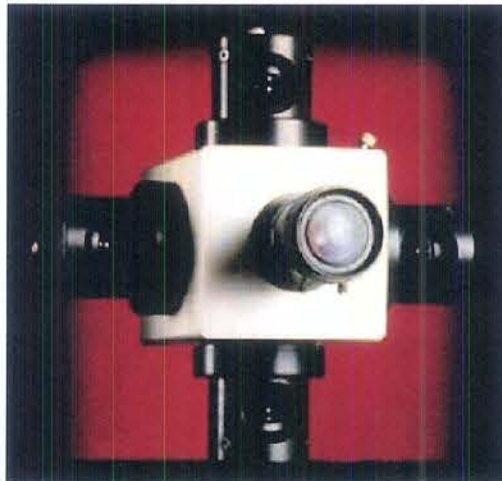


Figura 3.1: Fotografia do cabeçote principal do sistema 3D-ESPI Q-300.

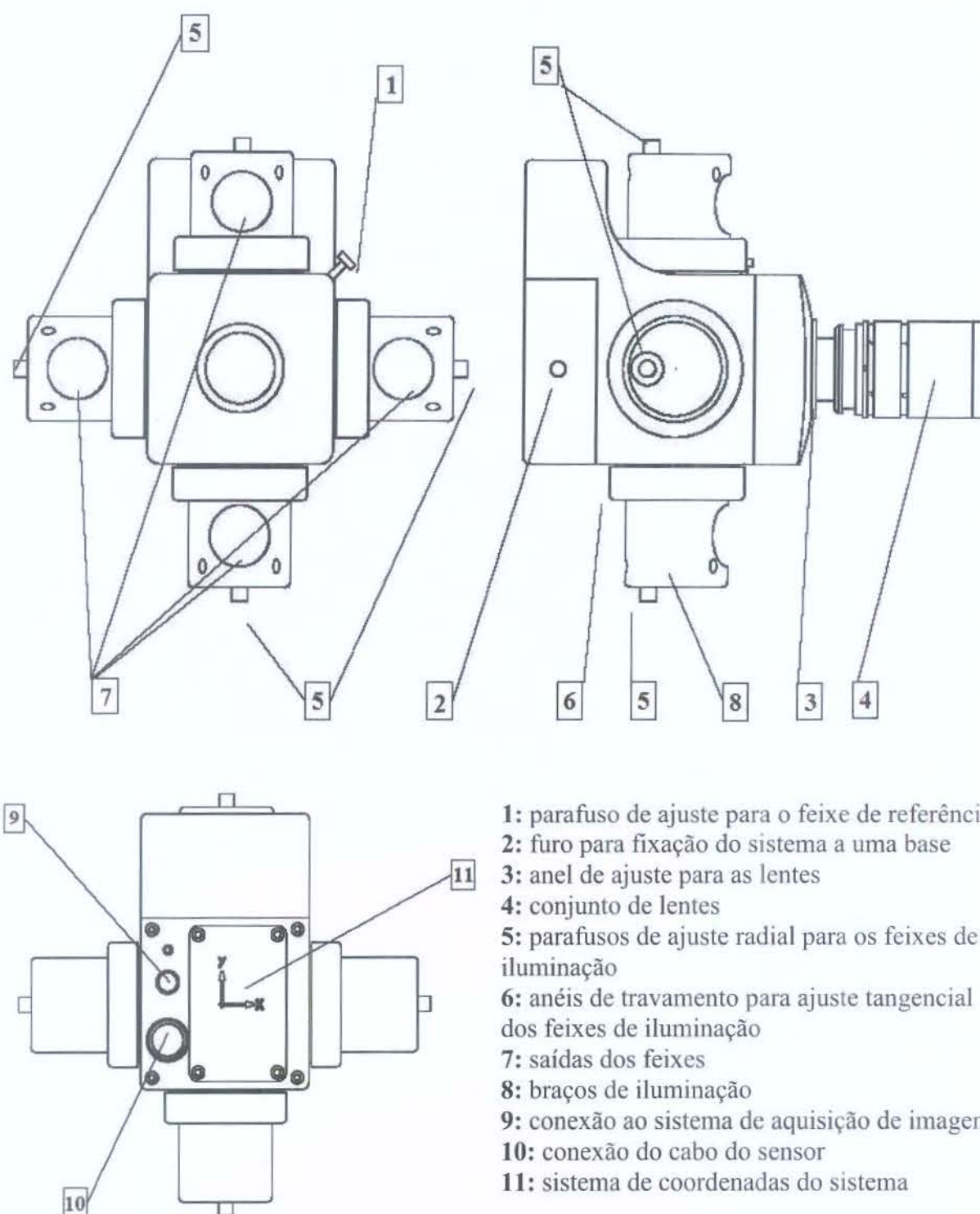


Figura 3.2: Detalhes do sistema Q-300. Fonte: Manual do Equipamento.

O sistema possui dois lasers diodo de comprimento de onda de aproximadamente 780 nm, com potência unitária de 50mW, ou seja, um total de 100mW. Tal laser enquadra-se na

classificação de segurança 3B, ou seja, o contato direto com o olho humano é perigoso. No entanto, quando refletido por alguma superfície o risco não existe.

O sistema ótico pode ser resumidamente ilustrado pela Figura 3.3. A fonte de laser (1), atinge um separador de feixes (2), de modo que uma parte será utilizada como feixe de iluminação e outra como feixe de referência. A parte do feixe que servirá de referência atinge então um conjunto de espelhos planos (4) e então atravessa uma lente (14), atingindo o combinador de feixes (12), incidindo então sobre o plano da imagem da câmera (13). A parte do feixe que será utilizada para iluminação, após ter passado pelo primeiro separador de feixe, atingirá outro separador de feixes e a luz será igualmente dividida entre os braços de iluminação (7). Cada parte do feixe passa por lentes divergentes, atingindo os espelhos planos nas extremidades dos braços, sendo estes ajustados pelos parafusos (6). Estes feixes refletidos formam os feixes de iluminação (8) que atingem o objeto (9). O objeto irá formar um feixe de raios refletidos (10) que por sua vez atravessará um conjunto de lentes (11), passando pelo combinador de feixes (12) e então atingindo o plano imagem da câmera (13).

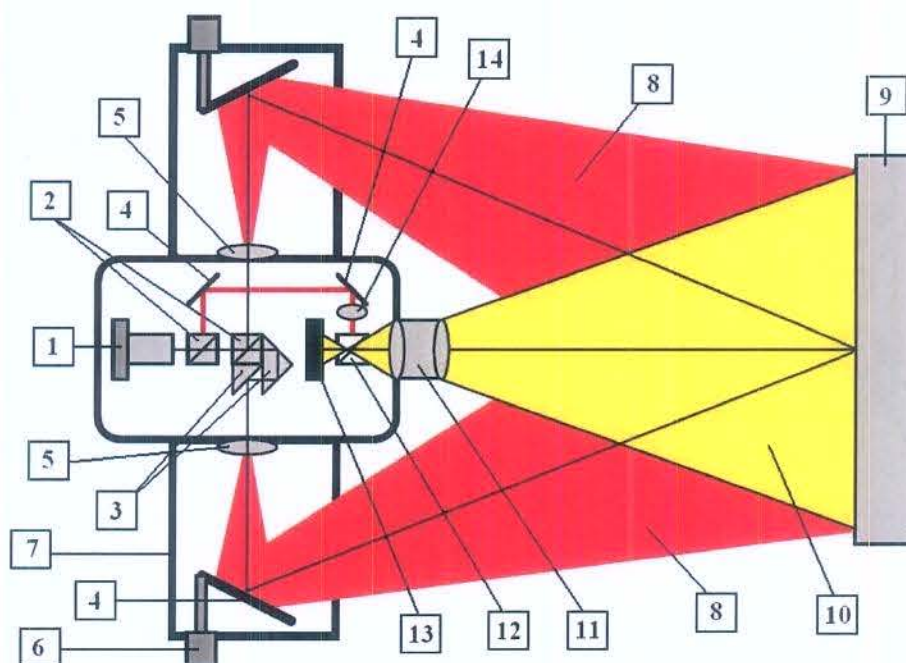


Figura 3.3: Aparato ótico.

Quando se deseja que a sensibilidade seja para deslocamentos tangenciais à superfície do objeto, são utilizados dois feixes de iluminação, sem o feixe de referência. Já para sensibilidade à deslocamentos normais à superfície do objeto, utiliza-se de apenas um feixe de iluminação que será combinado com o feixe de referência. A configuração dos feixes dentro do sistema é realizada por coordenadas inseridas no software ISTR[®]. Estas controlam os obturadores, ajustando o aparato óptico para a finalidade desejada.

O processo de mudança de fase é controlado pelo software que envia comandos a um transdutor piezo-elétrico, de forma que este atua sobre espelhos e/ou materiais refringentes (não representados na Figura 3.3) fazendo com que estes causem mudanças de fase conhecidas sobre o feixe que atuam.

O conjunto de lentes indicado pelo número 11 na Figura 3.3 consiste de duas lentes, cujas posições podem ser alteradas, e um orifício que pode ter seu diâmetro alterado. Alterações nas posições da lente permitem focalizar objetos sem a necessidade de movimentar todo o sistema ESPI. O diâmetro do orifício está diretamente relacionado com as características dos *speckles* obtidos.

A câmera é do tipo CCD (digital), com uma área de imagem de 1392 pixels na horizontal e 1040 pixels na vertical. A sensibilidade da câmera não está restrita à frequência do laser utilizado, podendo ser utilizada com outras fontes externas.

Através do software ISTR[®] podem ser controlados diversos fatores relacionados ao processo de medição, além da possibilidade de avaliação dos interferogramas obtidos. Diversos parâmetros podem ser definidos em um arquivo de extensão .INI, podendo-se citar: a taxa de atualização da imagem ao vivo em *ms*; o atraso para mudanças de fase em *ms*; as intensidades para os lasers diodo em *mA* (também podem ser configurados diretamente no software); o método utilizado no cálculo dos deslocamentos, havendo duas possibilidades, considerando a divergência da iluminação e sem considerar tal divergência; o atraso entre o obturador e a medição em *ms*.

Para outros casos é possível modificar o parâmetro diretamente no software, como por exemplo: o método de mudança de fase a ser utilizado; os filtros e a quantidade que será utilizada; dados de entrada para o transdutor piezo-elétrico; ativação do feixe de referência; distância da câmera ao objeto; ganho e contraste da imagem em cada uma das três direções de medição; deformação absoluta do ponto de interesse.

Para a aplicação de carga foi utilizada uma máquina de fadiga da marca SCHENK[®], lembrando que serão utilizadas apenas cargas estáticas. A base da máquina (mesa) possui estrutura amortecida, para evitar que as vibrações do ambiente influenciem o sistema e o componente em medição. A máquina tem capacidade de gerar uma força máxima de tração de 30 kN e uma força máxima de compressão de 60 kN. Uma célula de carga é acoplada ao sistema e sua carga é mostrada em um visor. A Figura 3.4 apresenta um esquema da máquina. Sobre a mesa encontram-se dois braços onde corre uma base que deve ter sua posição fixada. A aplicação da carga ocorre na base da mesa, onde está acoplada a célula de carga. As cargas aplicadas à placa plana foram geradas a partir de um torque aplicado a uma haste roscada, sendo esta responsável por abrir a fenda inserida na placa.

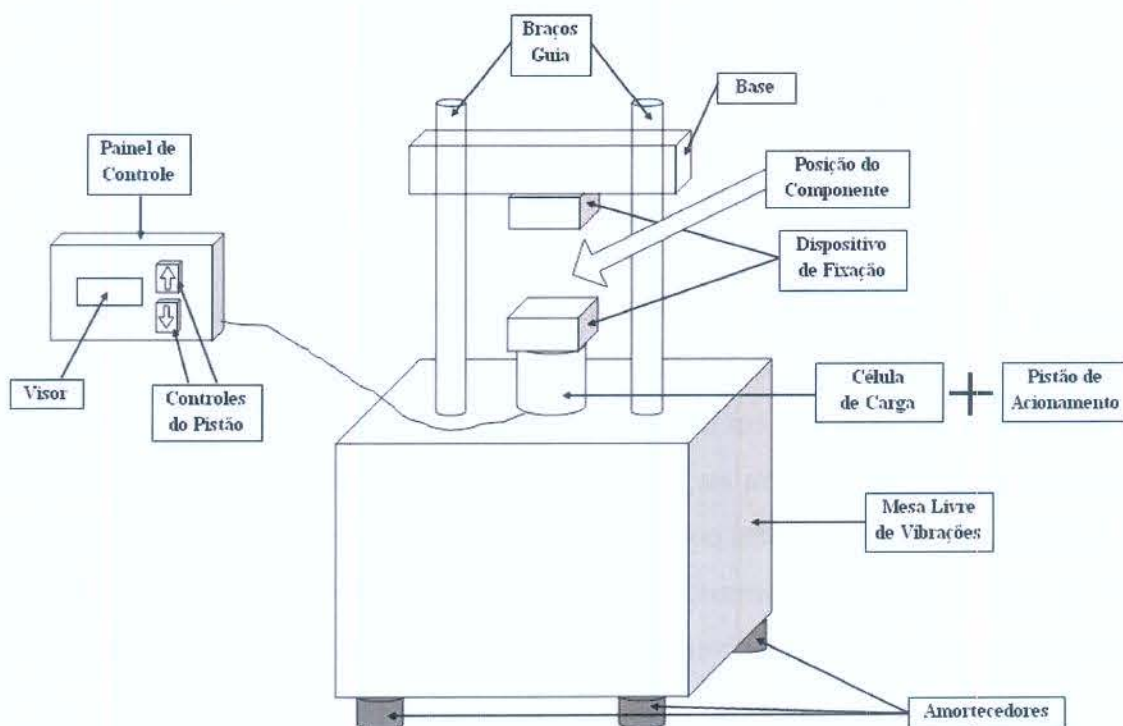


Figura 3.4: Esquema da máquina de aplicação de carga.

3.1.2 Materiais

Conforme dito, neste trabalho serão empregados dois tipos de componentes mecânicos. Uma placa plana, que servirá para a verificação do método, e o virabrequim, que será o principal elemento a ser analisado. A placa plana utilizada nos ensaios é feita de aço SAE 1040. Cinco amostras foram analisadas durante a etapa inicial de desenvolvimento da metodologia de medição das tensões. Algumas das propriedades e a composição química deste material encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades e composição química do aço SAE 1040.

Fonte: www.matweb.com – acessado em 08 de maio de 2008.

Propriedades mecânicas		Composição Química	
Propriedade	Valor	Componente	Valor
Densidade	7,85 g/cm ³	Carbono, C	0,42-0,50%
Dureza Brinell	179	Ferro, Fe	98,51-98,98%
Módulo de Elasticidade	205 GPa	Manganês, Mn	0,60-0,90%
Coefficiente de Poisson	0,29	Fósforo, P	≤ 0,04%
Módulo de Cisalhamento	80 GPa	Enxofre, S	≤ 0,05%

O virabrequim consiste num aço de baixo carbono, tendo características muito próximas das do aço apresentado na Tabela 3.1, no que se refere ao Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson, que são as propriedades necessárias para determinação das tensões a partir das deformações. Por determinação da ThyssenKrupp, as propriedades do material do virabrequim e sua composição química não podem ser divulgadas.

Ambos os dispositivos de fixação, para placa plana e para virabrequim, foram confeccionados em aço SAE 1040, cujas propriedades já foram listadas.

3.1.3 Geometria dos materiais

A placa plana apresenta a geometria mostrada na Figura 3.5. Note-se a presença de dois furos em uma das extremidades. Estes serão utilizados para fixação da placa ao dispositivo

acoplado à máquina de fadiga. Existe também um furo na parte inferior onde um parafuso será acoplado para aplicação de força com o intuito de “abrir” a fenda. As medidas são em milímetros.

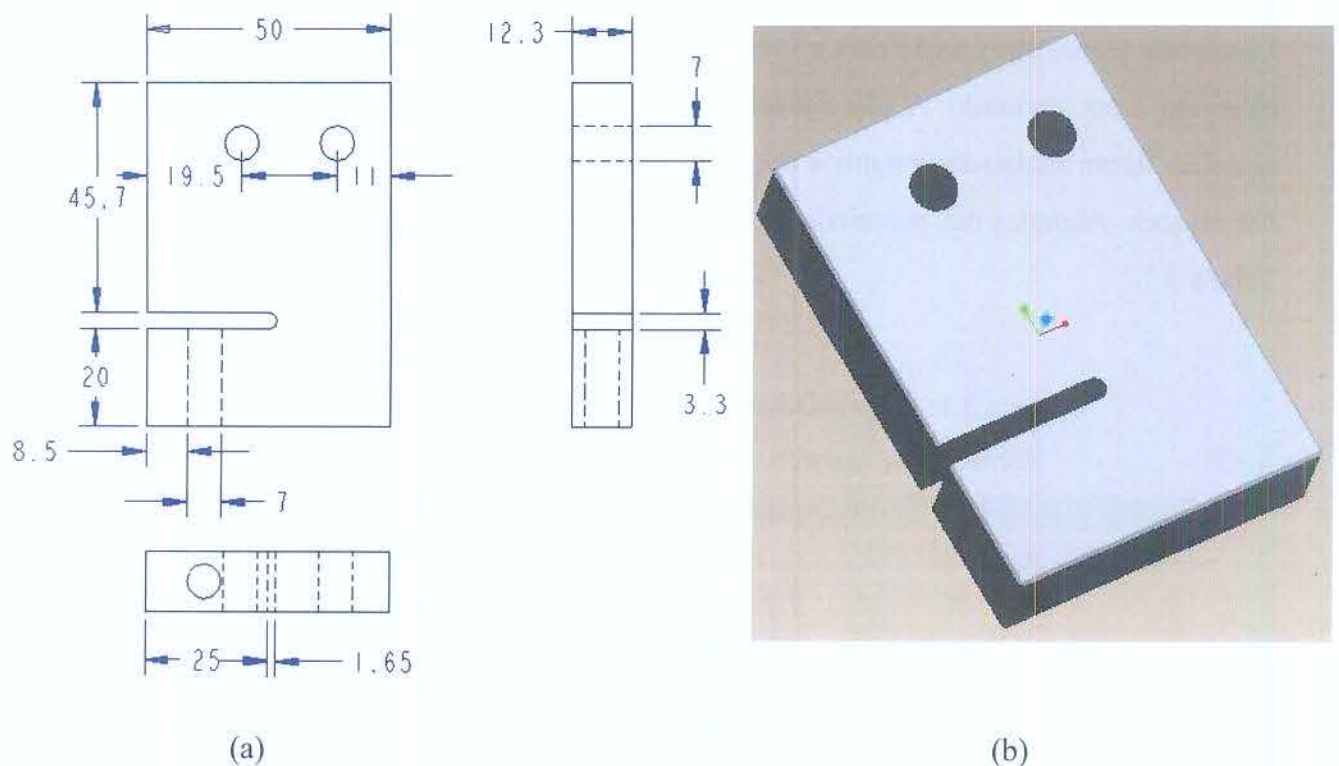


Figura 3.5: Geometria da placa plana. (a) Desenho 2D - Medidas em mm. (b) Croqui 3D.

O virabrequim não será analisado por completo, apenas uma parte do mesmo será utilizada. Essa parte é constituída por dois munhões, dois braços e o moente localizado entre os conjuntos formados pelos dois munhões e braços. A região de maior interesse é dada pela transição entre o moente e o braço, onde normalmente surgem as falhas neste componente. Além de ser prática comum analisar apenas estas partes da peça, a visualização da área de interesse torna-se mais expressiva, contribuindo para a aplicação do método de medição de tensões. Os munhões apresentam um diâmetro de 82 mm e o moente 60 mm. O braço da manivela é de aproximadamente 70 mm. A Figura 3.6 mostra o componente analisado. Embora tenham sido utilizadas no presente trabalho, as dimensões completas não foram divulgadas atendendo determinação da ThyssenKrupp Metalúrgica Campo Limpo.

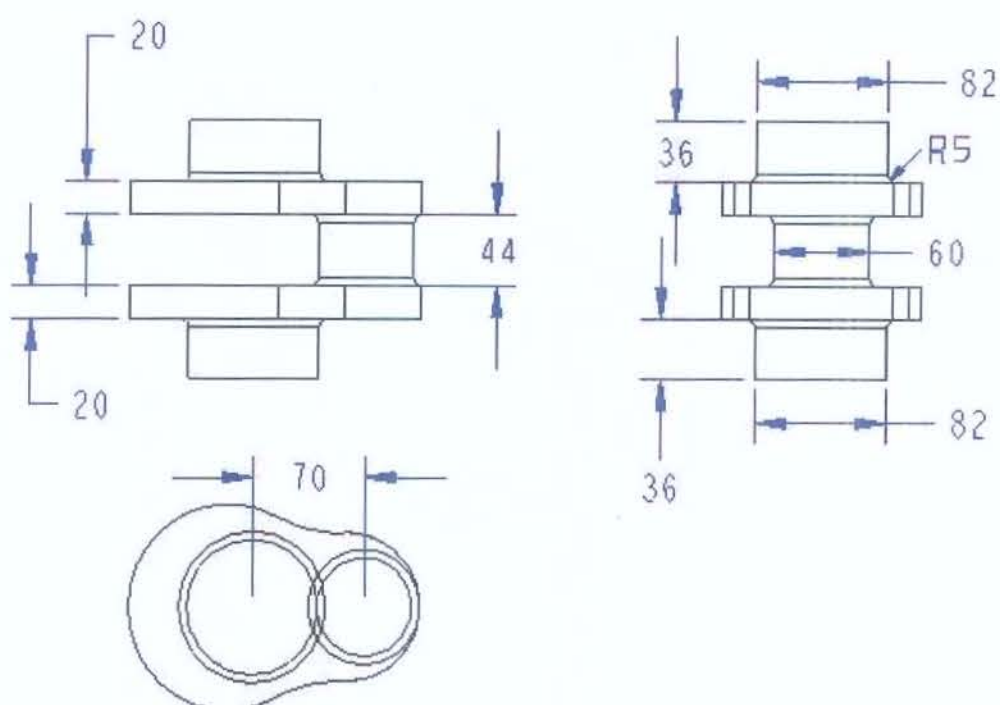
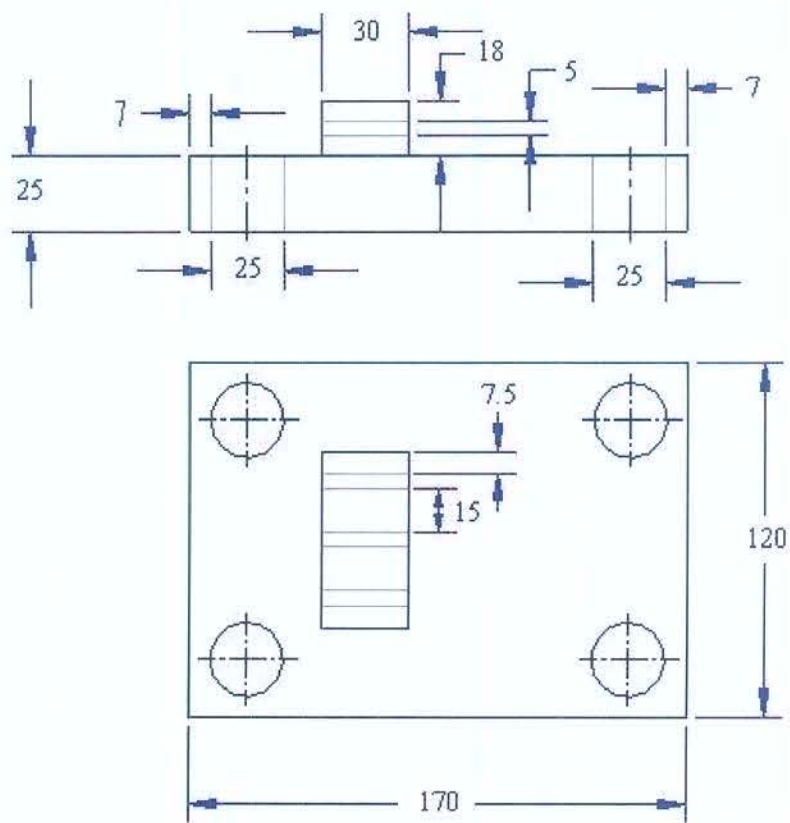


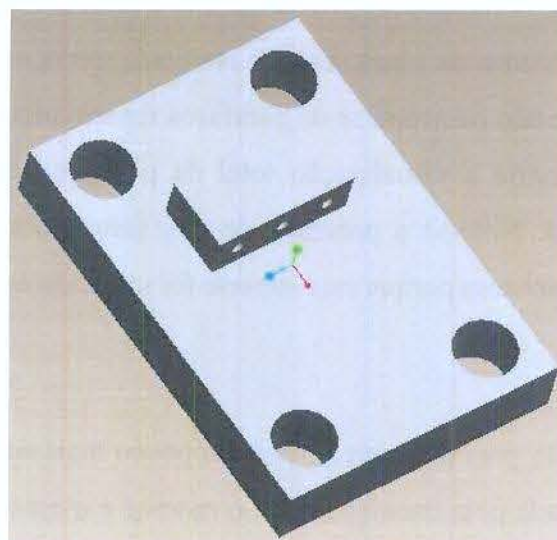
Figura 3.6: Geometria do virabrequim analisado neste trabalho. Medidas em mm.

A Figura 3.7 apresenta a geometria do dispositivo de fixação que foi utilizado para os ensaios com as placas planas. A fixação propriamente dita é feita por dois parafusos que prendem uma pequena tira às extremidades da placa. Ela foi realizada dessa maneira, pois assim permite uma fixação uniforme, o que não ocorreria se os parafusos fossem afixados diretamente nos furos da placa. O dispositivo permite a visualização total da placa, exceto na extremidade que se encontra sob a tira metálica. Note-se a presença de três furos no suporte, mas a placa plana apresenta apenas dois. Eles existem porque este suporte foi utilizado anteriormente para aplicação de carga em outras peças.

O dispositivo de fixação para o virabrequim é um pouco mais complexo. A região de maior interesse a ser analisada é dada pela transição entre o moente e o munhão, caracterizada por uma concordância. O dispositivo deve permitir uma área de visualização adequada para que o método possa ser aplicado. Dessa forma, dependendo de como a fixação do dispositivo ao munhão é feita, é possível se obter uma região de visualização que atenda aos interesses da medição. A Figura 3.8 apresenta um esboço do dispositivo de fixação, sem as medidas finais. A porção A marcada na figura, é a de maior interesse.

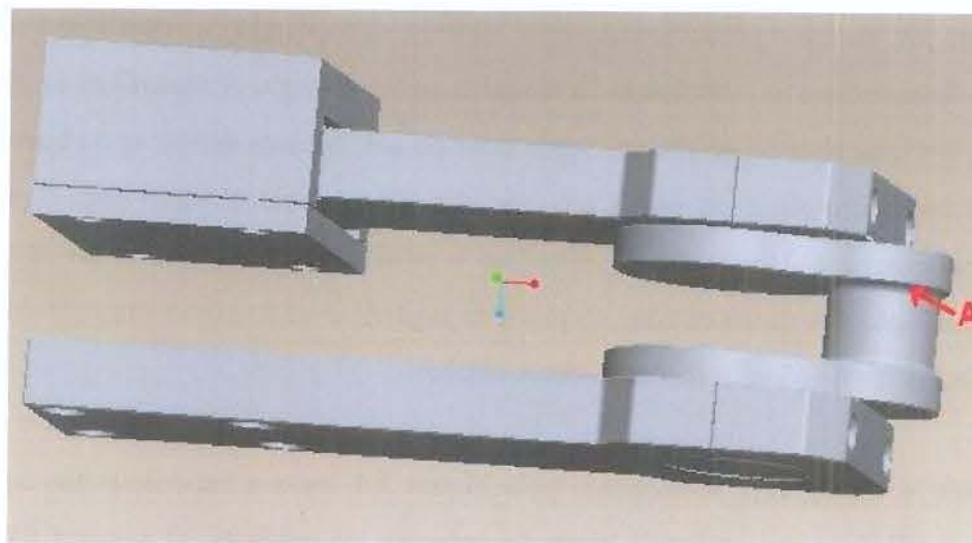


(a)

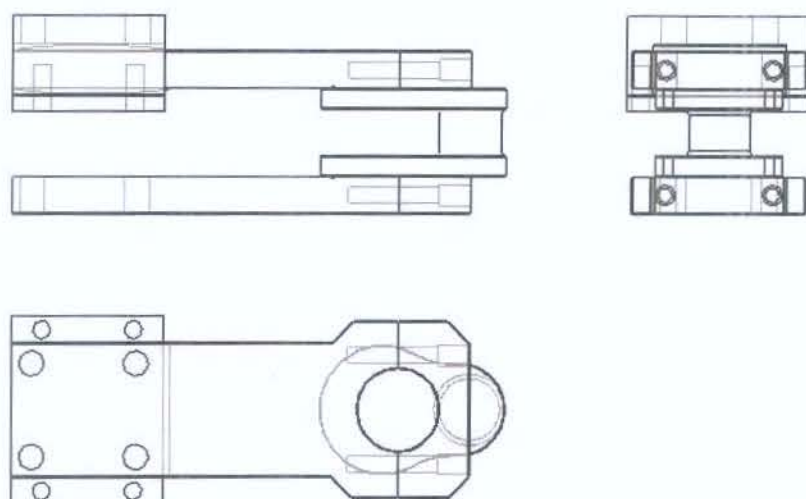


(b)

Figura 3.7: Geometria do dispositivo de fixação para placa plana. (a) Desenho 2D - Medidas em mm. (b) Croqui 3D.



(a)



(b)

Figura 3.8: Esboço do dispositivo de fixação para o virabrequim (a) 3D (b) Três vistas 2D

3.2 Método de medição

O método de medição a ser empregado está diretamente relacionado às características geométricas da superfície a ser medida, ou seja, para superfícies planas em relação ao eixo normal da lente da câmera segue-se um procedimento, enquanto que para superfícies que apresentam um perfil de elevações, uma etapa extra deve ser acrescentada ao método de medição utilizado.

A Figura 3.9 mostra o procedimento a ser seguido, dependendo da superfície a ser medida. Inicialmente deve-se fixar o componente à máquina que o carrega. A superfície do objeto deve ser recoberta por uma tinta ou pó branco. Após estes passos, deve-se definir se o objeto apresenta um perfil de superfície plano ou não. Caso este seja plano, deve-se seguir para o processo de medição, caso contrário é necessário determinar o perfil da superfície e então seguir para o processo de medição. Os dados obtidos do perfil da superfície serão posteriormente utilizados na geração de dados em função dos deslocamentos obtidos.

Seguindo o fluxograma apresentado pela Figura 3.9, caso a superfície não seja plana a medição do perfil deve ser realizada antes do processo de medição. O sistema ESPI Q-300, juntamente com o software Istra pode realizar tal procedimento automaticamente.

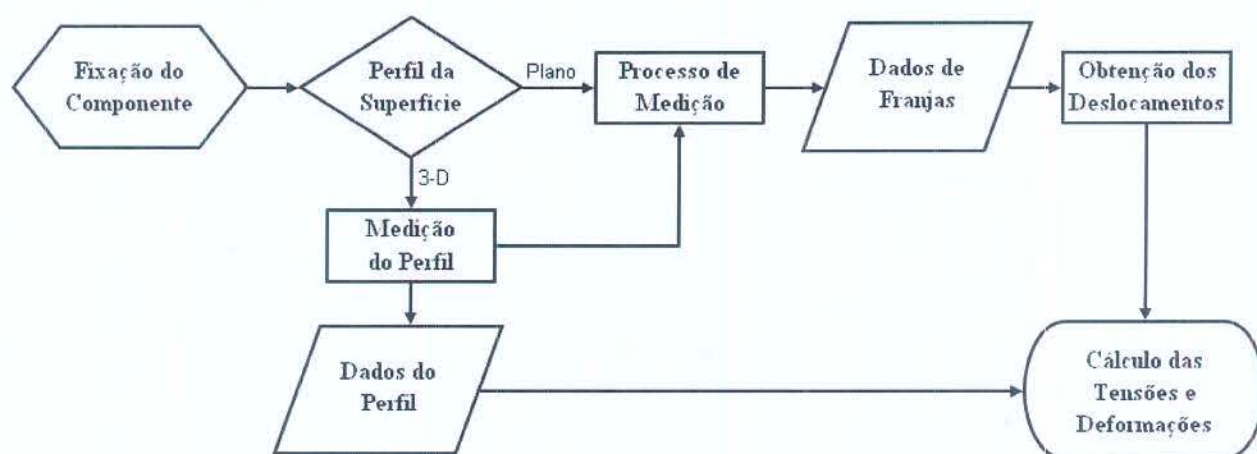


Figura 3.9: Procedimento utilizado para a determinação das tensões.

A primeira etapa do processo de medição envolve a definição de uma borda para limitação da área a ser analisada, além da inserção de um ponto de interesse. Este ponto deve ter uma deformação conhecida. Caso não se conheça nenhum deslocamento no componente, os resultados serão relativos a este ponto. Assim, este ponto pode ser considerado como de referência. Além disso, é necessário ajustar a ampliação do sistema de lentes, bem como a distância da superfície do objeto ao sistema, para acomodação da lente da câmera.

Como próximo passo, deve-se ajustar o contraste de franjas obtido para cada uma das direções de sensibilidade. Tal ajuste pode ser realizado através de alterações na intensidade dos

lasers ou ainda na opção contraste existente nas configurações de vídeo. Além desta, é possível ainda alterar o ganho na imagem. A opção contraste não altera os cálculos. No entanto, o aumento do ganho pode aumentar o efeito de ruído no padrão de *speckles*.

Também é possível configurar o método de mudança de fase que será utilizado. Apesar de ser mais lento, o algoritmo 4+4 (quatro fases para o objeto não deformado e quatro fases para o objeto deformado) é mais estável. O filtro de fase aplicado às franjas de interferência também pode ser configurado, eliminando assim parte do ruído na imagem.

O processo propriamente dito pode ocorrer de duas formas: quando apenas um carregamento é aplicado e quando uma série de carregamentos é aplicada. Esta última permite que cargas de maiores magnitudes possam ser aplicadas pelo sistema sem que ocorra perda de correlação entre os padrões de *speckle*, uma vez que a cada novo passo, uma nova referência é obtida. Independentemente da forma como é realizado, deve-se inicialmente obter uma imagem de referência para o componente não deformado: aplica-se uma carga, sendo possível visualizar franjas de interferência no monitor. Sendo assim, é possível criar um mapa de fases que servirá como base para a obtenção de deslocamentos, deformações e tensões.

3.3 Aplicações simples – placa plana com fenda

A medição de tensões em placas planas apresenta complexidade relativamente menor se comparada à medição em virabrequim, principalmente devido às características geométricas da peça. Outra razão está relacionada à superfície cujas tensões serão medidas, que é plana. Além disso, uma comparação com o método dos elementos finitos pode facilmente ser realizada para o caso de placas planas, não demandando conhecimentos muito aprofundados do método. No entanto, isto está fora do escopo deste trabalho.

Apesar da aplicação do método ESPI na medição de tensões na placa plana ser mais simples, diversos aspectos presentes nessa aplicação ajudam a compreensão do método, podendo se estender ao caso mais complexo. Em virtude disso, um delineamento dos experimentos bem fundamentado para esta etapa inicial permite que o método de medição de tensões tenha robustez

para essa aplicação, além de permitir a análise e discussão do tema, o que será muito útil para a aplicação com virabrequins.

Um outro método para validação dos resultados consiste na medição da deformação em um determinado ponto, utilizando-se um extensômetro. Para isso, foram analisados três níveis de carga, sendo que para o primeiro nível realizaram-se cinco repetições. Tais experimentos foram realizados em apenas uma das configurações do planejamento experimental mostrado a seguir.

3.3.1 Fatores relacionados ao processo

O modelo apresentado pela Figura 3.10 define de maneira geral um sistema ou processo onde se deve realizar a experimentação. Basicamente o processo é dado por uma combinação entre operações, máquinas, métodos, pessoas e outras fontes que transformam entradas em uma resposta de saída. Alguns destes fatores são controláveis e outros são não controláveis (fontes de variabilidade) ou não se quer controlar.

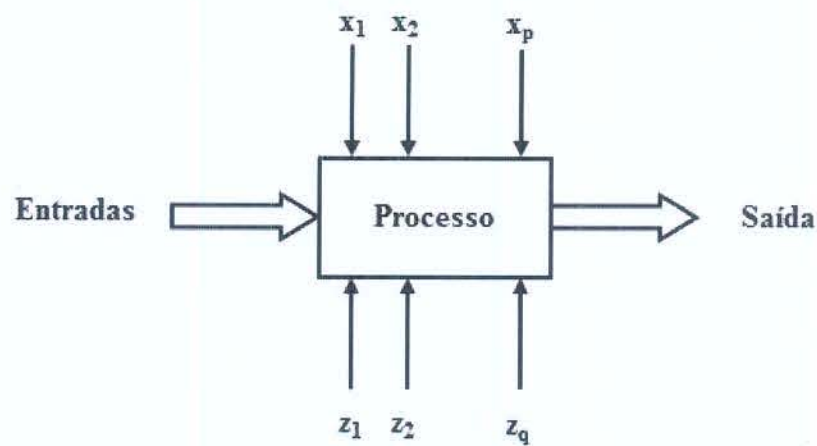


Figura 3.10: Modelo geral de um processo de medição.

Montgomery (2005) define diretrizes a serem seguidas para o desenvolvimento de experimentos. Tais diretrizes devem seguir sete passos; os três primeiros definem o pré-planejamento experimental. A Tabela 3.2 apresenta tais diretrizes.

Tabela 3.2: Diretrizes a serem seguidas no desenvolvimento de experimentos.

Fonte: (Montgomery, 2005).

Passo	Diretriz	
1.	Reconhecimento e constatação do problema	
2.	Seleção da variável de resposta	Pré-planejamento experimental
3.	Escolha dos fatores, níveis e limites	
4.	Escolha do planejamento experimental	
5.	Execução dos experimentos	
6.	Análise estatística dos dados	
7.	Conclusões e recomendações	

Seguindo as diretrizes acima, a primeira etapa consiste em definir o problema. Nessa etapa inicial, busca-se medir tensões através de ESPI nos pontos próximos a região da concordância entre moente e braço. Assim sendo, deve-se caracterizar este método de forma a compreender como é afetado pela variação dos fatores que influem nos resultados.

Ao se avaliar um método utilizado para medição de tensões, a variável de resposta a ser analisada são os próprios resultados de tensão obtidos. No entanto, a análise estatística dos dados de campo, ponto a ponto, para análise dos fatores de influência, seria muito extensa e tediosa. Dessa forma a determinação de pontos críticos para análise parece ser mais aplicável, face aos objetivos. Apesar disso, uma análise visual e qualitativa do campo de tensões pode ser realizada, comparando-se os resultados experimentais aos resultados obtidos por outros métodos de avaliação de tensões como, por exemplo, o método de elementos finitos.

Além das tensões, uma vez que o método permite a obtenção dos deslocamentos em cada uma das direções e, a partir destes, das tensões e deformações, seria importante que, para o caso das placas planas, fossem analisados os deslocamentos em relação às direções x e y . Tem-se, portanto, três variáveis de resposta: as tensões e os deslocamentos em x e y .

Os fatores controláveis podem ser classificados em: fatores de influência (FI), fatores mantidos constantes (MC) e fatores permitidos a variar (PV). Os fatores de influência são aqueles que serão de fato analisados pelo planejamento experimental, em níveis definidos. Os fatores mantidos constantes são aqueles que podem causar alguma influência, mas no experimento em

questão são mantidos num nível constante. Já os fatores permitidos a variar estão relacionados àqueles em que a variabilidade entre os objetos de estudo é ignorada num primeiro momento (definição dos fatores), confiando-se na aleatorização dos ensaios para balancear a influência destes fatores.

As fontes de variabilidade podem ser classificadas em: controláveis (FC), incontroláveis (FIn) e fontes de ruído (FR). As fontes controláveis são as fontes de variabilidade que podem ser ajustadas antes do início do planejamento e execução dos experimentos. As fontes incontroláveis são aquelas que, apesar de não poderem ser definidas, podem ser medidas. Já as fontes de ruído estão relacionadas aquelas que variam naturalmente e não permitem controle sob tal variação.

3.3.2 Classificação dos fatores

Seguindo esta idéia, inicialmente buscou-se listar todos os fatores que causariam algum tipo de influência no método de medição de tensões. Nessa primeira parte os fatores foram agrupados de acordo com a procedência, obtendo-se os seguintes quatro grupos: material; condições do ambiente; preparação física do sistema e configurações do software. Numa segunda etapa os fatores foram classificados em fatores controláveis e fontes de variabilidade. A Tabela 3.3 apresenta os fatores controláveis e suas respectivas classificações representadas na última coluna da tabela, seguindo a seguinte legenda: FI para os fatores de influência, MC para os fatores mantidos constantes e PV para os fatores permitidos a variar.

Em relação ao material da placa, os fatores definidos pela sua homogeneidade e também as imperfeições dimensionais relacionadas a esta foram permitidos a variar, de modo que estes foram ignorados buscando-se balancear tais variações durante a aleatorização dos experimentos.

A temperatura do laboratório de testes da ThyssenKrupp foi mantida constante com a ajuda de um condicionamento de ar centralizado. Esta temperatura apresenta oscilações. No entanto, estas não são elevadas e foram consideradas como permitidas a variar, podendo-se balancear os possíveis efeitos de tal variação através da aleatorização dos ensaios.

Tabela 3.3: Fatores controláveis e respectivas classificações.

	Procedência	Fator	Classificação
1	Material	Falta de homogeneidade do material	PV
2		Imperfeições dimensionais e geométricas	PV
3	Ambiente	Temperatura ambiente	PV
4	Preparação Física do Sistema	Localização do sistema ESPI (xy)	MC
5		Distância do sistema à superfície do objeto (z)	FI
6		Ajuste da distância focal da lente da câmera	PV
7		Diâmetro do orifício	MC
8		Ajuste dos espelhos dos braços de iluminação	PV
9		Ajuste da intensidade do feixe de referência	PV
10		Intensidade do laser	MC
11	Configurações do Software	Calibração do transdutor piezo-elétrico	MC
12		Ganho da imagem	FI
13		Definição dos limites de medição (borda)	MC
14		Definição do ponto de deformação absoluta conhecida	MC
15		Tipo de medição: única ou série	FI
16		Método para mudança de fase	MC
17		Atraso entra cada mudança de fase	MC
18		Filtro de fase	MC
19		Suavização	FI

O sistema ESPI encontra-se montado sobre um suporte, que permite a movimentação deste em relação aos três eixos coordenados. A localização do sistema em relação às direções x e y foi mantida constante, enquanto que a posição do sistema em relação à direção z consistiu num fator de influência, uma vez que tal grandeza está relacionada ao tamanho dos *speckles*, podendo influir consideravelmente nos resultados.

O diâmetro do orifício está relacionado ao tamanho dos *speckles* que serão formados. Apesar de ser controlável, para que este volte a sua posição original após ser modificado é necessário um processo muito difícil de ser medido e como a distância sistema-objeto, que está relacionada ao tamanho dos *speckles*, já é um fator de influência, o diâmetro do orifício será mantido constante.

O ajuste dos espelhos dos braços de iluminação, assim como a intensidade do feixe de referência, está relacionado a uma correta iluminação do objeto, de forma que este receba os

mesmos níveis de iluminação em todas as direções de medição. Esses ajustes são realizados manualmente e podem sofrer pequenas variações conforme os outros fatores são variados. Dessa forma, estes fatores podem variar livremente.

A intensidade dos dois lasers utilizados pode ser configurada através do software. Como tal intensidade está relacionada à iluminação, este fator é mantido constante. A calibração do transdutor piezo-elétrico é realizada na etapa de configurações iniciais, sendo mantida constante durante a realização dos ensaios.

O ganho na imagem está relacionado ao processo de obtenção dos *speckles* pelo sistema CCD, ou seja, ganhos muito baixos permitem obter poucos pontos claros e causam perda de sensibilidade na detecção de *speckles*. Tal fator tem grande influência no resultado e por isso suas variações serão avaliadas nos experimentos.

A definição dos limites de medição (borda) assim como a definição do ponto de deslocamento conhecido é realizada diretamente no software. Dessa forma, cada uma das distâncias sistema-objeto que serão avaliadas necessitam de um conjunto borda-ponto conhecido. Como este processo envolve a confecção via mouse dos limites e será realizada uma única vez para cada distância sistema-objeto, estes fatores podem ser considerados como mantidos constantes.

O tipo de medição realizada (única ou em série) envolve a quantidade de franjas que será obtida em cada uma das figuras de interferência. Além disso, o processo de obtenção dos deslocamentos, deformações e tensões, para cada um destes tipos de medição, é realizado de forma ligeiramente diferente. Este fator será variado durante os experimentos, caracterizando-se como um fator de influência.

O método utilizado para mudança de fase pode ser configurado diretamente no software. Seguindo a literatura, o método 4+4 é o mais estável e por isso será mantido constante nesse trabalho. O atraso para as mudanças de fase também pode ser configurado, mantendo-se constante num valor aconselhado pelo fabricante.

O filtro de fase permite que as figuras de franjas de interferências tenham seu ruído filtrado, obtendo-se maior definição das franjas, o que permite uma análise mais concisa dos dados obtidos. Apesar de influenciar diretamente os resultados, a configuração altera a eficiência destes filtros e será utilizada a eficiência máxima, mantendo-se constante nesse nível.

A suavização dos resultados é realizada através de processos de interpolação em regiões contendo determinada quantidade de *speckles*, característica do software, e como esta interpolação pode causar mudanças nos resultados para os pontos críticos, este fator será considerado como um fator de influência.

A Tabela 3.4 apresenta as classificações para as fontes de variabilidade, onde é usada a legenda: FC para fontes controláveis, FIn para fontes incontroláveis e FR para as fontes de ruído.

Tabela 3.4: Fontes de variabilidade e respectivas classificações.

	Procedência	Fonte	Classificação
1	Ambiente	Vibração da mesa: máquinas de fadiga no laboratório	FC
2		Vibração da mesa: outras fontes	FR
3		Correntes de ar	FR
4		Vibrações externas: trem passando	FIn
5	Preparação Física do Sistema	Fixação da peça: localização da peça em relação ao ESPI	FR

A vibração da mesa relacionada ao funcionamento das máquinas de fadiga que se encontram presentes no laboratório pode influenciar no resultado. É possível analisar a influência destas máquinas, caso estas sejam consideradas como fontes de variabilidade controláveis, de forma que pode-se realizar os ensaios enquanto elas encontram-se ligadas ou desligadas.

Já a vibração da mesa relacionada a outras fontes varia naturalmente e incontrolavelmente, apresentando baixa amplitude devido às características amortecedoras da mesa. Dessa forma, tais vibrações são consideradas como fontes de ruído.

Externamente ao laboratório, nas proximidades, passa uma linha de trem. Quando estes passam as vibrações podem influenciar as medições do sistema. No entanto, como tais passagens são esporádicas, não serão realizados ensaios durante as passagens, caracterizando assim uma fonte incontrolável.

As correntes de ar encontram-se presentes no laboratório podendo ser oriundas de duas fontes principais: ar-condicionado ou ar exterior quando uma das portas é aberta. Como a influência é baixa e a variações ocorrem naturalmente e incontrolavelmente (no caso do ar-condicionado) esta será considerada como uma fonte de ruído.

As placas são fixadas ao dispositivo de fixação através de uma fita metálica e dois parafusos. Devido à alta sensibilidade do sistema e às baixas tolerâncias do dispositivo e também da placa, cada vez que uma placa for fixada variações ocorrerão, mesmo para o caso de réplicas. Pode-se considerar esta fonte como uma fonte de ruído.

A Tabela 3.5 apresenta em resumo os fatores de influência e a fonte de variabilidade controlável, determinados a partir das classificações de todos os fatores. Além disso, a Tabela 3.5 mostra também os níveis escolhidos para cada um dos fatores.

Tabela 3.5: Resumo dos fatores de influência e fonte de variabilidade controlável e respectivos níveis avaliados.

		Níveis	
Fatores de influência		-	+
A	Distância do sistema à superfície do objeto (z)	180 mm	225 mm
B	Tipo de medição: única ou série	Única	Dois passos
C	Ganho da imagem	10	50
D	Suavização	Pouca suavização (2 vezes)	Muita suavização (10 vezes)
Fonte de variabilidade		+	-
E	Vibração da mesa: máquinas de fadiga no laboratório	Máquinas desligadas	Máquinas ligadas

Analisando-se a Tabela 3.5 nota-se que se têm quatro fatores de influência e uma fonte de variabilidade. Um planejamento experimental que seria capaz de analisar todas as interações consiste num planejamento fatorial completo para os fatores de influência, sendo que cada combinação de fatores deve ser testada nos dois níveis da fonte de variabilidade. Caso se procedesse dessa forma ter-se-ia a necessidade de realizar trinta e dois experimentos. Tal tipo de análise segue a idéia de arranjos combinados proposta inicialmente por Taguchi e Wu (1980) e Taguchi (1987). Apesar de ser possível realizar essa quantidade de ensaios, outros tipos de planejamentos permitem obter análises satisfatórias com uma quantidade menor de ensaios, sem comprometer os resultados. Como exemplo, têm-se os planejamentos fatoriais fracionários.

Um planejamento fracionário muito comum para quando se tem todas as variáveis em dois níveis é dado pela fração meia do planejamento 2^k . Neste tipo de planejamento fracionário, são necessários 2^{k-1} experimentos, metade do total necessário caso o planejamento fosse completo. Tal planejamento é obtido da seguinte forma: primeiramente produz-se um planejamento completo para $k-1$ fatores, a última coluna é obtida a partir da multiplicação dos sinais para cada uma das colunas relacionadas aos fatores principais. A Tabela 3.6 mostra a obtenção deste planejamento para $k=4$ fatores. Para este planejamento fracionário, a expressão geratriz é dada pela Equação (3.1).

$I = ABCD$
(3.1)

Tabela 3.6: Planejamento experimental fração meia (2^{4-1}).

Planejamento base					
Ensaio	A	B	C	D=ABC	Combinação de Tratamentos
1	-	-	-	-	d
2	+	-	-	+	ad
3	-	+	-	+	b
4	+	+	-	-	ab
5	-	-	+	+	c
6	+	-	+	-	ac
7	-	+	+	-	bc
8	+	+	+	+	abcd

O efeito do fator A no planejamento fracionário na verdade contém também o efeito da interação BCD, logo tem-se que $[A] \rightarrow A + BCD$, ou seja, o efeito medido por [A] é uma estimativa para a soma dos dois efeitos, de modo que a fração meia confunde o efeito principal de A com BCD (Barros Neto *et al*, 2007). Tais efeitos são indistinguíveis na análise fracionária. Para um planejamento fatorial 2^{4-1} , cada um dos efeitos principais confunde-se com o efeito de uma interação entre três fatores, já os efeitos de algumas interações entre dois fatores confundem-se com os efeitos de outras interações entre dois fatores. É possível determinar qual efeito se confunde com cada um dos efeitos principais multiplicando-se cada um destes pela geratriz, de modo que fatores ao quadrado denotam identidade. Analogamente, é possível determinar quais efeitos de dois fatores se confundem entre si, multiplicando estes pela geratriz. As Tabelas 3.7 e 3.8 indicam tal processo, assim como os resultados obtidos, respectivamente para os efeitos principais e efeitos de dois fatores.

Tabela 3.7: Efeitos confundidos com os efeitos principais.

Efeito Principal	Geratriz	Produto: Efeito Principal x Geratriz	Efeito Confundido
A	ABCD	A^2BCD	BCD
B	ABCD	AB^2CD	ACD
C	ABCD	ABC^2D	ABD
D	ABCD	$ABCD^2$	ABC

Tabela 3.8: Efeitos confundidos com os efeitos da interação entre dois fatores.

Efeito da Interação entre Dois Fatores	Geratriz	Produto: Efeito entre Dois Fatores x Geratriz	Efeito Confundido
AB	ABCD	A^2B^2CD	CD
AC	ABCD	A^2BC^2D	BD
AD	ABCD	A^2BCD^2	BC
BC	ABCD	AB^2C^2D	AD

Como existe uma única fonte de variabilidade não é necessário determinar algum arranjo para esta. Dessa forma o arranjo cruzado irá consistir num arranjo interno 2^{4-1} e o arranjo externo será constituído pelos dois níveis da fonte de variabilidade em questão, tendo-se dessa forma um total de dezesseis. A Tabela 3.9 mostra resumidamente o planejamento experimental adotado.

Estes ensaios devem ser realizados de forma aleatória não devendo necessariamente seguir a ordem indicada na tabela abaixo.

As etapas seguintes nas diretrizes dadas pela Tabela 3.2 (5, 6 e 7) estão relacionadas aos resultados obtidos nos ensaios, que serão abordados no próximo capítulo.

Tabela 3.9: Planejamento experimental adotado.

					Arranjo Externo		
					E	+	-
Arranjo Interno							
Ensaio	A	B	C	D			
1 e 2	-	-	-	-			
3 e 4	+	-	-	+			
5 e 6	-	+	-	+			
7 e 8	+	+	-	-			
9 e 10	-	-	+	+			
11 e 12	+	-	+	-			
13 e 14	-	+	+	-			
15 e 16	+	+	+	+			

3.4 Aplicações em virabrequins

Virabrequins apresentam uma geometria cuja superfície apresenta características tri-dimensionais. Dessa forma, o sistema de medição ESPI deverá detectar os deslocamentos em todas as três direções para que as tensões na superfície possam ser obtidas, considerando-se um modelo de estado plano de tensões. As transformações de coordenadas das superfícies tri-dimensionais através do mapeamento do perfil da superfície permitem tal análise. Assim, em relação ao processo de medição em superfícies planas, para as superfícies tri-dimensionais uma etapa é acrescida ao processo.

O problema continua o mesmo, consistindo em se determinar uma metodologia de medição de tensões utilizando o sistema ESPI, de forma que esta seja robusta em relação aos fatores que a influenciam.

Analogamente ao caso anterior, tem-se como variáveis de resposta os mapas de tensões e de deslocamentos. No entanto, neste caso tem-se mais uma componente de deslocamento – direção z – que não existia na análise para placas planas.

A princípio, os fatores controláveis assim como as fontes de variabilidade são os mesmos listados para o caso da placa plana, mostrados nas Tabelas 3.3 e 3.4. Apesar disso, devido a medição dos perfis das superfícies, mais alguns fatores podem ser incluídos. Estes e suas respectivas classificações encontram-se na Tabela 3.10. São apresentados dois fatores controláveis que, apesar de poderem ter alguma influência no processo de medição, são mantidos constantes, de forma que teremos os mesmos fatores de influência e a mesma fonte de variabilidade definidos para o caso da placa plana.

Tabela 3.10: Fatores controláveis relacionados à medição do perfil da superfície do virabrequim.

	Procedência	Fator	Classificação
1	Medição do	Deslocamento inicial da fonte de iluminação	MC
2	Perfil da Superfície	Deslocamento em cada passo de medição	MC

Baseando-se na análise dos resultados obtidos para a placa plana com fenda, que serão detalhados no capítulo seguinte, pode-se descartar alguns fatores de influência, definindo-se níveis fixos para tais fatores. Mesmo assim, manteve-se o fator tipo de medição, única ou em série, tendo-se agora mais um nível para tal variável. O tipo de medição, neste caso, está diretamente ligado ao nível de tensões. Três níveis serão analisados. Além disso, a suavização dos resultados também será analisada em dois níveis. A Tabela 3.11 mostra um resumo dos fatores de influência e seus respectivos níveis.

Tabela 3.11: Fatores de influência e respectivos níveis para a medição no virabrequim.

		Níveis		
Fator de Influência		Baixo	Médio	Alto
A	Tipo de medição (nível de tensão)	Única	Dois passos	Três passos
B	Suavização	Pouca (2 vezes)	-	Muita (10 vezes)

Conforme a Tabela 3.11, existem dois fatores de influência, sendo um deles em três níveis e o outro deles em dois níveis, um planejamento fatorial completo para este caso daria um total de seis experimentos. Assim sendo, é possível realizar réplicas mantendo-se uma quantidade razoável de ensaios. Serão então realizadas três réplicas para cada uma das possíveis combinações tendo-se um total de dezoito ensaios. Os ensaios a serem realizados e seus respectivos níveis encontram-se listados na Tabela 3.12.

Tabela 3.12: Planejamento experimental adotado para o virabrequim.

Ensaio	Níveis dos Fatores	
	A	B
1, 2, 3	Baixo	Baixo
4, 5, 6	Baixo	Alto
7, 8, 9	Médio	Baixo
10, 11, 12	Médio	Alto
13, 14, 15	Alto	Baixo
16, 17, 18	Alto	Alto

4 Resultados e Discussões

Neste capítulo, os resultados obtidos para os respectivos planejamentos experimentais propostos, para placa plana e virabrequim, serão analisados. Tais análises buscam identificar a influência dos parâmetros nos resultados obtidos através do método ESPI. Além disso, é possível avaliar as condições nas quais estes resultados possam ser melhor avaliados, ou seja, menos influenciados.

4.1 Placa Plana

Os resultados obtidos para a placa plana com fenda podem ser divididos basicamente em duas partes, sendo uma delas experimental e a outra numérica. A análise experimental, por sua vez, pode ser dividida em duas etapas: análise experimental inicial (extensômetro) e análise experimental propriamente dita (ESPI). Para cada um dos métodos de análise, buscou-se manter as mesmas condições de contorno, de modo que os resultados pudessem ser comparados.

4.1.1 Análise experimental inicial (extensômetro)

Na primeira etapa da análise experimental utilizou-se um extensômetro na região de abertura da fenda, como ilustra a Figura 4.1. Nota-se que a área que o extensômetro ocupa na peça é de aproximadamente $2 \times 4,5 \text{ mm}$. Esta análise foi realizada em três níveis de tensão. Os resultados foram diretamente comparados com os resultados obtidos através do sistema ESPI. Para o primeiro nível de tensão foram realizados cinco ensaios, enquanto que para cada um dos

outros dois níveis apenas um ensaio foi realizado. A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos com cada um dos métodos e os respectivos níveis de tensão.

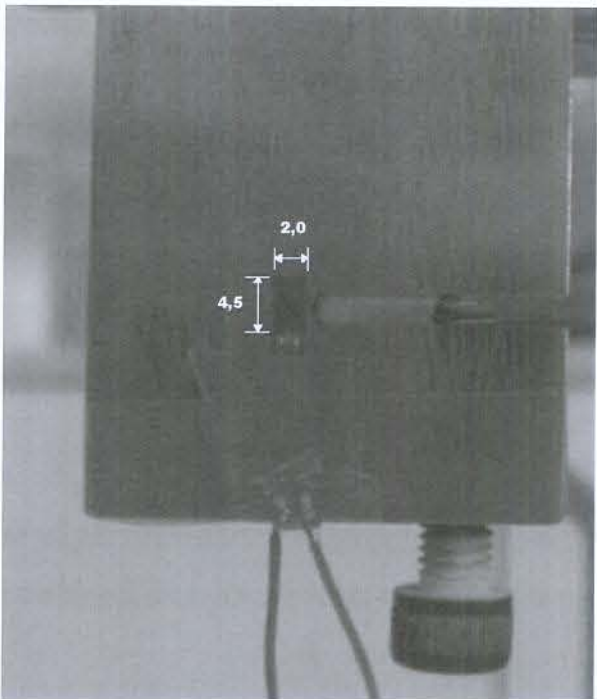


Figura 4.1: Região e área ocupada pelo extensômetro na peça.

Tabela 4.1: Resultados obtidos para os três níveis de tensão. Valores em MPa.

	Nível 1 – aprox. 7,5 MPa				
	1	2	3	4	5
Extensômetro	7,442	6,815	7,333	7,496	7,488
ESPI	7,255	7,911	8,051	7,998	7,923

	Nível 2 – aprox 17,5 MPa	Nível 3 – aprox 30 MPa
Extensômetro	17,719	28,922
ESPI	17,410	29,130

Os resultados obtidos para o nível de tensão de 7,5 MPa, no caso do extensômetro a média dos resultados foi de 7,3 MPa tendo um desvio padrão de 0,3 MPa, já para o ESPI obteve-se um resultado médio de 7,8 MPa obtendo-se um desvio padrão de 0,3 MPa. Assim os resultados mostraram uma diferença média de 6,5%. Para os segundo e terceiro níveis as diferenças foram de 1,74% e 0,71%, respectivamente. Nota-se que em níveis de tensões mais elevados a concordância entre os resultados torna-se mais expressiva, provavelmente devido à menor

resolução dos sistemas nos extremos de sua faixa de medição. Para obtenção do segundo e terceiro níveis de tensão utilizando o método ESPI, a medição teve de ser realizada em duas e três etapas, respectivamente, ou seja, aplicando-se metade da carga em uma medição e a outra metade na segunda medição, para o caso do segundo nível. Este tipo de medição, em etapas, aparentemente tende a melhorar a concordância entre os resultados obtidos utilizando-se extensômetros e o ESPI. É importante ressaltar também que o resultado do extensômetro é dado para uma determinada área correspondente à região que este ocupa. Para efeito de comparação entre os resultados, optou-se por utilizar a ferramenta *gauge* do software de apoio para o ESPI (Istra) e determinar os valores médios apresentados numa região de área similar àquela ocupada pelo extensômetro.

Apesar de tal análise estar restrita a uma determinada região do elemento analisado, o procedimento pode ser utilizado para validar os resultados através do método ESPI, uma vez que o uso de extensômetros é um método consagrado para a medição de tensões.

4.1.2 Simulação do carregamento

Baseando-se nas configurações em que as medidas foram realizadas, simulações utilizando um programa comercial de elementos finitos foram realizadas para estabelecer uma segunda base de comparação. O modelo da placa foi desenhado utilizando o programa Pro-Engineer Wildfire 2.0[®] e a simulação com o programa Mechanica[®], um módulo do Pro-Engineer. Os elementos utilizados pelo programa são polinomiais, podendo atingir até ordem nove.

As condições de contorno utilizadas durante a simulação tentaram se aproximar ao máximo da situação real. Na parte superior, onde se localizam os furos de fixação, foi criada uma superfície de simulação correspondente à pequena placa metálica utilizada para fixação da placa ao suporte. Nesta superfície restringiu-se o movimento em todos os eixos. A aplicação da carga foi simulada como sendo uma carga distribuída na região que seria ocupada pelo parafuso. Foram realizadas simulações apenas para um dos níveis de carga, uma vez que por considerar-se que toda a peça encontra-se sendo solicitada no regime elástico, o campo de tensões deve se manter inalterado qualitativamente, alternando-se apenas as magnitudes das tensões de acordo com a

força aplicada. O nível de carga determinado foi de $200N$ distribuídos na superfície. A Figura 4.2 apresenta as condições na simulação. Baseando-se em tais configurações obteve-se os resultados para os deslocamentos nas direções x e y na Figura 4.3 e para as tensões equivalentes de Von Mises como apresenta a Figura 4.4.

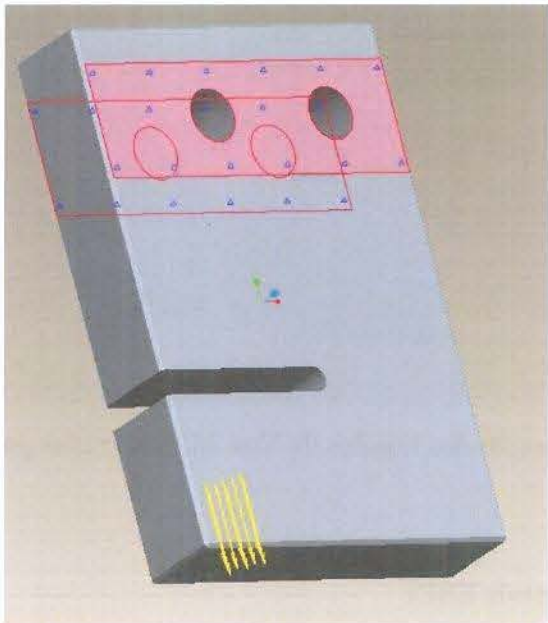


Figura 4.2: Condições de contorno para a simulação.



Figura 4.3: Deslocamentos nas direções x e y .

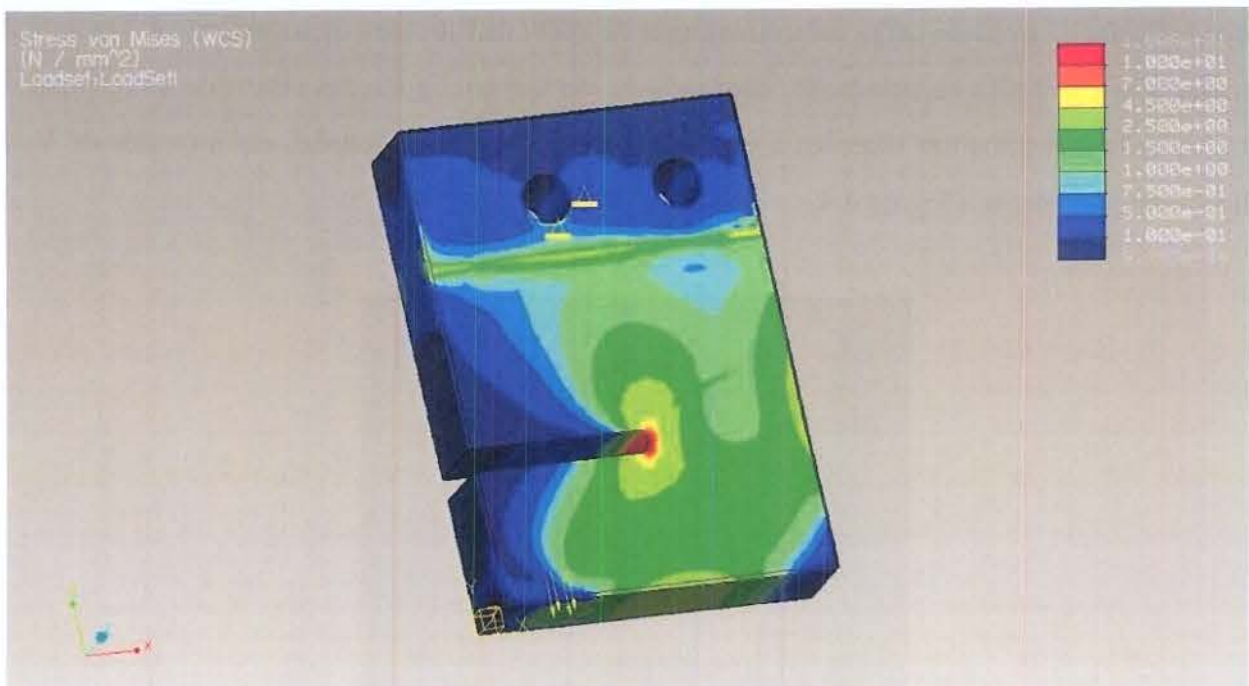


Figura 4.4: Distribuição das tensões de Von Mises obtidas para carga de 200N.

4.1.3 Resultados experimentais ESPI

Inicialmente deve-se ressaltar que a sequência de ensaios a ser seguida deveria ser aleatorizada, evitando assim problemas com as medições. A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos para a aleatorização, assim como os respectivos níveis de cada uma das variáveis.

A metodologia de Taguchi pode ser empregada quando se deseja minimizar a variabilidade em torno de um valor nominal, ou seja, quando se deseja que as medições sejam pouco afetadas pelos fatores que podem influenciar os resultados. Num primeiro momento, foi utilizado o planejamento meia fração, com ênfase na análise dos efeitos das variáveis de influência. Após essa análise inicial, procedeu-se a análise de Taguchi, onde é possível obter um conjunto de níveis de variáveis de influência e fontes de variabilidade para os quais a variabilidade dos resultados é mínima.

Tabela 4.2: Aleatorização dos ensaios e respectivos níveis das variáveis.

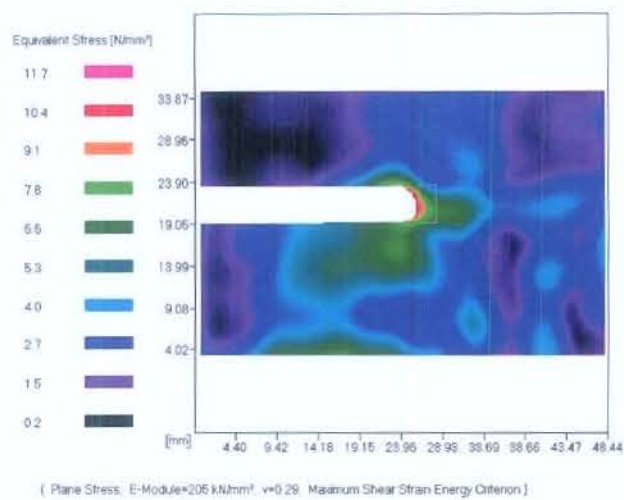
Aleatorização	Ensaio	A	B	C	D	E
1	10	+	-	-	+	-
2	6	+	-	+	-	+
3	15	-	+	+	-	-
4	13	-	-	+	+	-
5	3	-	+	-	+	+
6	9	-	-	-	-	-
7	5	-	-	+	+	+
8	16	+	+	+	+	-
9	12	+	+	-	-	-
10	1	-	-	-	-	+
11	2	+	-	-	+	+
12	11	-	+	-	+	-
13	7	-	+	+	-	+
14	4	+	+	-	-	+
15	8	+	+	+	+	+
16	14	+	-	+	-	-

a) Análise do planejamento meia fração

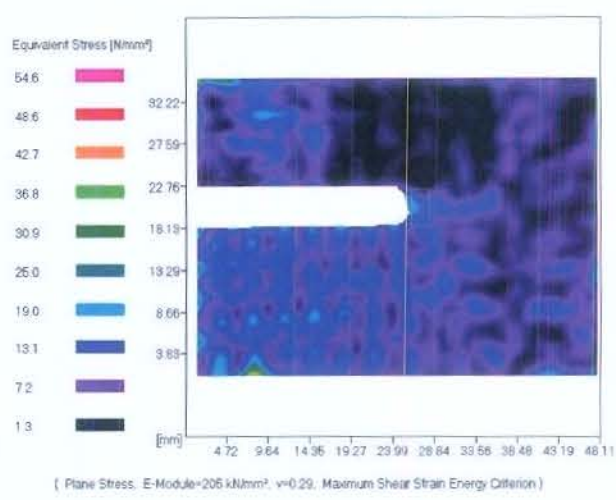
Num primeiro momento, utilizando o planejamento fração meia é possível determinar a influência de alguns dos fatores e suas combinações. Para isso deve-se determinar uma variável de resposta a ser analisada. Como no caso do ESPI tem-se um mapa de tensões, é interessante analisar o valor médio de uma determinada região de interesse como variável de resposta. Além disso, a análise de outras regiões para efeito de comparação com o método dos elementos finitos também seria interessante. No entanto, por fins de simplicidade, a análise será realizada apenas na região próxima a abertura da fenda, a mesma onde se encontra o extensômetro, sendo que o mapa de cada um dos resultados pode ser avaliado qualitativamente, comparando-se com o obtido pelo método de elementos finitos.

A Figura 4.5 mostra os resultados obtidos das tensões equivalentes de Von Mises para os ensaios realizados. O resultado que se deseja avaliar em cada uma das figuras é indicado pelo retângulo em azul, na mesma região onde se encontra o extensômetro da Figura 4.1. A ordem

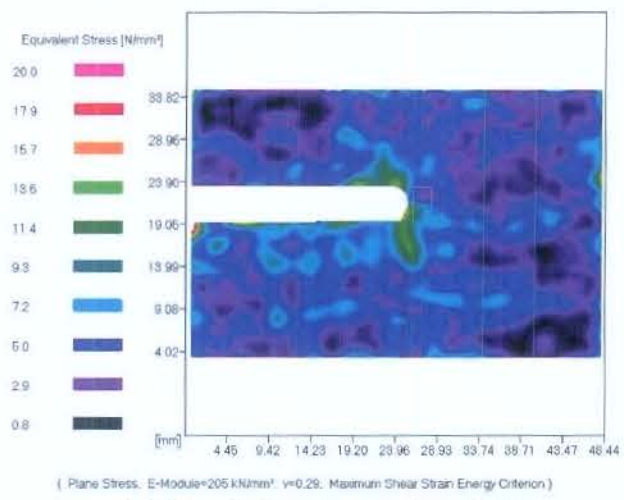
apresentada na Figura 4.5 corresponde aos ensaios sugeridos na Tabela 3.9, ou seja, o item (a) corresponde a Ensaio 1 – Aleatorização 10 e assim por diante.



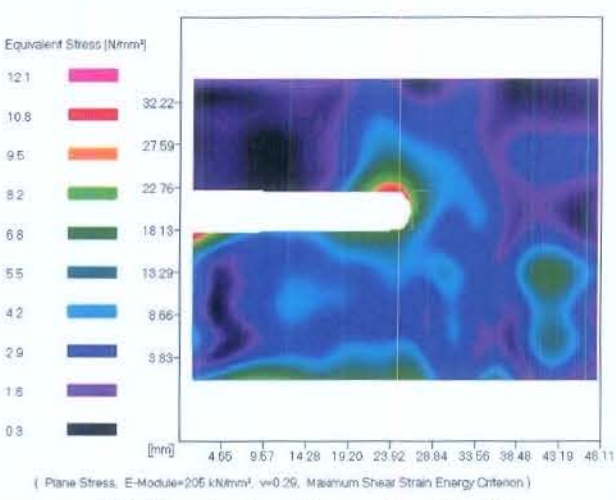
(a) Ensaio 1 – Aleatorização 10



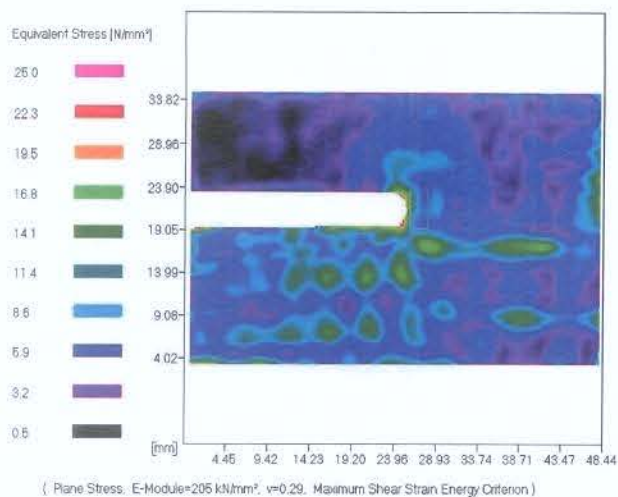
(b) Ensaio 2 – Aleatorização 11



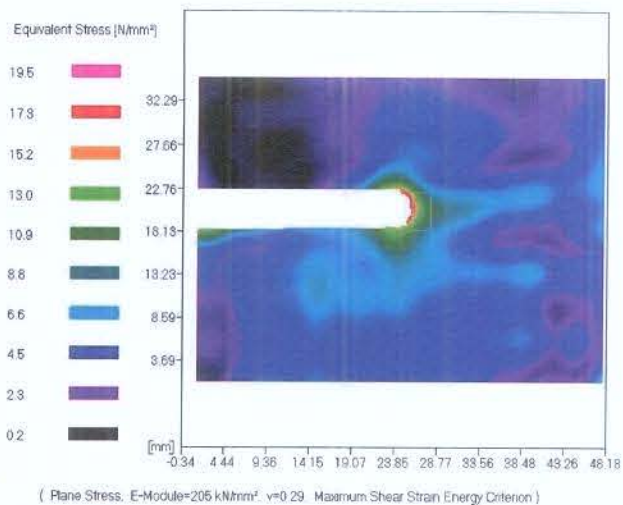
(c) Ensaio 3 – Aleatorização 5



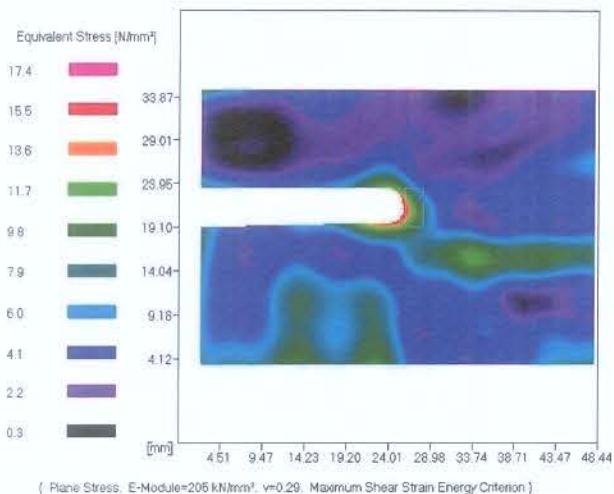
(d) Ensaio 4 – Aleatorização 14



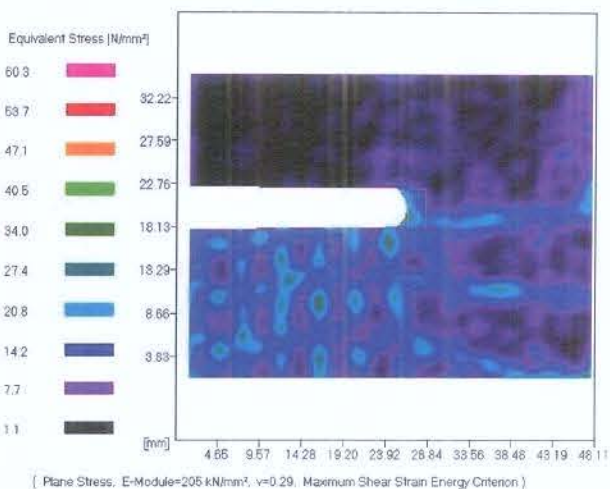
(e) Ensaio 5 – Aleatorização 7



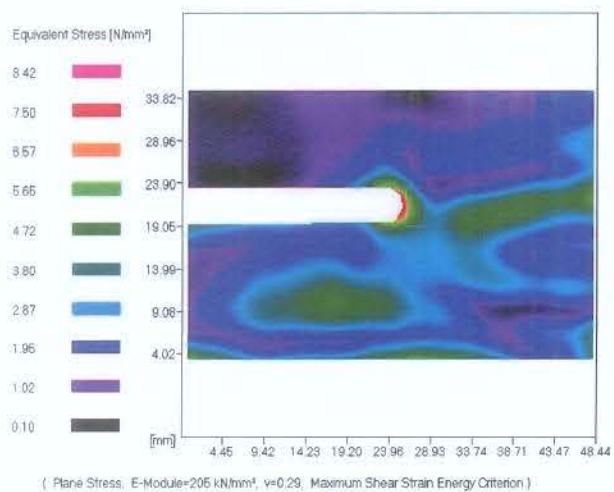
(f) Ensaio 6 – Aleatorização 2



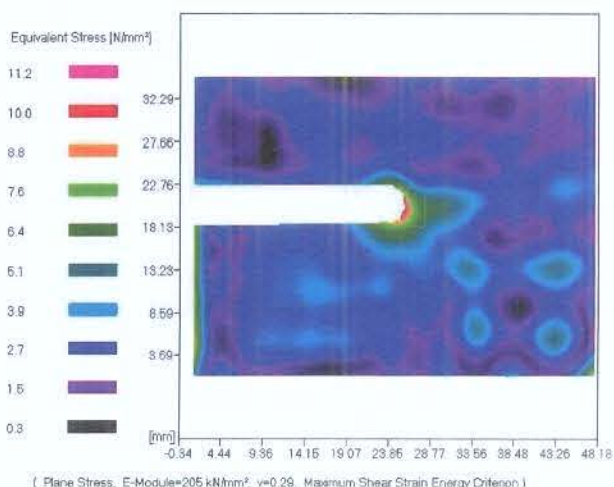
(g) Ensaio 7 – Aleatorização 13



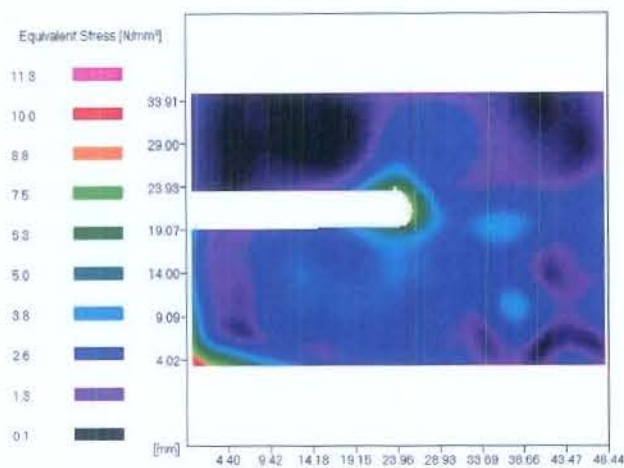
(h) Ensaio 8 – Aleatorização 15



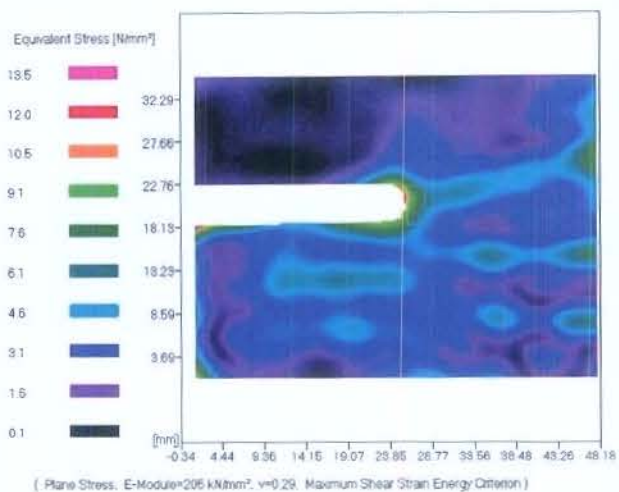
(i) Ensaio 9 – Aleatorização 6



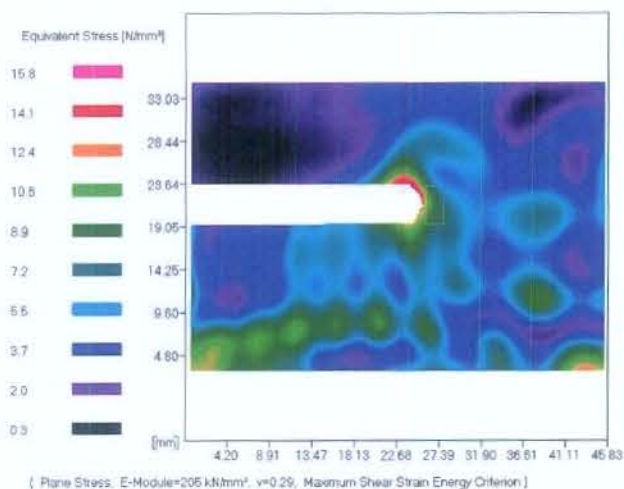
(j) Ensaio 10 – Aleatorização 1



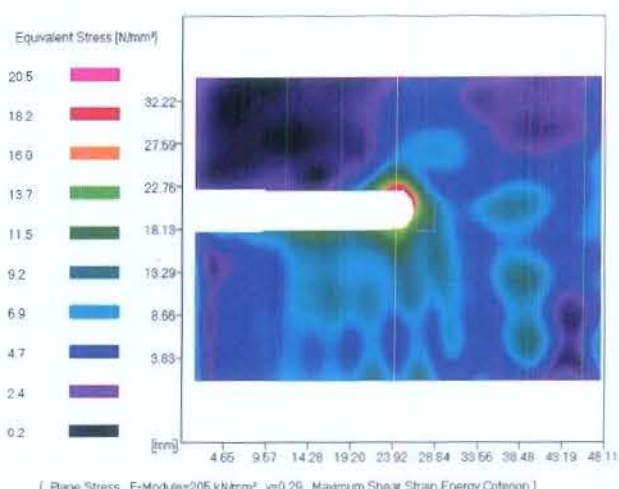
(k) Ensaio 11 – Aleatorização 12



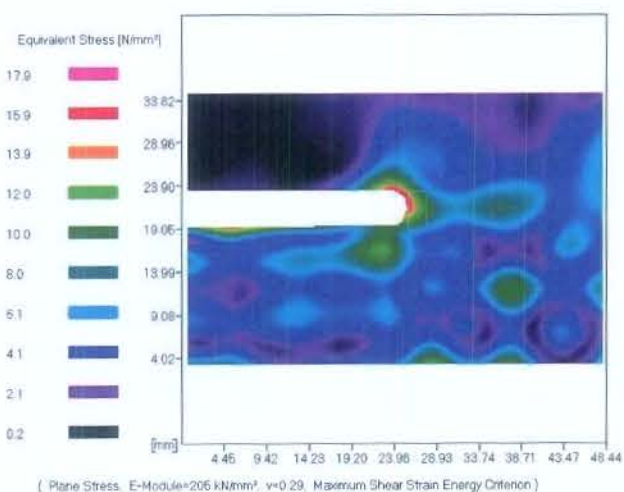
(l) Ensaio 12 – Aleatorização 9



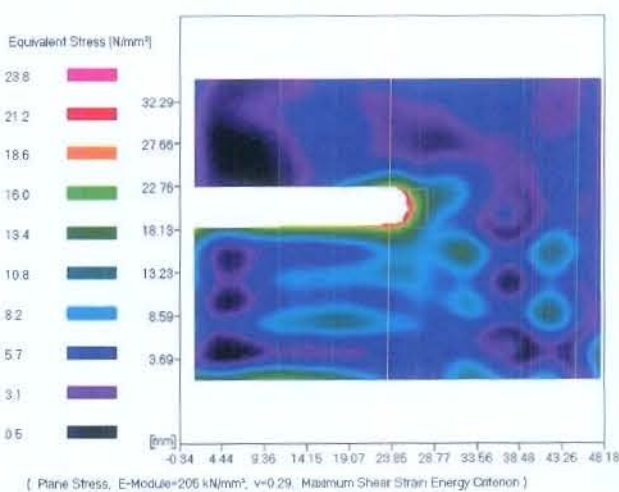
(m) Ensaio 13 – Aleatorização 4



(n) Ensaio 14 – Aleatorização 16



(o) Ensaio 15 – Aleatorização 3



(p) Ensaio 16 – Aleatorização 8

Figura 4.5: Resultados experimentais ESPI.

A Tabela 4.3 apresenta os valores médios das tensões de Von Mises relativos aos quadros azuis em cada um dos resultados obtidos na Figura 4.4. Além disso, mostra também os deslocamentos máximos nas direções x e y . Mostra ainda os valores das tensões de Von Mises normalizadas, sendo estas últimas as utilizadas para análise dos resultados experimentais.

Tabela 4.3: Resultados para deslocamentos máximos nas direções x e y (dx_{max} e dy_{max}). Valores médios das tensões de Von Mises ($\bar{\sigma}_{vm}$). Tensões de Von Mises normalizadas (σ_{vm}).

Ensaio	Aleatorização	dx_{max}	dy_{max}	$\bar{\sigma}_{vm}$ [MPa]	σ_{vm} [MPa]
1	10	1,330	-3,060	7,809	8,5
2	11	1,940	-3,350	11,540	9,3
3	5	1,060	-2,490	6,032	6,9
4	14	1,120	-2,368	7,554	6,6
5	7	2,420	-4,830	12,881	13,4
6	2	2,490	-4,710	13,050	13,1
7	13	2,300	-4,270	11,010	11,8
8	15	2,640	-5,330	17,290	14,8
9	6	1,070	-2,145	4,877	5,9
10	1	1,030	-2,475	7,561	6,9
11	12	1,300	-2,426	5,849	6,7
12	9	1,530	-2,840	8,017	7,9
13	4	2,320	-4,530	9,858	12,6
14	16	2,640	-5,470	14,130	15,2
15	3	2,040	-4,030	11,180	11,2
16	8	2,000	-4,020	12,610	11,1

Analisando-se a terceira e a quarta coluna da Tabela 4.3, assim como o modo de realização dos experimentos, nota-se que estes apresentam-se intrinsecamente variáveis, ou seja, como a carga a ser aplicada nas placas através do parafuso poderia influenciar na variação, em busca de se obter resultados significativos em relação ao planejamento experimental adotado, optou-se por normalizar as tensões obtidas em relação aos resultados obtidos para os deslocamentos. Por exemplo, os ensaios de 1 a 4 deveriam estar no mesmo nível de tensões, no entanto, a força aplicada em cada uma das medições era desconhecida, nota-se que houve uma dispersão considerável dos resultados obtidos para os deslocamentos em ambas as direções x e y . A normalização citada, corresponde a uma maneira de se obter as tensões mantendo-se o mesmo nível de força aplicada entre os ensaios, sendo os resultados nivelados pelos obtidos através dos

deslocamentos em y . A normalização é obtida baseando-se na proporcionalidade existente entre as relações deslocamento e tensão. A tensão normalizada referente ao ensaio i é dada pela Equação 4.1, onde n é o número total de ensaios igual a 16. A análise experimental será baseada nos dados da última coluna da Tabela 4.3, correspondentes as tensões normalizadas.

$$\sigma_i = \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^n \frac{\sigma_j}{d_{y_j}} \right) \right] d_{y_i} \tag{4.1}$$

Inicialmente realizou-se uma estimativa dos efeitos de cada uma das variáveis [A], [B], [C], [D]. Foi feita também uma estimativa para as interações entre os efeitos dadas por [AB], [AC] e [AD]. O equacionamento de tais estimativas encontra-se no Apêndice A.1. Os resultados relativos a tais estimativas encontram-se resumidos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Estimativas dos efeitos dos parâmetros combinados.

Efeito	Estimativa	Combinação real devido ao planejamento fracionário
[A]	-0,9688	A + BCD
[B]	5,5563	B + ACD
[C]	-0,8565	C + ABD
[D]	-1,4580	D + ABC
[AB]	-0,3409	AB + CD
[AC]	0,0651	AC + BD
[AD]	0,1012	AD + BC

Dessa primeira análise, nota-se que o efeito causado por B , que trata dos níveis de tensão, é importante quando comparado aos demais. Como um segundo fator tem-se também o efeito D , cuja estimativa de influência é mais elevada que a dos demais. Nenhuma das interações entre duas variáveis (AB , AC ou AD) mostra-se expressiva nas estimativas obtidas quando comparadas aos efeitos das variáveis sozinhas. A análise a seguir permite tratar com mais rigor estes efeitos.

Realizando-se uma análise de variâncias (ANOVA), têm-se os resultados para as somas de quadrados para os efeitos, assim como as médias quadradas que correspondem à razão entre a soma de quadrados. Por fim, tem-se o estimador F_0 , de onde pode-se determinar o p -value, que é

a probabilidade de ocorrência. Tais definições encontram-se detalhadas no Apêndice A.2. Os resultados para tal análise encontram-se listados na Tabela 4.5.

Analisando-se os resultados dos estimadores F_0 , pode-se perceber que o fator que causa maior influência nos resultados é o nível de tensões avaliado, tendo um p -value de 0,001% e já que quanto menor o valor desta variável maior a probabilidade da hipótese nula ser rejeitada evidenciando assim que o nível de tensões realmente influencia os resultados. Em seguida nota-se a também a influência da suavização nos resultados com um p -value de 2,6%. Os outros fatores, assim como a combinação de dois fatores, não mostraram resultados expressivos de influência nos resultados.

Tabela 4.5: Resultados para a análise de variâncias.

Efeito	Soma de Quadrados (SS)	Graus de Liberdade (DOF)	Médias Quadráticas (MS)	Estimador F_0	p -value
A	3,7542	1	3,7542	3,2560	0,10881
B	123,4907	1	123,4907	107,1035	0,00001
C	2,9345	1	2,9345	2,5451	0,14930
D	8,5034	1	8,5034	7,3750	0,02642
AB	0,4650	1	0,4650	0,4033	0,54313
AC	0,0170	1	0,0170	0,0147	0,90642
AD	0,0409	1	0,0409	0,0355	0,85522
TOTAL	148,4298	15	9,8953		
ERRO	9,2240	8	1,1530		

O efeito A está relacionado à distância da câmera CCD ao objeto. Apesar desta grandeza influenciar no tamanho dos *speckles* e, por consequência, na medição em si, esperava-se que a variação dessa grandeza influenciasse nos resultados. No entanto, apesar de apresentar alguma influência, outros fatores mostraram maiores efeitos sobre os resultados finais.

Semelhantemente ao caso do efeito A, o efeito C (ganho na imagem) que está diretamente relacionado à sensibilidade do processo de medição, apresentou pouca influência nos resultados, sendo que a influência de outros fatores mostrou-se maior.

Já o efeito B que está relacionado ao nível de tensões avaliado, depende diretamente da quantidade de passos em que a medição é realizada. Esse fator mostrou uma influência bem

elevada nos resultados. Isto pode ter ocorrido devido ao método de medição com mais de um passo utilizar a superposição dos resultados. Em função de seu uso, os erros de medição podem aumentar ou diminuir.

O efeito D trata da suavização dos resultados obtidos. Além da influência demonstrada nos resultados para o estimador F_0 , pode-se notar qualitativamente nos resultados apresentados na Figura 4.5 que quando se realiza um número maior de suavizações, o aspecto de distribuição de tensões parece se aproximar mais dos resultados obtidos através dos métodos de elementos finitos. A partir da análise de variâncias pode-se perceber ainda que a suavização apresenta grande influência nos resultados. Isso pode ser explicado pelo fato de que o procedimento de suavizações implicar em interpolações entre conjuntos de *speckles*, ou seja, a suavização seguinte depende da suavização anterior. Quanto mais suavizações são aplicadas, os resultados tendem a convergir para um determinado valor. No caso do MEF, o procedimento de suavização está relacionado ao tamanho do elemento e ao tipo de interpolação interna.

Apesar dos efeitos A e D terem apresentado certa influência nos resultados, observou-se que estes não apresentavam influência significativa quando combinados. Além disso, nenhuma outra combinação apresentou.

b) Análise do planejamento proposto (Taguchi)

Dando seqüência a análise proposta, buscou-se obter os níveis das variáveis onde há menor variabilidade dos resultados, através da metodologia de Taguchi. Tal análise baseia-se na obtenção de médias e desvios padrões, cuja razão define uma grandeza proporcional a estas, denominada relação sinal-ruído. Através dessa relação pode-se buscar certos objetivos, dentre eles o de diminuir a variabilidade entre os experimentos. A relação sinal-ruído utilizada nesse caso é dada pela Equação 4.2, onde $\bar{y}$ é a média dos resultados para cada ensaio do arranjo interno e S é o desvio padrão desses valores. A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos a partir de tal análise. Os desenvolvimentos encontram-se detalhados no Apêndice A.3.

$$SN_T = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \tag{4.2}$$

Os resultados que apresentam menor variabilidade são aqueles que apresentam os menores valores para o desvio padrão (*S*) e também os maiores valores da relação sinal-ruído (*SN_T*). Analisando-se a Tabela 4.6, nota-se que a combinação onde os efeitos A, B, C e D encontram-se em seus níveis elevados (+), obtém-se tanto o menor desvio padrão como a maior relação sinal ruído, evidenciando assim que esta seria a combinação onde haveria uma menor variabilidade nos resultados.

Tabela 4.6: Resultados para análise pela metodologia de Taguchi.

				E				
A	B	C	D	+	-	$\bar{y}$	<i>S</i>	<i>SN_T</i>
-	-	-	-	8,482	9,286	8,884	0,5684	23,879
+	-	-	+	6,902	6,564	6,733	0,2391	28,992
-	+	-	+	13,388	13,056	13,222	0,2352	34,997
+	+	-	-	11,836	14,774	13,305	2,0776	16,129
-	-	+	+	5,946	6,861	6,403	0,6468	19,912
+	-	+	-	6,725	7,872	7,298	0,8115	19,079
-	+	+	-	12,557	15,162	13,860	1,8424	17,527
+	+	+	+	11,171	11,143	11,157	0,0196	55,106

Apesar da metodologia de Taguchi não avaliar as interações entre os efeitos de influência, o que por sua vez é uma das desvantagens do método, estas não se aplicam ao presente caso, uma vez que a análise anterior (ANOVA) mostrou que tais interações causam pouca influência nos resultados.

Assim sendo, dos resultados obtidos, pode-se então dizer que ao realizar os experimentos com os quatro fatores A, B, C e D em seus níveis máximos (+), tem-se uma redução na variabilidade dos experimentos, obtendo-se assim resultados mais confiáveis. É evidente que o nível de tensão, aqui considerado como a variável B, não está sob controle num processo de medição. No entanto, o procedimento mostrou que, ao menos para os níveis de tensão avaliados, o sistema é mais adequado para a medição de tensões em níveis maiores, o que é o esperado.

4.2 Virabrequim

Baseando-se nas análises preliminares realizadas para a placa plana, a análise dos resultados para o virabrequim torna-se um pouco mais simples, uma vez que a parte inicial de comparação dos resultados experimentais com outros métodos de medição com credibilidade nos resultados, e também com métodos numéricos, não precisa ser repetida. Dessa forma, tem-se a possibilidade de realizar mais ensaios para a análise propriamente dita dos fatores que influenciam a medição de tensões no virabrequim utilizando o método ESPI.

O planejamento experimental adotado para a análise experimental baseou-se nos resultados obtidos para a placa plana. Como os fatores de influência relacionados à distância da câmera ao objeto e o ganho na imagem afetaram pouco os resultados se comparados com a influência dos fatores relacionados ao nível de tensões utilizados e a suavização dos resultados, optou-se por manter aqueles em níveis constantes. Essa opção foi confirmada através da análise pelo procedimento de Taguchi, que mostrou uma menor variabilidade dos resultados ligada a estes fatores.

Seguindo a metodologia de planejamentos experimentais, a ordem dos ensaios a serem realizados, inclusive de suas réplicas, teve de ser aleatória. A Tabela 4.7 mostra como estes foram realizados.

Tabela 4.7: Aleatorização dos ensaios.

Aleatorização	Ensaio	A	B	Aleatorização	Ensaio	A	B
1	3	Baixo	Baixo	10	16	Alto	Alto
2	10	Médio	Alto	11	13	Alto	Baixo
3	5	Baixo	Alto	12	2	Baixo	Baixo
4	9	Médio	Baixo	13	1	Baixo	Baixo
5	14	Alto	Baixo	14	15	Alto	Baixo
6	7	Médio	Baixo	15	4	Baixo	Alto
7	17	Alto	Alto	16	8	Médio	Baixo
8	12	Médio	Alto	17	18	Alto	Alto
9	6	Baixo	Alto	18	11	Médio	Alto

A Figura 4.6 apresenta a distribuição das tensões equivalentes de Von Mises para o ensaio 1, sendo o resultado mostrado superposto à imagem da peça real. Nota-se ainda a presença de dois quadros, sendo que o menor corresponde a área de maiores tensões enquanto que o maior corresponde a área de menores tensões.

Já a Figura 4.7 mostra os resultados obtidos para as tensões equivalentes de Von Mises sem a superposição, ou seja, com maior nível de detalhamento dos resultados. Estas encontram-se organizadas pela ordem do ensaio e não da aleatorização, ou seja, a Figura 4.6a corresponde ao Ensaio 1, Aleatorização 13.

Seguindo-se a metodologia adotada anteriormente, inicialmente será realizada a análise de variância para o planejamento experimental, seguida da análise pelo método de Taguchi.

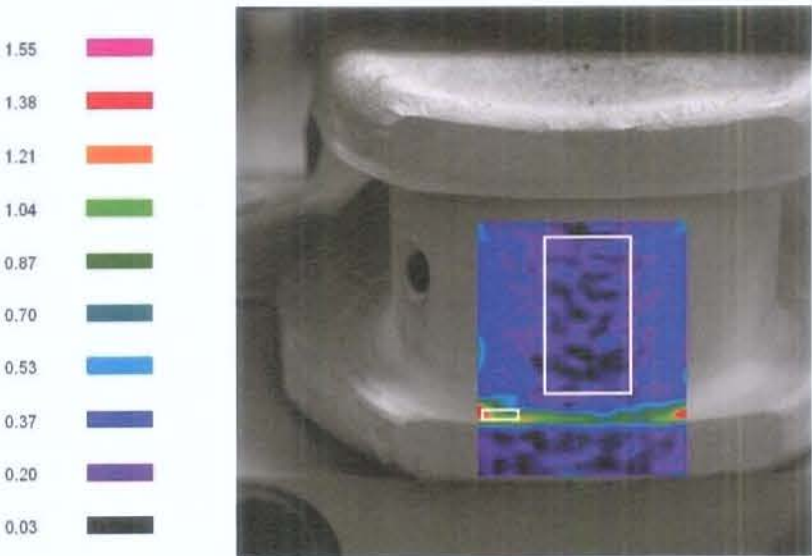
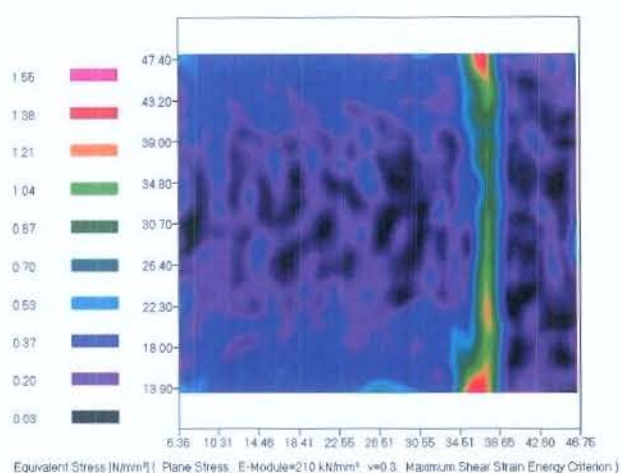
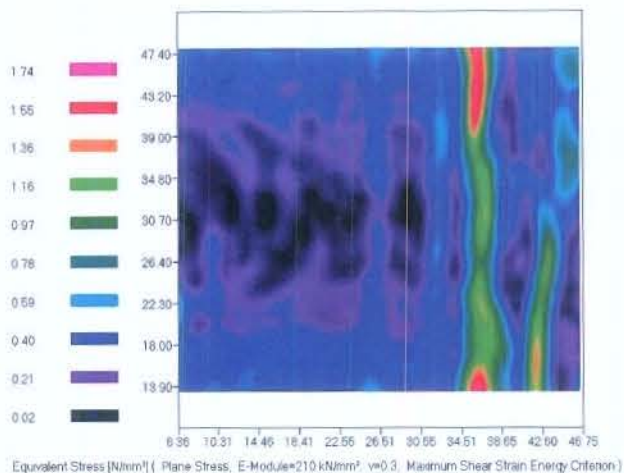


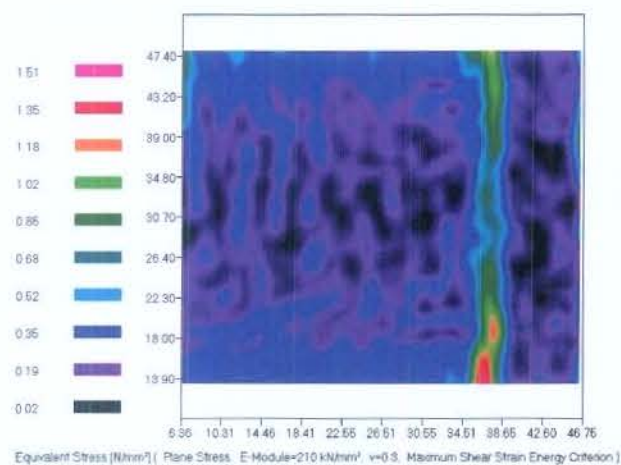
Figura 4.6: Regiões analisadas.



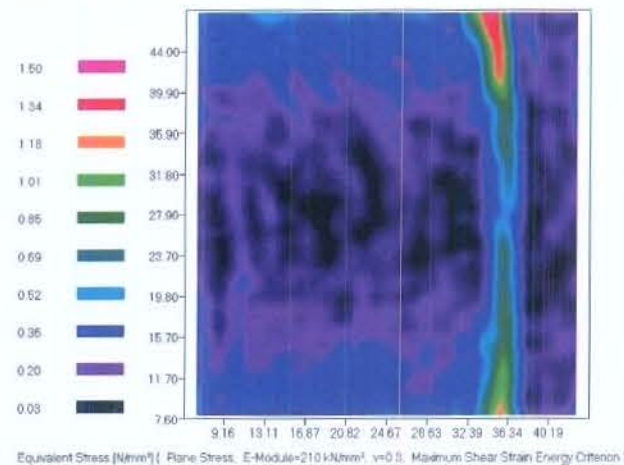
(a) Ensaio 1 – Aleatorização 13



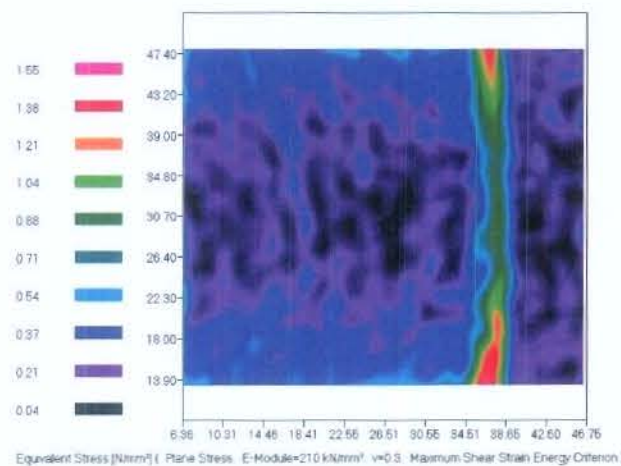
(b) Ensaio 2 – Aleatorização 12



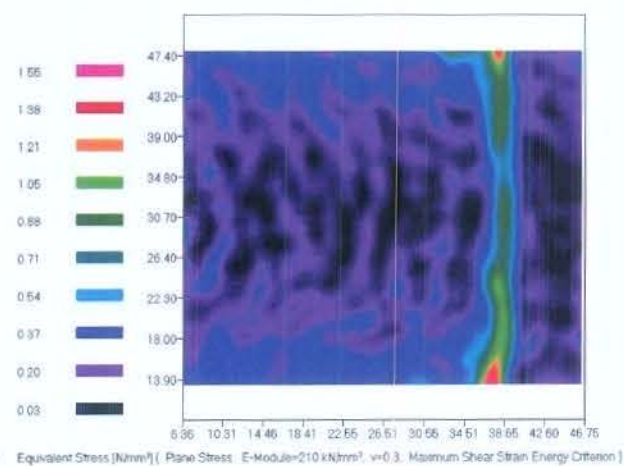
(c) Ensaio 3 – Aleatorização 1



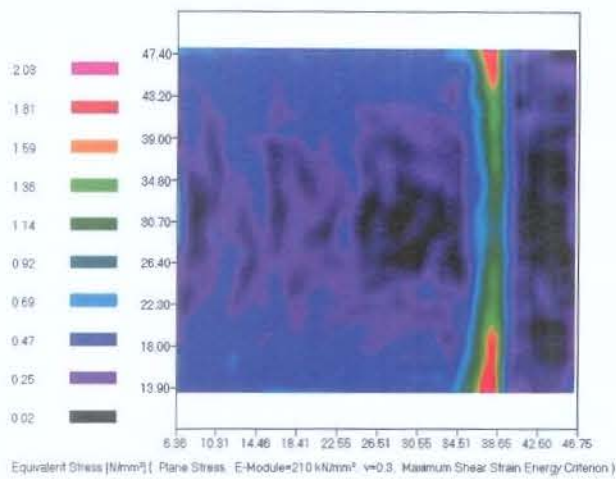
(d) Ensaio 4 – Aleatorização 15



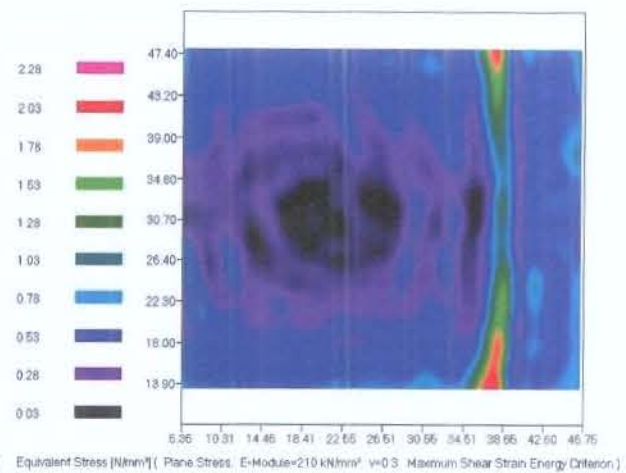
(e) Ensaio 5 – Aleatorização 3



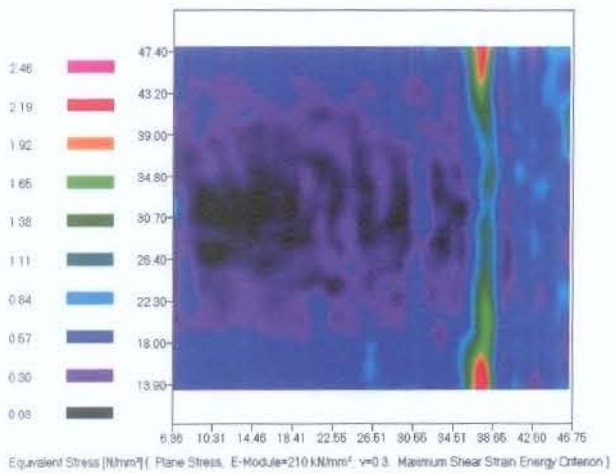
(f) Ensaio 6 – Aleatorização 9



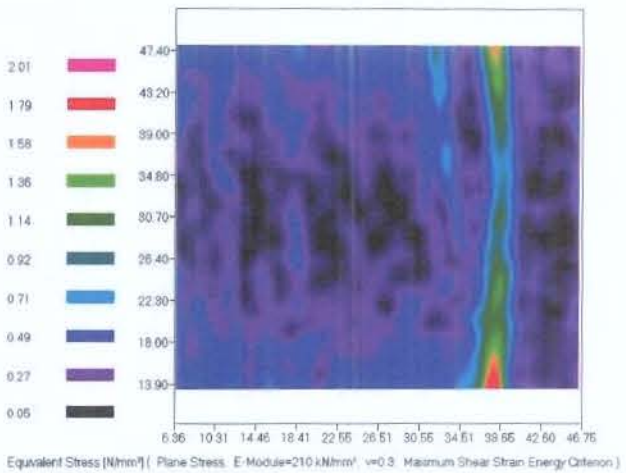
(g) Ensaio 7 – Aleatorização 6



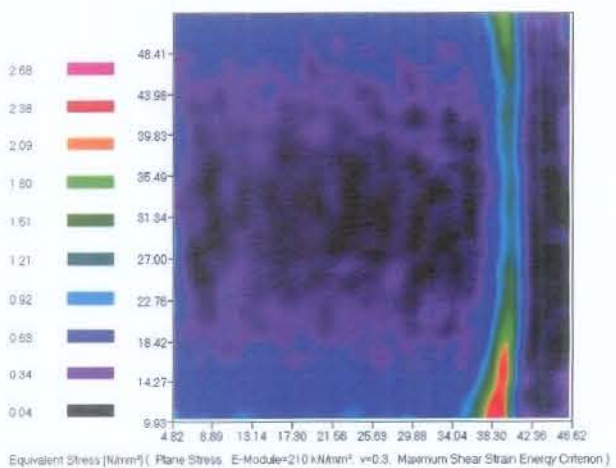
(h) Ensaio 8 – Aleatorização 16



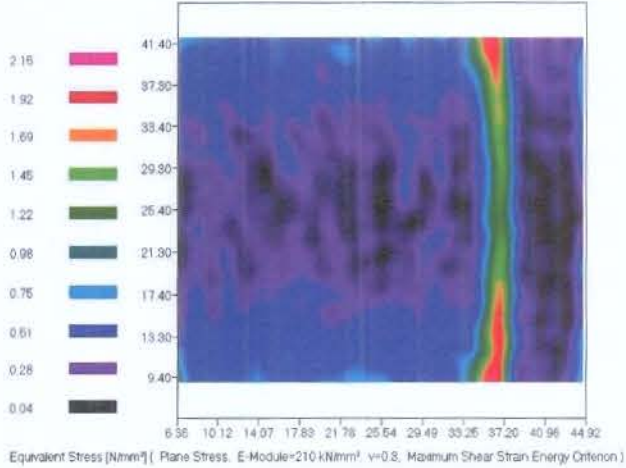
(i) Ensaio 9 – Aleatorização 4



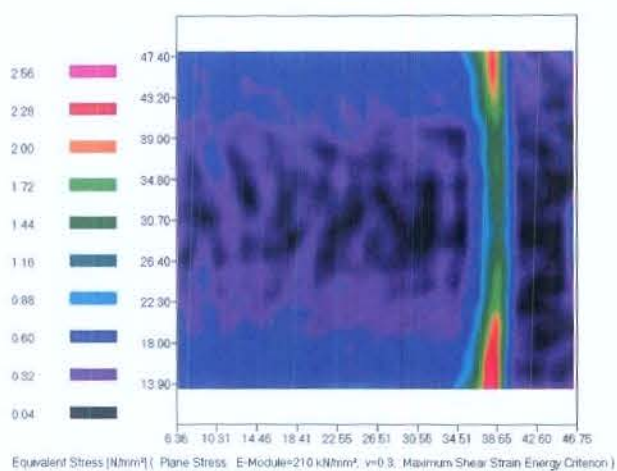
(j) Ensaio 10 – Aleatorização 2



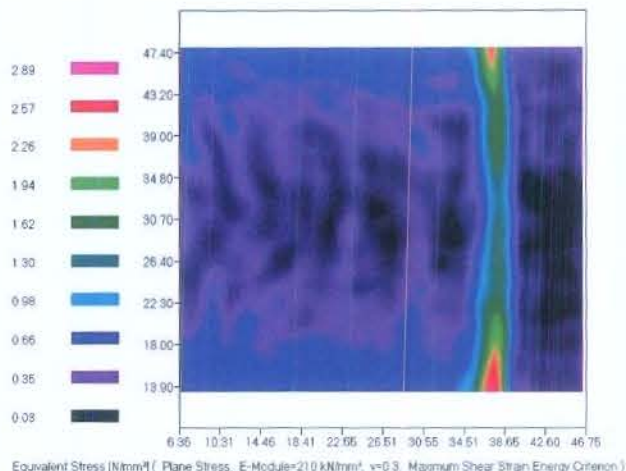
(k) Ensaio 11 – Aleatorização 18



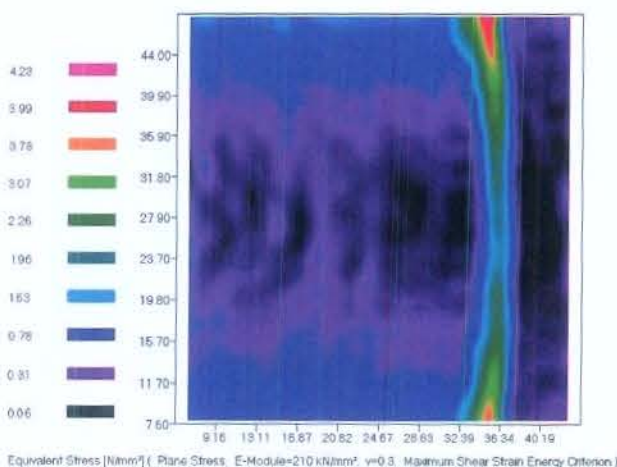
(l) Ensaio 12 – Aleatorização 8



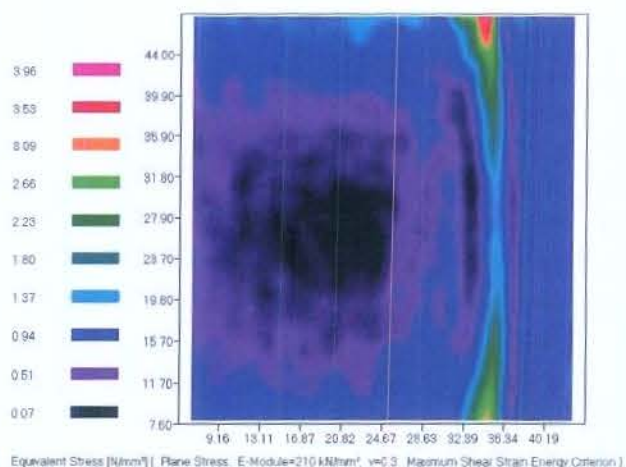
(m) Ensaio 13 – Aleatorização 11



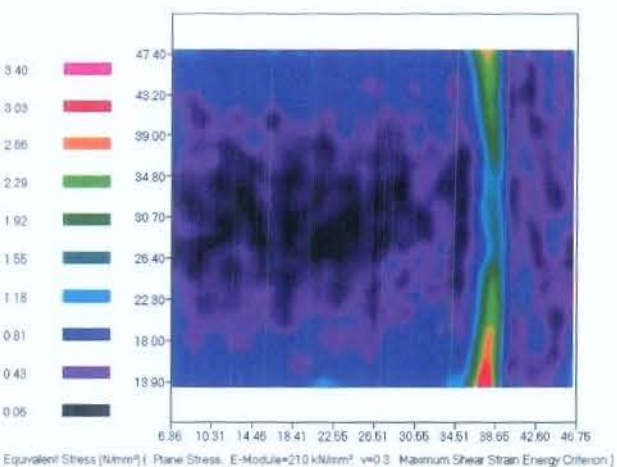
(n) Ensaio 14 – Aleatorização 5



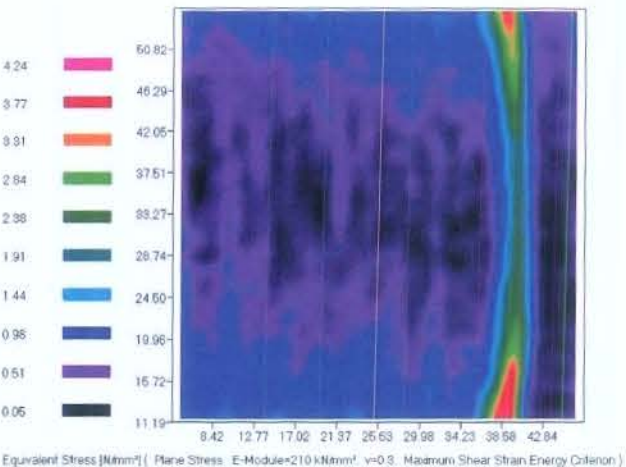
(o) Ensaio 15 – Aleatorização 14



(p) Ensaio 16 – Aleatorização 10



(q) Ensaio 17 – Aleatorização 7



(r) Ensaio 18 – Aleatorização 17

Figura 4.7: Resultados para as tensões equivalentes de Von Mises.

a) Análise de Variância

Num primeiro momento foi realizada a análise de variância baseada nos resultados de tensões máximos obtidos da Figura 4.7. Na Tabela 4.8 tem-se um resumo de tais valores, assim como os resultados para os deslocamentos máximos e mínimos nas direções x e z . Têm-se também as respectivas tensões relacionadas aos menores valores.

Tabela 4.8: Resultados para deslocamentos e tensões de Von Mises.

Ensaio	Aleato- rização	$dx_{\min}$	$dx_{\max}$	$dz_{\min}$	$dz_{\max}$	$\sigma_{VM} \text{ mín [MPa]}$	$\sigma_{VM} \text{ max [MPa]}$
1	13	-7,10	-5,93	1,22	3,32	0,173	1,091
2	12	-7,03	-5,88	1,18	3,30	0,194	1,143
3	1	-7,14	-5,98	0,98	3,08	0,168	1,112
4	15	-7,30	-6,13	1,20	3,30	0,126	0,753
5	3	-7,32	-5,96	1,19	3,30	0,174	1,242
6	9	-7,08	-5,93	1,23	3,34	0,151	0,991
7	6	-8,51	-6,99	1,64	4,43	0,219	1,623
8	16	-10,65	-8,90	1,88	5,08	0,241	1,689
9	4	-9,58	-7,91	1,81	4,77	0,228	1,812
10	2	-9,28	-7,77	1,60	4,40	0,225	1,374
11	18	-12,10	-10,10	2,11	5,71	0,223	1,805
12	8	-10,03	-8,39	1,75	4,73	0,255	1,764
13	11	-12,10	-10,10	2,16	5,77	0,251	1,954
14	5	-13,50	-11,30	2,36	6,38	0,252	2,196
15	14	-15,00	-12,50	2,71	7,21	0,281	2,429
16	10	-18,7	-15,60	3,30	8,81	0,364	2,033
17	7	-15,7	-13,10	2,76	7,39	0,302	2,550
18	17	-19,2	-16,00	3,31	9,13	0,408	2,814

Os locais indicados pelo quadro menor na Figura 4.6 são considerados os pontos críticos do virabrequim, ou seja, onde estão as maiores tensões medidas. A variável de resposta a ser analisada será a tensão equivalente de Von Mises máxima, dada pela última coluna da Tabela 4.8.

Da análise de variância (ANOVA) é possível obter os resultados para as somas de quadrados dos efeitos, as médias quadradas que correspondem a razão entre a soma de quadrados e por fim o estimador F_0 , que permite determinar o $p\text{-value}$. No Apêndice A.4 encontram-se os

desenvolvimentos para determinação de tais grandezas em maiores detalhes. A Tabela 4.9 apresenta um resumo de tais resultados.

Dos resultados obtidos para o estimador F_0 na penúltima coluna da Tabela 4.9, nota-se que o efeito A exerce uma influência muito maior nos resultados se comparado com os efeitos B e a combinação entre os dois. Além disso, o valor de p -value para o efeito A é muito baixo da ordem de 0,0003%.

Tabela 4.9: Resultados da análise de variâncias.

Efeito	Soma de Quadrados (SS)	Graus de Liberdade (DOF)	Médias Quadráticas (MS)	Estimador F_0	p -value
A	4,8701	2	2,4350	42,9072	$3,41 \times 10^{-6}$
B	0,0043	1	0,0043	0,07511	0,7887
AB	0,1343	2	0,0672	1,1834	0,3396
TOTAL	5,6897	17	0,3347		
ERRO	0,6810	12	0,0568		

Apesar de apresentar certa influência nos resultados, a suavização (efeito B), no caso dos experimentos no virabrequim, apresentou uma influência muito menor do que a obtida para a placa plana. Tal diminuição pode ter ocorrido por que a carga no virabrequim foi aplicada com o auxílio de uma máquina que permitiu que sua magnitude fosse melhor controlada, já que nesse caso havia uma célula de carga mostrando a carga aplicada. Um outro fator que pode ter contribuído para diminuição da variabilidade nos resultados em função da suavização pode estar relacionado ao sistema de fixação da peça e também a inércia da mesma, que é muito maior do que a da placa plana.

Em relação ao efeito do nível de tensões, ou seja, da quantidade de passos em que se realiza a medição, pode-se notar estes realmente apresentaram influência nos resultados, uma vez que tanto para o caso da placa plana quanto para o virabrequim este foi o efeito mais representativo entre todos os efeitos analisados.

Além disso, apesar de o efeito A ter uma grande influência, a combinação entre os efeitos A e B não mostrou muita influência nos resultados, ou seja, o efeito A isoladamente promove

variações significativas nos resultados. O efeito combinado de A e B, apesar de mostrar certa influência, é muito menos significativo quando comparado com o efeito de A sozinho.

b) Análise pela metodologia de Taguchi

A metodologia de Taguchi foi empregada para se determinar a combinação de efeitos que reduziria a variabilidade dos resultados obtidos. No caso do virabrequim, cada combinação possuía três réplicas, o que por sua vez permite uma análise mais profunda dos resultados do que quando se utiliza apenas duas réplicas, como foi o caso da placa plana. Para determinar a combinação que reduz a variabilidade basta encontrar o máximo valor da relação sinal-ruído dada pela Equação (4.1). Os resultados para as médias, desvios padrão e relação sinal-ruído encontram-se resumidos na Tabela 4.10.

Além da maior relação sinal-ruído, deve-se buscar também a combinação de efeitos que apresente o menor desvio padrão (*S*). A partir da Tabela 4.10 é possível notar que para o efeito A em seu nível baixo e o efeito B em seu nível alto, tem-se o menor desvio padrão assim como a maior relação sinal-ruído.

Tabela 4.10: Resultados para análise pela metodologia de Taguchi.

A	B	Rep 1	Rep 2	Rep 3	$\bar{y}$	<i>S</i>	<i>SN_T</i>
Baixo	Alto	1,091	1,143	1,112	1,115	0,0262	32,595
Baixo	Baixo	0,753	1,242	0,991	0,995	0,2445	12,193
Médio	Alto	1,623	1,689	1,812	1,708	0,0959	25,011
Médio	Baixo	1,374	1,805	1,764	1,648	0,2379	16,810
Alto	Alto	1,954	2,196	2,429	2,193	0,2375	19,307
Alto	Baixo	2,033	2,55	2,814	2,466	0,3973	15,857

Apesar de a metodologia de Taguchi não avaliar as interações entre os efeitos de influência, como já dito, estas não se aplicam ao presente caso, uma vez que a análise anterior (ANOVA) mostrou novamente que tais interações causam pouca influência nos resultados. No caso anterior, notou-se que o nível de efeito que causava menor variabilidade estava relacionado ao mais elevado, ou seja, mais passos indicavam menores variabilidades. No entanto, para o presente caso, observou-se que quanto menos passos são utilizados, menor é a variabilidade. Este fato

pode estar relacionado à quantidade de réplicas obtidas, ou seja, ao se utilizar mais réplicas pode-se obter uma maior confiança nos resultados. Como no caso do virabrequim o número de réplicas é maior, os resultados parecem indicar que quanto mais passos se utilizam, maior a variabilidade. Esse é um resultado inesperado. Pode-se considerar que a utilização de mais passos tende a carregar erros obtidos nas medições dos passos anteriores, já que o passo seguinte utiliza como referência o estado deformado anterior. É importante lembrar também que o método utilizado define uma combinação de fatores em que a variabilidade é reduzida, de modo que cada efeito sozinho não teria necessariamente a menor variabilidade.

4.3 Considerações finais

Devido ao assunto estudado ser razoavelmente recente na literatura, houve um intenso aprendizado ao longo do desenvolvimento do trabalho. Um problema encontrado nas medições está relacionado às limitações dos equipamentos disponíveis para a realização dos experimentos. Os equipamentos disponíveis foram os utilizados regularmente em testes convencionais pela empresa Thyssenkrupp Metalúrgica Campo Limpo, que gentilmente os cedeu para a pesquisa e concedeu a bolsa que permitiu a realização do trabalho. Tais equipamentos não permitiram a aplicação de níveis de carregamento maiores, o que pode ser notado pelos resultados de tensão. A variação gerada pelo sistema hidráulico de carregamento foi outro fator que pode ter influenciado no resultado da dispersão. O sistema de aplicação de cargas era controlado a partir de uma válvula proporcional, ligada a uma bomba hidráulica. Assim, o controle era feito com uma malha que corrigia a pressão aplicada a cada momento, causando pequenas variações. Como o sistema ESPI é extremamente sensível às mudanças na imagem que permite o cálculo dos deslocamentos, esse fator pode ter sido importante.

O nível de carregamento e a dificuldade no controle da aplicação das cargas, no entanto, não representaram uma barreira intransponível para a obtenção dos resultados. Mesmo nos níveis de carregamento reduzidos e com a possível variação, os resultados se mostraram coerentes e as medições puderam ser feitas. Os resultados mostram que o sistema pode ser usado para a medição de tensões em virabrequins, com resolução adequada para seu emprego industrial.

5 Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos

Este trabalho permitiu a definição da configuração ótima para os níveis das variáveis que influenciam na medição de tensões de um virabrequim solicitado em compressão por interferometria a laser. Iniciou-se o trabalho analisando-se peças de geometria mais simples, o que permitiu a abordagem mais focada nas variáveis que influenciam nos resultados para o virabrequim numa etapa posterior. A etapa inicial pode ser utilizada também como base para avaliação de outros componentes que serão avaliados utilizando o método, como bielas, suportes e outros.

O método ESPI de medição de tensões foi inicialmente validado através da comparação entre os resultados obtidos com extensômetros. Uma segunda comparação foi feita com os resultados gerados pelo método dos elementos finitos. Em ambos os casos, os resultados mostraram concordância adequada, tanto no aspecto qualitativo quanto no quantitativo. Baseado nesses métodos consagrados em literatura e pelo uso em aplicações industriais, o método ESPI foi validado.

Com base nos experimentos iniciais e na revisão de literatura, foram selecionadas as variáveis que poderiam influenciar os resultados da medição de tensões. A conclusão sobre em quais níveis as variáveis deveriam ser mantidas para diminuição da variabilidade foi obtida através de análises baseadas em planejamentos experimentais estruturados e posteriores análises de variância e pela metodologia de Taguchi, métodos já bem desenvolvidos na literatura.

A variável relacionada à distância da câmera ao objeto foi avaliada apenas para a placa plana, podendo-se observar que esta causava pouca influência nos resultados. Assim, foi decidido

mantê-la num nível constante para a análise do virabrequim. O valor a ser definido pôde ser obtido através da análise pelo método de Taguchi, qual seja à distância de 225mm.

A variável relacionada ao nível de tensões aplicadas, diretamente ligada à quantidade de passos utilizados para medição, apresentou forte influência para os dois componentes analisados, sendo sempre a mais influente, como esperado. As análises pela metodologia da Taguchi mostraram para o caso da placa plana que seria interessante mantê-la no nível mais alto, enquanto que para o virabrequim no nível mais baixo. Conforme discutido anteriormente, devido a maior quantidade de réplicas, outras características do aparato experimental e à própria análise de Taguchi aplicada ao componente, decidiu-se realizar o processo para o virabrequim em um único passo de medição.

O ganho na imagem apresentou pouca influência na primeira análise, por isso para a análise do virabrequim esta variável foi mantida constante no nível 50, definido pela análise de Taguchi aplicada a placa plana.

A suavização mostrou uma influência considerável no caso da placa plana, mas significativamente menor para a análise do virabrequim. Tais fatos estavam relacionados ao aparato experimental utilizado. Dessa forma, de acordo com a análise de Taguchi aplicada ao virabrequim, definiu-se pelo nível que levava a menor variabilidade dos resultados, ou seja, dez suavizações.

Uma vez definido o melhor ajuste para a aplicação desejada, o método ESPI mostrou-se uma ferramenta útil para medição das tensões. O fato de ser uma ferramenta não-destrutiva, que tem como característica a rapidez de sua aplicação, faz dele uma alternativa muito adequada para uso em pesquisa e desenvolvimento. O maior tempo gasto fica por conta do ajuste (*setup*) de toda a medição envolvendo a fixação do objeto a ser medido, que deve ser realizada cuidadosamente. O tempo gasto com o ajuste restante, ou seja, a configuração do *software* para obtenção das medições, é relativamente curto. Outras vantagens relacionadas à utilização deste método são a sua elevada sensibilidade, portabilidade e simplicidade e baixo custo. Como desvantagens pode-se destacar a necessidade do controle preciso da carga aplicada, a grande susceptibilidade a

fatores ambientais, em especial à vibrações, e a necessidade do uso de um ponto de referência, para o qual não deve haver deslocamento, ao qual são referenciadas as tensões.

Como sugestão para futuros trabalhos, pode-se destacar:

- Avaliação quantitativa dos erros de medição, determinando-se assim valores das variáveis medidas localmente e dos erros associados.
- Aplicação a níveis mais elevados de carregamento para a verificação da validade das conclusões aqui obtidas
- Desenvolvimento de um novo sistema de aplicação de cargas, com controle preciso do carregamento e possibilidade de mantê-lo constante.
- Estudo da aplicação a outros componentes mecânicos, tais como bielas, estruturas e outros.

6 Referências Bibliográficas

- Barros Neto, B., Scarmino, I. S., Bruns, R. E. *Como fazer experimentos*. 3ed. Campinas: Unicamp, 2007, 480p.
- Bhaduri, B., Kothiyal, M.P., Mohan, N.K. A comparative study of phase-shifting algorithms in digital speckle pattern interferometry. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, v.119, (3), pp.147-152, 2008.
- 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.
- Carré, P. Installation et utilisation du comparateur photoelectrique et interferential du Bureau International des Poids et Mesures. *Metrologia*, v.2, (1), pp.13-23, 1966.
- Cloud, G. *Optical Methods of Engineering Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, 503p.
- Cloud, G. Optical Methods in Experimental Mechanics. Part 25: Objective Speckle. *Experimental Techniques*, v.31, (1), pp.15-17, 2007.
- Creath, K. Phase measurement techniques for nondestructive testing. In *Proceedings: Hologram Interferometry and Speckle Metrology*. Bethel, CT: Society for Experimental Mechanics, 1990.

Dantec Dynamics. Q300 HR 3D-ESPI-Sensor – Operating Manual v 1.1, 2005.

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.

Ettemeyer, A. Combination of 3-D deformation and shape measurement by electronic speckle pattern interferometry for quantitative strain-stress analysis. *Optical Engineering*, v.39, (1), pp.212–215, 2000.

Gabor, D. A new microscopic principle. *Nature*, v.161, (4098), pp.777-778, 1948.

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.

Hack, E. e Schumacher, A. ESPI Measurements of Strain on a CFRP-Reinforced Bending Beam. *Strain*, v.43, (3), pp.235-239, 2007.

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. *Fundamentos de Física 4 – Ótica e Física Moderna*. Rio de Janeiro: LTC, 1996, 355p.

Heath, A. R. e McNamara, P.M. Crankshaft Stress Analysis – Combination of Finite Element and Classical Analysis Techniques. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 112, pp.268-275, 1990.

<<http://auto.howstuffworks.com/engine2.htm>> Acesso em 08 de março de 2008.

<<http://www.matweb.com>> Acesso em 08 de maio de 2008.

- Jones, R. e Leendertz, J. Elastic constant and strains measurements using a three beam speckle interferometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, v.7, (8), pp.653-657, 1974.
- Jones, R., Wykes, C. *Holographic and Speckle Interferometry*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989, 353p.
- Karamangil, M. I., Kaya, N. A comparison of fatigue life between two automotive connecting rods. *International Journal of Vehicle Design*, v.43, (1-4), pp.82-99, 2007.
- Lai, W. M., Rubin, D., Krempl, E. *Introduction to Continuum Mechanics*. EUA: Butterworth Heinemann, 1994, 570p.
- Leendertz, J. A. Interferometric displacement measurements on scattering surfaces utilizing speckle effect. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, v.3, (3), pp. 214-218, 1970.
- Martinez, A. e Rayas, J.A. Evaluation of error in the measurement of displacement vector components by using electronic speckle pattern interferometry. *Optics Communications*, v.271, (2), pp.445-450, 2007.
- Martinez, A., Rayas, J. A., Corder, R., Genovese, K. Analysis of optical configurations for ESPI. *Optics and Lasers in Engineering*, v.46, (1), pp.48-54, 2008.
- Moore, A. J. e Tyrer, J. R. Two-dimensional Strain Measurement with ESPI, *Optics and Lasers in Engineering*, v.24, (5), pp.381-402, 1996.
- Montazersadgh, F. H. e Fatemi, A. Dynamic Load and Stress Analysis of a Crankshaft, *SAE Technical Paper 2007-01-0258*, 8p., 2007.
- Montgomery, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 6ed. New York: J. Wiley, 2005, 643p.

- Mostafa, M.A., Gmur, T., Botsis, J. Experimental study on the effects of the boundary conditions on the deformations of composite plates. *Composites Science and Technology*, v.66, (11-12), pp.1756-1765, 2006.
- Norton, R. L. *Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada*. 2ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. 932p
- Pfeifer, T., Mischo, H., Ettemeyer, A., Wang, Z., Wegner, R. Strain/Stress Measurements using Electronic Speckle Pattern Interferometry. In: Three-Dimensional Imaging, Optical Metrology, and Inspection IV. *Proceedings of SPIE*, 1998, v.3520, pp. 262-271, 1998.
- Pulkcrabek, W. W., *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. 2.ed. Pearson Prentice Hall, 2004, Cap. 1, Introduction, pp.1-34.
- Rabb, R. Fatigue failure of a connecting rod. *Engineering Failure Analysis*, v.3, (1), pp.13-28, 1996.
- 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.
- Scalea, L., Hong, S. S., Cloud, G. L. Whole-field Strain Measurement in a Pin-loaded Plate by Electronic Speckle Pattern Interferometry and the Finite Element Method. *Experimental Mechanics*, v.38, (1), pp.55-60, 1998.
- Schreier, L., *Tension and compression in connecting rods*, <http://em-ntserver.unl.edu/Mechanics-Pages/Luke-schreier/unzip/Tension%20and%20Compression%20in%20Connecting%20Rods%20VI.htm>. Acesso em 07 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.
- Sonsino, C. M. Fatigue design of high loaded PM parts. *Metal Powder Report*, v.51, (6), pp.36-45, 1996.
- Stetson, K. A. New design for laser image, speckle interferometer. *Optics and Laser Technology*, v.2, (4), pp.179-181, 1970.
- Taguchi, G. e Wu, Y. *Introduction to Off-Line Quality Control*. Central Japan Quality Control Association, Nagoya, Japan. 1980.
- Taguchi, G. *System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Cost*, UNIPUB, White Plains, NY. 1987.
- 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.
- Ulrich, K. T., Eppinger, S. D. *Product Design and Development*. 3ed. New York: Irwin/McGraw Hill, 2004, Cap. 13, Robust Design, pp.265-284.
- Vasconcellos, E. O laser. *ComCiência*, v.20, 2001. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/fisica/fisical3.htm>>. Acesso em 09 de abril de 2008.
- Wegner, R., Ettemeyer, A., Schön, R., Buschermöhle, H. In: Third International Conference on Experimental Mechanics and Third Conference of the Asian Committee on Experimental Mechanics. *Proceedings of SPIE*, v.5852, pp. 421-427, 2005.

- Wyant, J. C. Interferometric optical metrology, basic systems and principles. *Laser Focus*, pp.65-71, May 1982.
- Yang, L. e Ettemeyer, A. Strain measurement by three-dimensional electronic speckle pattern interferometry: potentials, limitations and applications. *Optical Engineering*, v.42, (5), pp.1257-1266, 2003.
- Yoneyama, S., Ogawa, T., Kobayashi, Y. Evaluating mixed-mode stress intensity factors from full-field displacement fields obtained by optical methods. *Engineering Fracture Mechanics*, v.74, (9), pp.1399-1412, 2007.
- Yu, Y.J., Wang, L.L. e Zhang, Z.J. Design of Phase-shifting ESPI System for 3D Deformation Measurement. In: International Symposium on Instrumentation Science and Technology. *Journal of Physics: Conference Series*,. v.48, pp.911-915, 2006.

Apêndice A

A.1 Características do laser e outros conceitos básicos

O laser é a fonte de luz utilizada nas técnicas de interferometria, tanto para a holográfica quanto para a de *speckles*. Como o laser é uma luz, apresenta características de uma onda eletromagnética. Um campo elétrico se propagando ao longo do eixo coordenado x pode ser descrito pela Equação A.1, onde A representa a amplitude do campo elétrico, f é a frequência de oscilação deste campo, t é o tempo, k é uma constante e z refere-se à coordenada do ponto em que o campo está sendo definido. As ondas eletromagnéticas apresentam, além do campo elétrico, um campo magnético que é ortogonal àquele, sendo ambos ortogonais à direção de propagação da onda, como ilustrado na Figura A.1. Nesta figura, B representa o campo magnético e E o campo elétrico.

$$E(x, t) = A \sin(2\pi ft - kx) \quad (\text{A.1})$$

Uma característica importante do laser está relacionada ao fato de que esta é uma fonte monocromática, ou seja, possui um único comprimento de onda, que é característico para cada tipo de laser.

Outra característica do laser, que o faz ser importante na utilização em interferometria ótica, é o fato de ser uma fonte polarizada, ou seja, os elétrons que caracterizam o campo elétrico apresentam um movimento em uníssono. Na Figura A.1 tem-se uma onda polarizada, com o

plano de vibração dado por xy . Fontes comuns de luz têm seus átomos constituintes atuando independentemente uns dos outros, gerando diversos campos elétricos de ondas independentes, fazendo com que a fonte seja não-polarizada. Existem diversos tipos de polarização, a onda da Figura A.1 é plano-polarizada na direção y , já que as vibrações do vetor campo elétrico são paralelas a tal direção ao longo dos pontos da onda. Quando o campo elétrico é rotacionado ao longo da direção de propagação, tem-se uma polarização elíptica.

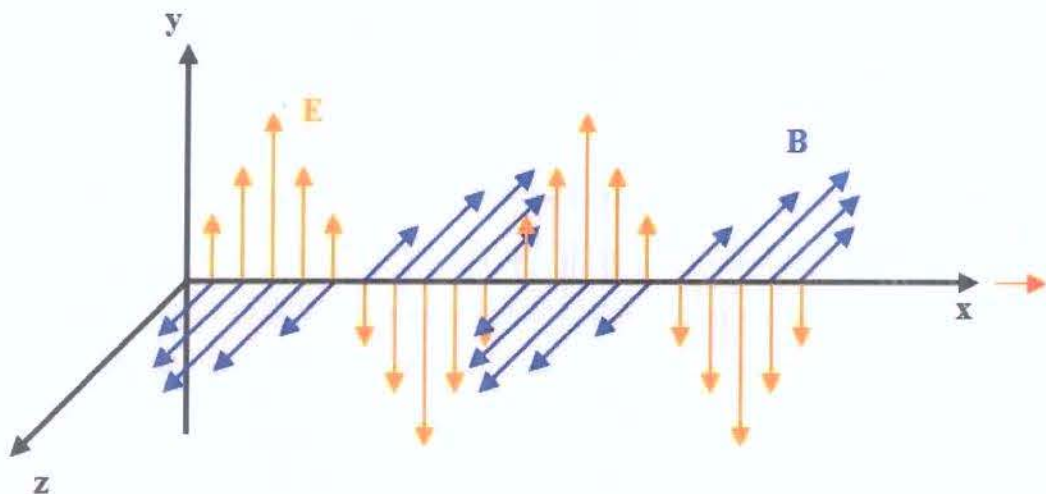


Figura A.1: Onda eletromagnética se propagando na direção do eixo x .

Nas aplicações usuais costuma-se utilizar feixes de ondas, de onde se obtém frentes de ondas, podendo estas ter diversas configurações, sendo de especial interesse as frentes de onda plana e esférica. Uma frente de onda plana é aquela em que a fase de todos os pontos num plano perpendicular a direção de propagação da onda é constante, como se fosse um conjunto de diversas ondas plano-polarizadas paralelas entre si. Quando algumas ondas não são paralelas, a frente de onda pode convergir ou divergir, não sendo mais um frente de onda plana. Além disso, uma frente de onda plana é facilmente tratada matematicamente e pode ser gerada e reproduzida com grande precisão. A Equação A.2 representa uma frente de onda plana se propagando na direção x .

$$E(x,y,z,t) = A \operatorname{sen}(2\pi ft - kx) \tag{A.2}$$

Já as frentes de onda esféricas são aquelas em que a luz irradia em todas as direções a partir de uma fonte pontual, de modo que uma esfera centrada na fonte define um local onde as fases das ondas são constantes. Tal frente de onda pode ser descrita pela Equação A.3. Frentes de onda esféricas são importantes, pois podem ser geradas atravessando-se uma lente com uma frente de onda plana e então fazer com que aquelas atravessem outra lente para que a frente volte a ser plana. No entanto, esta última tem um diâmetro maior. Tal técnica é utilizada para expandir feixes de laser para diâmetros maiores.

$$E(r,t) = A \sin(2\pi ft - kr) \quad (\text{A.3})$$

Uma outra característica importante do laser refere-se a sua coerência. A coerência de uma frente de onda está relacionada com a capacidade de uma onda em manter suas características. Um feixe de laser, por exemplo, se aproxima de uma onda senoidal com frequência fixa ao longo de uma certa distância, conhecida como comprimento de coerência, que tem associado um tempo de coerência, este relativo ao tempo em que a onda mantém sua forma senoidal.

Os seguintes conceitos básicos relacionados à teoria eletromagnética da luz se aplicam à interferometria a laser e permitem uma melhor compreensão dos conceitos envolvidos.

A.1.1 Interferência entre ondas de luz

A interferência entre ondas de luz é um dos dois principais fenômenos relacionados aos métodos de medição ópticos, sendo o outro a difração. O entendimento deste fenômeno é muito importante para que se compreenda tais métodos.

O objetivo é utilizar a luz como um bastão de medida. O problema é como medir a fase de uma onda ou a diferença de fase entre duas ondas. As frequências de ondas de luz são de aproximadamente 10^{15} Hz. Os detectores que existem atualmente não são capazes de realizar leituras em tais frequências. A amplitude não pode ser analisada, já que a média de tal grandeza seria nula em tais medições. No entanto, é possível se detectar a intensidade e como esta não

depende da frequência e do tempo, ainda apresentando características das fases, pode-se obter informações sobre as fases das ondas.

Inicialmente será discutido o caso mais simples, relacionado à interferência entre duas ondas colineares que são coerentes, ou seja, disponíveis para interferir, uma vez que a coerência é uma condição necessária para que possa ocorrer interferência. As amplitudes de tais ondas incidindo num ponto são dadas pelas Equações A.4 e A.5, onde u_0 é amplitude de cada uma das ondas, f é frequência e ϕ_i a fase da respectiva onda.

$$U_1 = u_0 \text{sen}(2\pi f t + \phi_1) \quad (\text{A.4})$$

$$U_2 = u_0 \text{sen}(2\pi f t + \phi_2) \quad (\text{A.5})$$

Um ponto no caminho das ondas será caracterizado pela seguinte amplitude total, que corresponde à soma das amplitudes de cada uma das ondas que interferem, dada pela Equação A.6.

$$U_T = U_1 + U_2 = 2u_0 \cos\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) \text{sen}\left(2\pi f t + \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right) \quad (\text{A.6})$$

Nota-se que o movimento resultante é um movimento harmônico simples, com frequência f e amplitude dada pela Equação A.7.

$$u_T = 2u_0 \cos\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) \quad (\text{A.7})$$

Como a intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude, pode ser representada pela Equação A.8, que pode ser escrita na forma dada pela Equação A.9, onde I_0 representa a intensidade de uma única onda.

$$I_T \propto 4u_0^2 \cos^2\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) \quad (\text{A.8})$$

$$I_T = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) \quad (\text{A.9})$$

Dessa forma, nota-se que quando as ondas estão em fase, ou seja, apresentam a mesma fase, a intensidade resultante é o dobro da soma das intensidades de cada onda. No entanto quando as ondas estão em anti-fase, a diferença de fase é de π radianos, a intensidade é nula, qualquer outra diferença de fase irá gerar intensidades que estão compreendidas entre estes valores. Este efeito é conhecido como interferência.

A representação complexa de ondas de luz é interessante, pois permite a realização de cálculos da adição de ondas com maior facilidade. Duas ondas complexas podem ser descritas de acordo com as Equações A.10 e A.11, a amplitude total e a intensidade total pelas Equações A.12 e A.13, respectivamente, onde I_1 e I_2 representam as intensidades das respectivas ondas.

$$U_1 = u_1 \exp i(2\pi f t + \phi_1) \quad (\text{A.10})$$

$$U_2 = u_2 \exp i(2\pi f t + \phi_2) \quad (\text{A.11})$$

$$U_T = (u_1 \exp i\phi_1 + u_2 \exp i\phi_2) \exp i2\pi f t \quad (\text{A.12})$$

$$\begin{aligned} I_T \propto U_T U_T^* &= u_1^2 + u_2^2 + u_1 u_2 [\exp i(\phi_1 - \phi_2) + \exp -i(\phi_1 - \phi_2)] \\ &= u_1^2 + u_2^2 + 2u_1 u_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \end{aligned}$$

$$I_T = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (\text{A.13})$$

Um caso mais geral para a interferência entre duas ondas ocorre quando estas se cruzam. Duas ondas não-colineares, propagando-se em direções arbitrárias podem ter suas amplitudes complexas definidas pelas Equações A.14 e A.15, onde $k = 2\pi/\lambda$ é uma constante, $\vec{n}$ são os vetores diretores relacionados à direção de propagação e $\vec{r}$ é o vetor das coordenadas cartesianas correspondentes ao ponto em que se define tal amplitude. A intensidade resultante pode ser dada pela Equação A.16.

$$U_1 = u_1 \exp i(2\pi f t + k \vec{n}_1 \cdot \vec{r}) \quad (\text{A.14})$$

$$U_2 = u_2 \exp i(2\pi f t + k \vec{n}_2 \cdot \vec{r}) \quad (\text{A.15})$$

$$I_T = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[k(\vec{n}_1 - \vec{n}_2) \cdot \vec{r}] \quad (\text{A.16})$$

Aplicando-se tais resultados para um caso simples, onde as ondas incidem em ângulos iguais em magnitude e opostos em relação ao eixo z , tem-se os vetores diretores descritos pelas Equações A.17 e A.18 e a intensidade resultante ao longo de uma linha paralela ao eixo x , dada pela Equação A.19. Tal linha pode ser descrita pelo vetor $\vec{r} = x\hat{i} + z_0\hat{k}$, sendo z_0 a posição da linha no eixo z .

$$\vec{n}_1 = \sin\theta\hat{i} + \cos\theta\hat{k} \quad (\text{A.17})$$

$$\vec{n}_2 = -\sin\theta\hat{i} + \cos\theta\hat{k} \quad (\text{A.18})$$

$$I_T = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} x \sin\theta\right) \quad (\text{A.19})$$

É possível perceber então que a intensidade ao longo de qualquer linha paralela ao eixo x varia senoidalmente. Essa variação de intensidade é conhecida como padrão de franjas de interferência. Estes padrões são a base de análise dos métodos de medição interferométricos.

A.1.2 Difração

Quando um feixe de luz incide sobre um orifício, aresta ou superfície que apresenta imperfeições da ordem de grandeza do comprimento de onda de tal luz, a luz não se comporta como no modelo da ótica linear. Por exemplo, uma frente de onda plana incidindo sobre um orifício do tamanho de seu comprimento de onda ou menor, torna-se divergente, aproximando-se de uma onda esférica. Este fenômeno é conhecido como difração e se encaixa no princípio de Huygens-Fresnel das ondas secundárias em que cada ponto de uma frente de onda atua como uma fonte pontual de ondas secundárias, tendo-se as amplitudes das frentes de ondas dadas pela soma das amplitudes das ondas secundárias.

Considere-se o caso da difração de uma frente de onda plana, de comprimento de onda λ , viajando ao longo do eixo z , por uma fenda estreita e infinitamente comprida de largura a , existente num anteparo opaco B que coincide com o eixo y , como ilustrado pela Figura A.2. Num ponto P , localizado no anteparo de projeção C , a um ângulo θ em relação ao eixo z , a contribuição para a amplitude neste ponto proveniente de um elemento de linha dy centrado em y , pode ser dada pela Equação A.20, assumindo-se que θ é pequeno. Nessa equação, l_0 é a distância entre o centro do orifício e o ponto P .

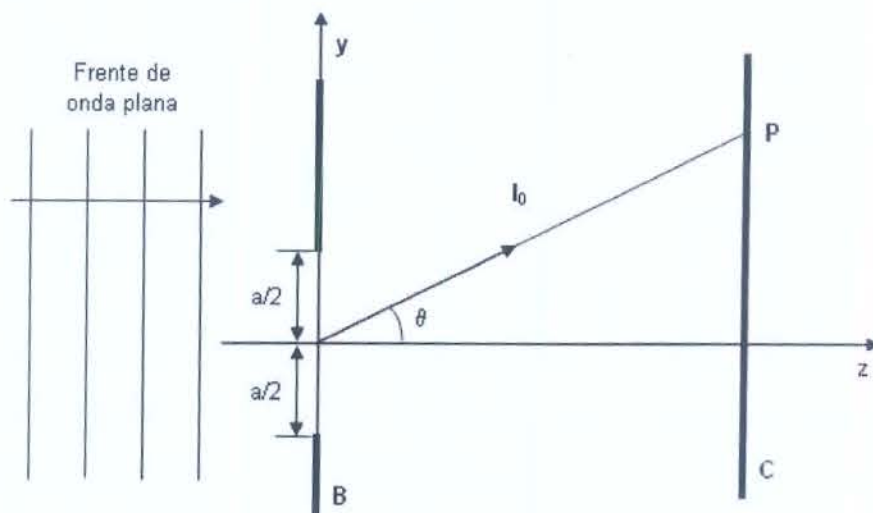


Figura A.2: Difração de frente de onda plana em fenda única.

$$dU = u_0 \exp \left[\frac{2\pi i}{\lambda} (l_0 - y \sin \theta) \right] \quad (\text{A.20})$$

A amplitude complexa total no ponto P será então dada pela Equação A.21 e sua respectiva intensidade pela Equação A.22.

$$U(P) = u_0 \int_{-a/2}^{a/2} \exp \left[\frac{2\pi i}{\lambda} (l_0 - y \sin \theta) \right] dy$$

$$U(P) = u_0 a \exp \frac{2\pi i l_0}{\lambda} \operatorname{senc} \left(\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} \right) \quad (\text{A.21})$$

$$I = I_0 \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} \right) \quad (\text{A.22})$$

Caso a fenda fosse substituída por um orifício circular de diâmetro a , a amplitude complexa resultante e a intensidade seriam descritas, respectivamente pelas Equações A.23 e A.24, onde l é a distância do centro ao ponto P , J_1 é a função de Bessel de primeira ordem e a constante 2 (dois) foi incluída na última equação com o intuito de normalizar a intensidade para valores entre zero e um.

$$U(P) = u_0 \exp \frac{2\pi i l \cos \theta}{\lambda} \left| \frac{J_1(\pi a \sin \theta / \lambda)}{(\pi a \sin \theta / \lambda)} \right| \quad (\text{A.23})$$

$$I = I_0 \left[\frac{2J_1(\pi a \sin \theta / \lambda)}{(\pi a \sin \theta / \lambda)} \right]^2 \quad (\text{A.24})$$

Para o caso onde duas fendas de largura a , separadas por uma distância d , difratam uma frente de onda plana, como ilustrado na Figura A.3, tem-se a amplitude complexa e intensidade, dadas pelas Equações A.25 e A.26, respectivamente.

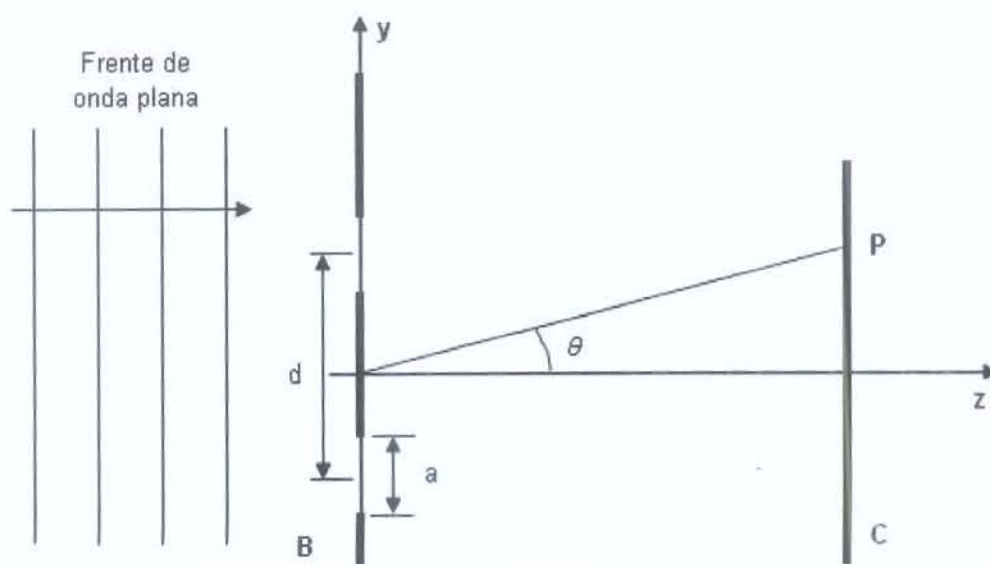


Figura A.3: Difração de frente de onda plana em fenda dupla.

$$U(P) = u_0 \left[\int_{-d/2-a/2}^{d/2+a/2} \exp \frac{2\pi i}{\lambda} (l_0 - \text{sen } \theta) dy + \int_{-d/2-a/2}^{d/2+a/2} \exp \frac{2\pi i}{\lambda} (l_0 - \text{sen } \theta) dy \right]$$

$$U(P) = 2u_0 a \frac{\text{sen}(\pi a \text{sen } \theta / \lambda)}{(\pi a \text{sen } \theta / \lambda)} \exp\left(\frac{2\pi i l_0}{\lambda}\right) \cos\left(\frac{\pi d \text{sen } \theta}{\lambda}\right) \quad (\text{A.25})$$

$$I = I_0 \text{sen}^2 \left(\frac{\pi a \text{sen } \theta}{\lambda} \right) \cos^2 \left(\frac{\pi d \text{sen } \theta}{\lambda} \right) \quad (\text{A.26})$$

O caso de uma rede de difração composta por diversas fendas separadas por uma distância d , de largura a , sendo iluminada por uma frente de onda plana, é ilustrado na Figura A.4. A amplitude num ponto P pode ser dada pela Equação A.27, onde $q = (\pi a \text{sen } \theta) / \lambda$ e $N = (2M + 1)$ é o número total de fendas. A intensidade é expressa pela Equação A.28.

$$U(P) = U_0 \left\{ \frac{1 - \exp[2\pi i(2M + 1)d(\text{sen } \theta) / \lambda]}{1 - \exp[(\pi i d \text{sen } \theta) / \lambda]} \right\} \quad (\text{A.27})$$

$$I = I_0 \frac{\text{sen}^2[(\pi N d \text{sen } \theta) / \lambda]}{\text{sen}^2[(\pi d \text{sen } \theta) / \lambda]} \quad (\text{A.28})$$

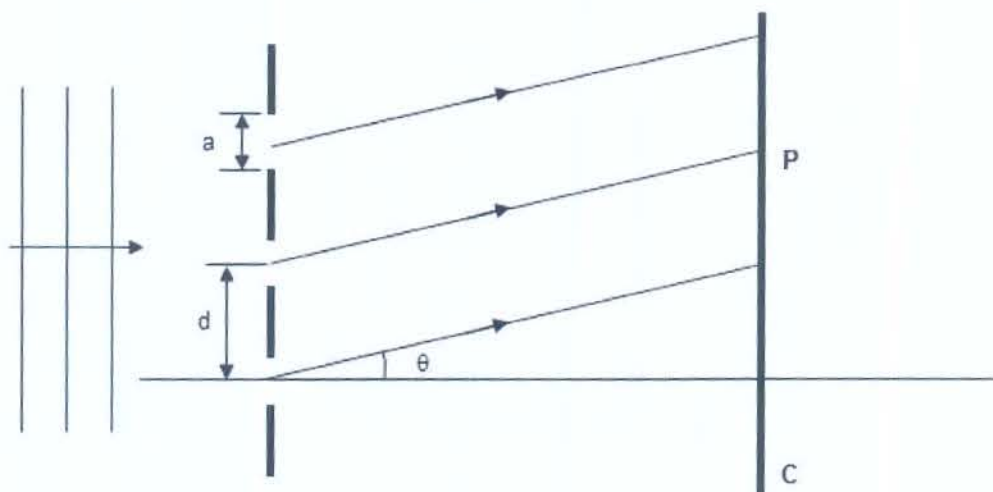


Figura A.4: Frente de onda plana atingindo rede de difração de diversas fendas.

A.1.3 Holografia

Um holograma consiste numa forma de se armazenar e representar figuras nas três dimensões. É uma forma codificada de informação visual que pode ser decodificada utilizando-se de condições específicas, iluminando-se o holograma com laser, por exemplo.

A teoria relacionada à holografia envolve conceitos de interferência entre duas ondas e de difração através de uma rede. Um holograma deve armazenar as informações de uma onda refletida de um objeto quanto a sua fase. No entanto, como não há detectores capazes disso, converte-se a informação da fase em informação sobre a amplitude adicionando-se um feixe de referência. O holograma nada mais será do que o padrão de interferência entre tais ondas, resultando em uma rede de difração. Ao se iluminar essa rede de difração com o feixe de referência idêntico ao original é possível a reconstrução do feixe que foi refletido pelo objeto quando o holograma foi gravado, reproduzindo uma imagem tri-dimensional do objeto, como se este estivesse em sua posição original. Uma gravação holográfica adequada requer uma fonte de laser (luz monocromática e coerente). No entanto, na reconstrução é possível utilizar outras fontes.

Uma frente de onda qualquer pode ser considerada como um conjunto de diversas frentes de ondas planas. Dessa forma, a frente de onda refletida por um objeto, atingindo um holograma a ser gravado pode ser dada pela Equação A.29, que por sua vez representa a transformada de Fourier inversa para a amplitude da frente de onda, onde $\lambda f_{x,y} = n_{x,y}$ são os cossenos diretores de cada uma das ondas planas. Além disso, uma frente de onda plana pode ser utilizada como feixe de referência, tendo a sua amplitude complexa definida pela Equação A.30.

$$U(x, y, 0) = \iint u_0(f_x, f_y) \exp 2\pi i(f_x x + f_y y) df_x df_y \quad (\text{A.29})$$

$$U_r(x, y, 0) = u_r \exp \frac{2\pi i}{\lambda} (\vec{n}_r \cdot \vec{r}) \quad (\text{A.30})$$

Cada uma das ondas planas da Equação A.29 irá interferir com a onda da Equação A.30 formando uma rede de difração no holograma a ser gravado. Quando este é revelado e então

iluminado pelo feixe de referência, todas as ondas planas de (A.29) irão ser reconstruídas formando uma imagem virtual do objeto. É importante ressaltar que o feixe de referência não precisa ser necessariamente plano. Caso o holograma seja iluminado pelo feixe de referência na direção oposta à original, uma imagem real é formada na posição original do objeto. O feixe de referência para reconstrução deve ser o mais equivalente possível ao original, pois qualquer alteração pode levar a criação de imagens distorcidas e aumentadas ou diminuídas, além de poder haver redução na intensidade.

A.1.4 O efeito speckle

Quando uma superfície é iluminada por laser sua imagem apresentará uma característica granular formada por diversos pontos, sendo tal fenômeno conhecido como efeito de *speckles*. Tal efeito ocorre apenas para superfícies opticamente rugosas, ou seja, que possuem variação de altura da ordem de grandeza do comprimento de onda da luz utilizada, ou maior.

A formação dos *speckles* pode ser explicada pelo fenômeno da interferência entre raios de luz provenientes de uma fonte coerente que incidem sobre uma superfície rugosa. Tem-se uma fonte coerente, isto é, o feixe mantém suas características de modo que todos os raios estejam em fase, mantendo a mesma frequência, e esta incide sobre uma superfície dispersora. A combinação dos raios interferentes refletidos por tal superfície pode gerar pontos num plano onde a interferência pode ser construtiva, destrutiva ou ainda em algum nível entre os dois anteriores formando assim o padrão de *speckle*, como ilustrado na Figura A.5. A intensidade da luz refletida por esse tipo de superfície, quando iluminada por laser, varia aleatoriamente no espaço, sendo conhecido como *speckle* objetivo. Quando se tem a formação de uma imagem das intensidades relacionadas à reflexão pela superfície, tem-se um padrão de *speckles* subjetivo.

Cada ponto de uma superfície iluminada absorve e re-emite luz funcionando como a fonte de uma frente de onda esférica, dessa forma cada ponto do espaço terá sua amplitude complexa dada pelas contribuições de cada ponto da superfície. Cada um desses pontos apresenta um conjunto de vetores de fases aleatórias que, quando adicionadas, formam amplitudes resultantes aleatórias. Conforme a localização dos pontos, tem-se uma variação de intensidade,

caracterizando o *speckle* objetivo. Pontos muito próximos apresentarão intensidades semelhantes. A partir da função de autocorrelação entre dois pontos é possível estimar um “tamanho” para os *speckles*, ou seja, existe uma determinada distância entre pontos a partir da qual estes não apresentam nenhuma relação. De acordo com Goodman (1975), a partir da função de autocorrelação obtida quando se ilumina uma superfície de área $L \times L$, o tamanho dos *speckles* pode ser definido pela Equação A.31, onde λ é o comprimento de onda da luz utilizada e z é a distância entre os planos objeto e imagem. Este tipo de *speckle* é denominado objetivo, pois seu tamanho depende apenas do plano no espaço em que é visualizado e não do sistema de imagem utilizado.

$$\Delta x = \frac{\lambda z}{L} \quad (\text{A.31})$$

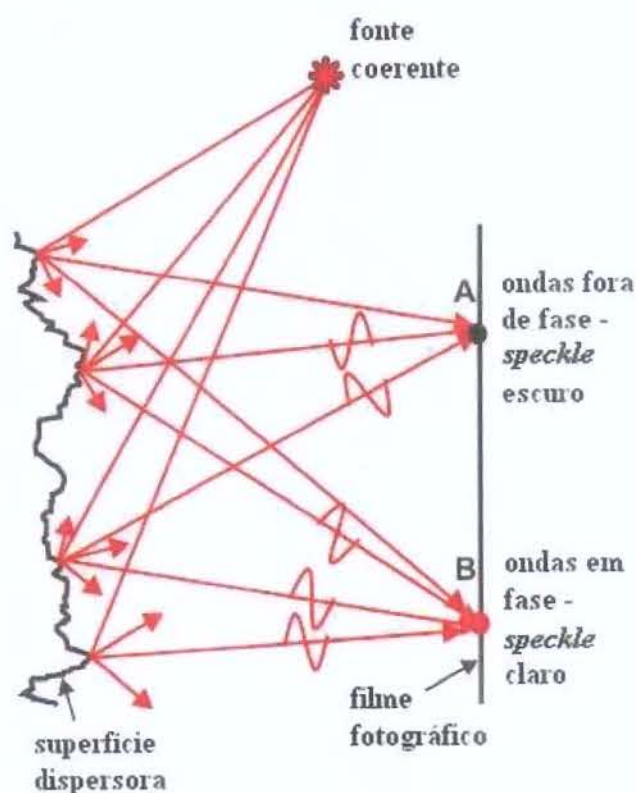


Figura A.5: Formação de *speckles*. Adaptada de Cloud (2007).

O padrão de *speckles* subjetivo envolve a formação de uma imagem, o que normalmente necessita de uma lente. Assim, a distribuição espacial dos *speckles* é determinada pelo limite de

difração do sistema. A luz refletida por um ponto P_1 na superfície irá formar um padrão de difração na imagem centrado num ponto Q . Pontos adjacentes a P_1 formarão padrões de difração que irão interferir com o padrão gerado por P_1 . Um ponto P_2 , mais distante, irá formar um padrão de difração centrado em Q' , onde seu primeiro mínimo coincide com Q . Pontos mais distantes irão contribuir pouco para a amplitude em Q . Além disso, como os máximos de segunda ordem dos padrões de difração obtidos são muito menores do que os primários, tal contribuição pode ser desconsiderada. Dessa forma, a intensidade da luz relacionada ao ponto Q é uma combinação entre os padrões de difração gerados pelos pontos do objeto centrados em P_1 cujo diâmetro é dado pelo dobro da distância de P_1 a P_2 . A distância QQ' pode ser obtida considerando-se as relações de padrões de difração obtidos ao se iluminar orifícios circulares, sendo dada pela Equação A.32, onde v é a distância da lente ao plano imagem e a é o diâmetro do orifício da lente. Assim sendo, o tamanho dos *speckles* subjetivos pode ser dado pela Equação A.33.

$$QQ' = 1,22 \frac{\lambda v}{a} \quad (\text{A.32})$$

$$d_{sp} = \frac{2,4\lambda v}{a} \quad (\text{A.33})$$

Como a maioria dos métodos que utiliza padrões de speckle necessita da combinação de dois padrões sendo um para cada estado, torna-se importante mencionar que tais padrões precisam se manter correlacionados. Existem dois modos básicos em que se pode ocorrer a perda de correlação, um deles é a diferença de fase no elemento de resolução a 2π , e o outro a perda de memória definida como a translação do elemento de resolução em aproximadamente um diâmetro de speckle.

A.2 Interferometria holográfica

Uma imagem formada por holografia é muito exata. A idéia básica da interferometria holográfica é comparar esta imagem a nível interferométrico com o objeto ou com a imagem do objeto. Qualquer distúrbio sofrido pelo objeto irá gerar um padrão de franjas de interferência na

imagem. A partir da análise destas franjas é possível determinar deslocamentos do objeto com precisão da ordem do comprimento de onda da luz utilizada.

A interferometria holográfica permite a medição interferométrica de superfícies rugosas – de ordens maiores do que o comprimento de onda da fonte de luz utilizada – algo que não é possível com a interferometria comum. Suas principais vantagens são a alta sensibilidade e a análise das distribuições de deslocamentos, deformações e tensões sem contato com o objeto. Uma grande dificuldade está relacionada à superposição da imagem ao objeto, que por sua vez pode ser realizada através de duas técnicas básicas: dupla-exposição e tempo-real. Além disso, uma outra dificuldade está relacionada a interpretação dos padrões de franja.

A.2.1 Técnica da dupla-exposição

Esta técnica se caracteriza pela gravação de dois hologramas num mesmo filme fotográfico, sendo um deles do objeto em seu estado inicial e o outro, sem movimentar o filme, do objeto após ter sofrido um distúrbio, podendo este ser uma deformação, vibração ou aquecimento. O holograma obtido, ao ser iluminado pelo feixe de referência, irá reconstruir os campos relacionados aos dois estados do objeto, formando um padrão de franjas de interferência.

Sejam as amplitudes complexas para os dois estados do objeto dadas, respectivamente, pelas Equações A.34 e A.35, onde u_i e ϕ_i são a amplitude e fase, respectivamente, da onda i .

$$U_{0_1} = u_1(x, y) \exp i\phi_1(x, y) \quad (\text{A.34})$$

$$U_{0_2} = u_2(x, y) \exp i\phi_2(x, y) \quad (\text{A.35})$$

Como o movimento do objeto é pequeno, as amplitudes apresentam pouca variação na distribuição de amplitude, logo $u_1(x, y) = u_2(x, y) = u(x, y)$. A fase para o segundo estado pode ser expressa em função da fase inicial mais uma diferença de fase, como mostrado pela Equação A.36.

$$\phi_2(x, y) = \phi_1(x, y) + \Delta\phi(x, y) \quad (\text{A.36})$$

A amplitude complexa do feixe de reconstrução após ter atingido o holograma, correspondente a imagem virtual é dada pela Equação A.37, onde K representa uma constante relacionada a transmitância do holograma. Já a intensidade pode ser expressa pela Equação A.38, e em sua forma trigonométrica pela Equação A.39.

$$U_i = K u(x, y) \{ \exp i\phi(x, y) + \exp i[\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)] \} \quad (\text{A.37})$$

$$I = U_i U_i^* = K^2 u^2 \{ 2 + \exp[-i\Delta\phi(x, y)] + \exp[i\Delta\phi(x, y)] \} \quad (\text{A.38})$$

$$I = 2K^2 u^2 \{ 1 + \cos[\Delta\phi(x, y)] \} \quad (\text{A.39})$$

Em relação à técnica tempo-real, a de dupla-exposição é mais fácil de ser realizada, apresentando como vantagem a falta da necessidade de se movimentar componentes do aparato experimental entre a criação do holograma até a obtenção dos padrões de franja. Uma das desvantagens está relacionada ao fato de não ser possível visualizar a formação das franjas conforme o deslocamento é aplicado, de forma que este deve ser previsto evitando padrões de franjas que não possam ser analisados.

É necessário que o objeto mantenha certa estabilidade, sendo apenas movimentado ao receber a aplicação de cargas. Usualmente as cargas mecânicas são aplicadas através de fontes controladas, como um peso morto ou um parafuso micrométrico. Elas devem ser aplicadas com a mínima presença de outras fontes de luz.

A.2.2 Técnica tempo-real

Na técnica tempo-real grava-se um holograma do objeto no filme fotográfico e então este deve ser revelado e retornado a sua posição original. Após isso, o holograma é iluminado pelo feixe de referência e o objeto pelo feixe objeto. Qualquer distúrbio no objeto irá criar um padrão de franjas de interferência na imagem. Pode ser necessário modificar as amplitudes dos feixes entre os estágios de gravação e reconstrução.

Uma das grandes dificuldades da técnica está relacionada ao fato de o holograma revelado ter que voltar a sua posição original, com uma precisão de poucos comprimentos de onda da luz utilizada. Revelar o filme fotográfico diretamente no suporte é uma solução, no entanto, gera grandes dificuldades de processamento. Um outro problema é a necessidade de total controle do deslocamento do objeto durante a obtenção das franjas, pois qualquer desvio não intencional pode causar uma perda de correlação.

Uma das vantagens está em não se ter a necessidade de prever um deslocamento que pode ser aplicado, ou seja, desde que este não cause descorrelação, conforme o deslocamento é aplicado as franjas vão se formando.

A amplitude complexa relativa ao feixe do objeto que seria reconstruída pelo holograma pode ser dada pela Equação A.40, enquanto que a relativa ao objeto deformado pela Equação A.41, onde K_i representam constantes relativas a transmitância do holograma. A amplitude complexa total é dada pela Equação A.42 e a intensidade pode ser dada pela Equação A.43 e pela Equação A.44, na forma trigonométrica.

$$U_{OR} = -K_1 u_0(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \quad (A.40)$$

$$U_O = K_2 u_0(x, y) \exp i[\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)] \quad (A.41)$$

$$U_T = U_{OR} + U_O = K u_0(x, y) \exp i\phi[-1 + \exp i\Delta\phi(x, y)] \quad (A.42)$$

$$I = U_T U_T^* = K^2 u_0^2(x, y) [2 - \exp i\Delta\phi(x, y) - \exp(-i\Delta\phi(x, y))] \quad (A.43)$$

$$I = 2K u_0^2(x, y) [1 - \cos \Delta\phi] \quad (A.44)$$

A.2.3 Análise qualitativa das franjas de interferência

É possível avaliar os padrões de franjas de interferência e obter conclusões relacionadas a aplicações quando dados quantitativos são desnecessários, como por exemplo, para a localização de regiões de falha, efeitos de concentração de tensões ou modos de vibração.

Um dos principais usos da interferometria holográfica em engenharia é na detecção de vazios e falhas. Num padrão de franjas de interferência, tais regiões apresentam uma maior concentração de franjas, indicando sua localização. Como o objetivo é apenas detectar anomalias, a análise quantitativa é desnecessária. Caracteriza-se assim uma ferramenta de avaliação não-destrutiva que apresenta alta sensibilidade, além da capacidade de poder ser aplicada a objetos tridimensionais de formas complexas.

As análises qualitativas costumam se basear em padrões de comparação, ou seja, amostras conhecidas e livres de falhas são inicialmente analisadas obtendo-se um padrão de franjas. Em seguida, amostras com falhas conhecidas têm seu padrão de franjas obtido. Os padrões obtidos de ambas amostras podem ser comparados. Normalmente, os padrões de franjas para amostras boas são contínuos, já para amostras com danos as franjas são irregulares, quebradas ou agrupadas na região danificada. Um dos grandes problemas está em definir uma carga que crie um padrão de franjas com sensibilidade para as falhas de interesse.

A.2.4 Análise quantitativa das franjas de interferência

Antes de iniciar a discussão sobre a análise quantitativa das franjas de interferência, cabe tratar brevemente dos pequenos deslocamentos de superfície em um componente. A deformação de um ponto na superfície de um componente pode ser dada pela Equação A.45 na forma de notação indicial, onde d_i é a componente i da deformação e x_i o respectivo eixo coordenado.

$$\Delta d_i = \frac{\partial d_i}{\partial x_j} \Delta x_j \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (\text{A.45})$$

Os termos $\partial d_i / \partial x_j$ compõem um tensor de segunda ordem que caracteriza os gradientes de deslocamento da deformação do objeto, podendo ser representado pela Equação A.46. Além disso, as componentes da diagonal do tensor representam as deformações normais para cada componente, enquanto que os outros termos representam a deformação num ângulo entre o componente j e os outros dois eixos. É possível separar o tensor gradiente de deslocamentos em

dois tensores, sendo que um deles está relacionado às deformações angulares (ω_{ij}) e outro as deformações (ε_{ij}), conforme mostra a Equação A.47.

$$e_{ij} = \frac{\partial d_i}{\partial x_j} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (\text{A.46})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial d_i}{\partial x_j} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial d_i}{\partial x_j} + \frac{\partial d_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial d_i}{\partial x_j} - \frac{\partial d_j}{\partial x_i} \right) \\ \frac{\partial d_i}{\partial x_j} &= \varepsilon_{ij} + \omega_{ij} \end{aligned} \quad (\text{A.47})$$

Seja a geometria dada pela Figura A.6, onde um objeto D é iluminado por uma frente de onda plana incidente na direção $\vec{n}_o$. Um holograma H do objeto é gravado e a luz proveniente do objeto deslocado e não deslocado é visualizada em uma direção $\vec{n}_v$. O número de ordem de franja N é definido pela Equação A.48, onde ϕ_0 é a mudança de fase associada ao deslocamento ($\vec{d}$) do ponto. Vale lembrar que N é uma função contínua e não um inteiro.

$$N = \frac{\phi_0}{2\pi} = \frac{1}{\lambda} (\vec{n}_v - \vec{n}_o) \cdot \vec{d} \quad (\text{A.48})$$

A Equação A.48 pode ser reescrita na forma mostrada pela Equação A.49, onde o índice i indica a componente de cada grandeza. O vetor de sensibilidade C pode ser definido pela Equação A.50 e então a Equação A.48 pode ser reescrita como mostra a Equação A.51.

$$N\lambda = (n_i^v - n_i^o) d_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (\text{A.49})$$

$$C_i = n_i^v - n_i^o \quad (\text{A.50})$$

$$N\lambda = C_i d_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (\text{A.51})$$

Analisando-se a Equação A.51, nota-se que uma única medição de N não permite que o deslocamento $\vec{d}$ de um ponto seja determinado. É necessário obter três valores independentes de

N , um para cada conjunto de direções de visualização caso se necessite obter as três componentes do deslocamento. Os sinais de N também devem ser determinados. Tal análise pode ser bem complicada, no entanto, a interpretação das franjas pode ser simplificada ao se utilizar as relações entre os espaçamentos de franja e os deslocamentos, dadas pela equação de espaçamento de franja.

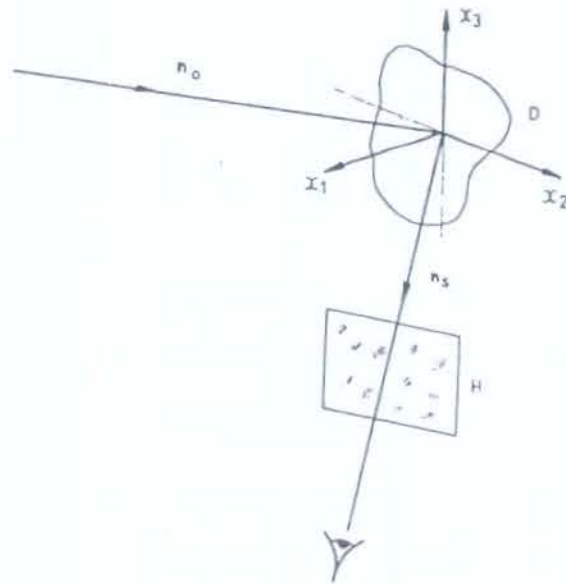


Figura A.6: Geometria para observação de franjas holográficas. (Jones e Wykes, 1989)

Um padrão de franjas estático não contém informações sobre o valor absoluto de N e mesmo valores relativos não podem ser determinados sem ambigüidades. Ao se utilizar da técnica tempo-real e observando-se o movimento da franjas conforme o deslocamento é aplicado, é possível determinar o valor de N . Para o método de dupla-exposição, somente é possível determinar N se sua variação for conhecida e simples, além de ser necessário conhecer um valor de N .

A magnitude de N pode ser obtida determinando-se o zero de N , dado pelo ponto em que não há deslocamento de franjas e então, a partir deste, contando-se o número de franjas. Para determinar o sinal aplica-se um pequeno incremento δN , de forma que o sinal será obtido conforme a Tabela A.1.

Tabela A.1: Guia para obtenção do sinal de N .

$\partial N / \partial x_j$	+	-
∂N	+	+
N	$-x_j$	x_j

A deformação do objeto faz com que as franjas converjam para um ponto ou linha que pode ou não estar na superfície do objeto, a magnitude de N pode ser determinada para um ponto e para uma carga de deformação contando-se o número de franjas que passa por esse ponto. O sinal de N pode ser obtido através da observação do movimento das franjas.

A.2.5 Localização das franjas

A análise quantitativa a partir dos vetores de sensibilidade incorpora uma suposição implícita de existência do efeito de paralaxe entre a imagem do objeto e as ondas percebidas. O efeito de paralaxe é facilmente observado na imagem que contém as franjas de interferência, evidenciando assim que estas não necessariamente se localizam na superfície do objeto, existindo em outros lugares do espaço. De fato, tal paralaxe é que permite a visualização das franjas de interferência a partir de diferentes direções para a obtenção do vetor deslocamento.

A.2.6 Plataforma para interferometria holográfica

Devido às restrições relacionadas ao método, é necessário que a plataforma que acomoda o aparato experimental mantenha uma estabilidade interferométrica. O maior desafio é isolar os componentes ópticos da sala e da vibração do ar. Dessa forma as plataformas para tal tipo de aplicação constituem-se, normalmente, de uma mesa rígida e pesada sobre um suporte que é amortecido, podendo haver diversas combinações possíveis. Plataformas específicas para a aplicação holográfica estão disponíveis no mercado.

A plataforma deveria estar localizada preferencialmente em uma sala que pudesse ser escurecida, livre de grandes variações térmicas e com correntes de ar minimizadas. Se necessário, pode ser construída uma caixa ao redor da mesa.

A.2.7 Mapeamento de perfis de superfície

A interferometria holográfica pode ser aplicada na determinação de perfis de superfície na forma de padrões de franjas de interferência representando linhas isométricas. Duas técnicas podem ser utilizadas para tal fim, uma delas consiste em utilizar um laser que gere luz coerente em dois comprimentos de onda diferentes, a outra utiliza um tanque de imersão.

Na técnica que utiliza o tanque, o objeto é colocado no tanque que deve possuir ao menos um lado translúcido, aquele é então recoberto com água. O sistema é deixado em repouso para que atinja o equilíbrio térmico. A interpretação quantitativa de dados é facilitada se o feixe objeto incidir normalmente ao lado translúcido do tanque e se tal feixe for colimado. Qualquer uma das técnicas dupla-exposição ou tempo-real podem ser utilizadas. Ao se utilizar a tempo-real, um holograma do objeto imerso é gravado; o índice de refração da água é modificado adicionando-se outro líquido com índice diferente esperando-se então até que o sistema entre em equilíbrio; caso esta mudança seja adequada, serão obtidas franjas de interferência.

A ordem de franja é uma função da geometria do sistema, distância do fluido até o objeto e mudança no índice de refração do meio. A sensibilidade pode ser calculada ou pode se utilizar objetos mais simples com perfis conhecidos para calibrar.

Caso se necessite de tentativa e erro para obtenção dos padrões de franja que possam ser analisados, conforme se acrescenta um líquido para modificar o índice de refração da água, a flexibilidade do método tempo-real vale a pena, apesar dos cuidados necessários na reposição do filme revelado.

A.3 Interferometria de speckles

As características apresentadas pelos padrões de *speckles* obtidos permitem que estes sejam utilizados de diversas formas como instrumentos de medição, sendo a interferometria entre os padrões uma dessas formas. Dentro da classificação de interferometria de padrões de *speckles*, é possível ainda obter-se dois grupos que tratam das duas principais técnicas ligadas ao método,

sendo estes: fotografia de *speckles* e interferometria por correlação de padrões de *speckles*. As técnicas apresentam em comum a obtenção de padrões de franjas gerados pela observação do objeto não-deslocado e deslocado. Existem dois principais fatores que distinguem uma técnica da outra, sendo que um deles é a sensibilidade quanto à magnitude dos deslocamentos e o outro é a presença de um feixe de referência.

A capacidade de se obter, através das franjas, deslocamentos locais, gradientes de deslocamentos ou a primeira derivada do gradiente de deslocamento, está relacionada ao método de gravação e obtenção das franjas. Além disso, a sensibilidade das franjas quanto à magnitude e direção para deslocamentos apresenta uma gama de aplicações mais vasta do que a possibilitada pela interferometria holográfica. Ainda, o meio de gravação não necessita de elevada resolução espacial. Estes fatores agrupados fazem com que a interferometria de *speckles* seja uma técnica mais flexível para medição de deslocamentos do que a interferometria holográfica, embora o contraste de franjas seja menor.

A.3.1 Fotografia de *speckles*

Uma vez que cada *speckle* apresenta características relacionadas a uma respectiva região do objeto, a maneira mais simples de se utilizá-lo é como um medidor microscópico. Ou seja, um movimento dessa região do objeto, dentro de certos limites e sem modificação no sistema ótico, irá causar um movimento no *speckle* equivalente. Caso o *speckle* seja gravado para esses dois estados, é possível relacionar o deslocamento deste ao deslocamento do objeto.

O processo de fotografia de *speckles* consiste basicamente na obtenção de um padrão de *speckles* em um filme fotográfico a partir de uma lente e ainda a superposição de um segundo padrão de *speckles* que formará neste filme uma fotografia de *speckle*. A sensibilidade quanto a deslocamentos tangenciais ou normais está diretamente relacionada ao aparato óptico utilizado. Ou seja, caso o filme fotográfico esteja localizado no plano em que a imagem do objeto é formada, ter-se-á sensibilidade para deslocamentos tangenciais. Já para o caso em que o filme fotográfico encontra-se em qualquer outra posição que não a da imagem do objeto, tem-se um padrão de *speckles* desfocado, onde a sensibilidade é normal em relação à superfície do objeto.

A análise pode ser realizada ponto-a-ponto ou para todo o campo obtido. Ela consiste em se obter o espaçamento obtido entre pares de *speckles* e então correlacioná-los através de parâmetros geométricos com o deslocamento no objeto.

Na análise ponto-a-ponto, a fotografia de *speckles* é iluminada por um feixe estreito de laser para que apenas uma pequena região do filme seja iluminada. Os *speckles* nessa região apresentam deslocamentos muito parecidos, de forma que o filme funcione como uma rede de difração com frequência espacial e espaçamentos definidos. Assim, ao ser iluminado, franjas características serão obtidas, de forma que a partir de seu espaçamento e direção é possível determinar o deslocamento dos *speckles* e então relacioná-lo ao deslocamento do respectivo ponto no objeto.

Já para a análise de campo, a idéia principal está em obter franjas que indiquem deslocamentos constantes. Para isso, ilumina-se o filme fotográfico, contendo os padrões de *speckles* para o objeto deformado e não-deformado, com uma frente de onda convergente, atingindo um plano de Fourier. Em tal plano se encontra um orifício que tem o intuito de funcionar com um filtro para frequências espaciais. Ou seja, apenas a luz difratada pelo filme fotográfico, relacionada a deslocamentos de *speckles*, que criam redes de difração de frequência espacial definida pelas características do orifício, será difratada por este e então uma imagem será formada após passar por uma segunda lente. Nesta imagem as franjas formadas indicarão os deslocamentos para cada ponto do objeto.

Uma das limitações do método está relacionada quanto aos cuidados que devem ser tomados na gravação dos padrões de *speckles*, uma vez que a relação entre o movimento do padrão de *speckles* no plano de gravação e o movimento do objeto é determinada pela localização do plano de gravação. Ou seja, caso o plano de gravação esteja mal localizado ou quando o foco varia de acordo com o campo de visualização, erros podem surgir. É possível minimizar tal efeito utilizando-se lentes de comprimentos focais maiores.

O deslocamento do objeto também impõe alguns limites. A observação de franjas em fotografia de *speckles* só é possível se o deslocamento do objeto for tal que o deslocamento do

padrão de *speckles* seja maior do que o tamanho de um *speckle*, tanto para os casos em que se tem sensibilidade tangencial quanto normal. Para medições de deslocamentos tangenciais, o deslocamento mínimo que gera franjas é dado pela Equação A.52, onde q_s é o tamanho do *speckle* e m é a ampliação do sistema de visualização.

$$d_{\min} > \frac{q_s}{m} \quad (\text{A.52})$$

Em relação ao tamanho do objeto, a área máxima de visualização é limitada apenas pela potência do laser utilizado. No entanto, para áreas muito extensas, onde a redução para a imagem é muito grande, podem ocorrer aberrações de lente. Áreas bem pequenas também podem ser analisadas, no entanto, apresentam grande dificuldade devido a maior influência do movimento de corpo rígido nas medições, necessitando de procedimentos de calibração mais cuidadosos.

A.3.2 Interferometria por correlação de padrões de *speckles*

Os processos que utilizam além do *speckle* do objeto, um feixe de referência ou outro padrão de *speckle* para que possam interferir definem processos conhecidos como interferometria por correlação de *speckles*. Estes processos permitem o uso um pouco mais sofisticado das informações contidas num *speckle*. Ao invés de utilizá-lo apenas como um marcador, busca-se utilizar as informações de fase contidas em cada *speckle* e a combinação coerente de campos de *speckles* como base de medição. Ao se utilizar um feixe de referência, o padrão de *speckle* obtido na imagem é diferente daquele que seria gerado pelo feixe de iluminação do objeto somente. O efeito de se adicionar um feixe de referência é fazer com que a diferença de fase entre este feixe e o refletido pelo objeto influa consideravelmente nos *speckles* obtidos. Além disso, essa modificação garante que as informações de mudança de fase vistas como franjas de correlação estejam intimamente ligadas às componentes de deslocamento do objeto.

Enquanto na fotografia de *speckles* é necessário que o tamanho dos *speckles* seja pequeno para que a sensibilidade seja melhorada, nos processos em que se utiliza um feixe de referência, a sensibilidade é afetada pela geometria do aparato e também pelo comprimento de onda da fonte.

Além disso, *speckles* de maiores tamanhos podem ser interessantes uma vez que aumentam o limite de perda de correlação. É importante ressaltar que caso se utilize meios eletrônicos para obtenção de imagens o tamanho do elemento detector também é importante em relação à perda de correlação.

O princípio de formação de franjas por correlação pode ser explicado baseando-se em um interferômetro com sensibilidade para deslocamentos normais à superfície do objeto. Seja o interferômetro mostrado na Figura A.7. Uma frente de onda plana U_0 atinge o separador de feixes (B), direcionando uma parte do feixe a D_1 e outra a D_2 , ambas com mesma intensidade. As frentes de onda refletidas por D_1 e D_2 interferem ao se recombinarem após passar por B , atravessando um conjunto lente-orifício e então sendo gravadas no plano imagem (I).

A distribuição de intensidade no plano de gravação será dada pela combinação entre os padrões de *speckles* relativos às duas superfícies D_1 e D_2 . Sejam as amplitudes complexas das frentes de onda relativas aos objetos D_1 e D_2 dadas pelas Equações A.53 e A.54, onde u_i é a amplitude e ψ_i é a fase relacionadas à respectiva onda i . Já a intensidade em um ponto da imagem será dada pela Equação A.55, onde I_i é a intensidade da onda i e $\Psi = \psi_1 - \psi_2$.

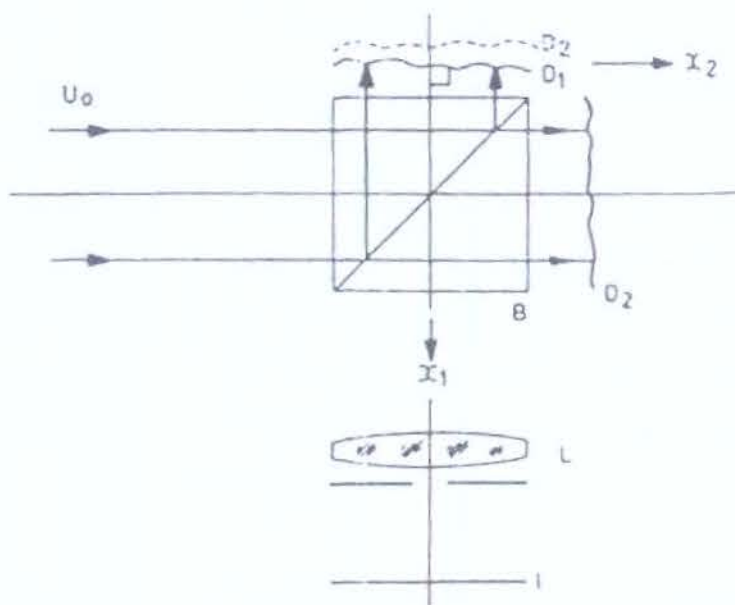


Figura A.7: Interferômetro com sensibilidade a deslocamentos superficiais normais. (Jones e Wykes, 1989).

$$U_1 = u_1 \exp i\psi_1 \quad (\text{A.53})$$

$$U_1 = u_1 \exp i\psi_1 \quad (\text{A.54})$$

$$I_{11} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Psi \quad (\text{A.55})$$

Caso D_1 seja deslocado de uma distância d_1 paralela a normal da superfície de D_1 , a mudança de fase resultante será dada pela Equação A.56, sendo a intensidade dada pela Equação A.57.

$$\Delta\phi(d_1) = 4\pi d_1 / \lambda \quad (\text{A.56})$$

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[\Psi - \Delta\phi(d_1)] \quad (\text{A.57})$$

Se os valores médios das intensidades relativas a cada uma das ondas estiverem relacionados por uma constante r , ou seja $\langle I_1 \rangle = r\langle I_2 \rangle$, o coeficiente de correlação entre as intensidades I_{11} e I_{12} será dada pela Equação A.58. Nota-se que este coeficiente será máximo quando a diferença de fase for dada pela Equação A.59 e mínimo quando seguir a Equação A.60, onde n é um inteiro.

$$\rho_{I_{11}I_{12}} = \frac{1 + r^2 + 2r \cos \Delta\phi}{(1 + r)^2} \quad (\text{A.58})$$

$$\Delta\phi = 2n\pi \quad (\text{A.59})$$

$$\Delta\phi = (2n + 1)\pi \quad (\text{A.60})$$

Dessa forma, máxima correlação ocorrerá quando deslocamentos dados pela Equação A.61 forem obtidos enquanto que mínima correlação ocorrerá quando deslocamentos dados pela Equação A.62 forem obtidos.

$$d_1 = \frac{1}{2}n\lambda \quad (\text{A.61})$$

$$d_1 = \frac{1}{2}\left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (\text{A.62})$$

O interferômetro descrito acima utiliza feixes onde as direções de visualização e iluminação são paralelas a normal. No entanto, para o caso em que estas ondas apresentam outras direções, a diferença de fase relacionada a um certo deslocamento será dada pela Equação A.63, baseada na Equação A.48. Note-se que tal equação apresenta um caso mais geral, onde pode se obter sensibilidades a deslocamentos normais ou tangenciais.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_v - \vec{n}_o) \cdot \vec{d} \quad (\text{A.63})$$

Um esquema alternativo ao apresentado pela Figura A.7 para se obter deslocamentos normais é apresentado na Figura A.8. O feixe de iluminação (U_0) incide sobre o objeto a um ângulo θ_i em relação a normal à superfície. As ondas refletidas pelo objeto D , após atravessarem um conjunto lente-orifício (L), irão se combinar com o feixe de referência esférico divergente (U_r) refletido pelo separador de feixes (B). A direção de visualização é normal à superfície.

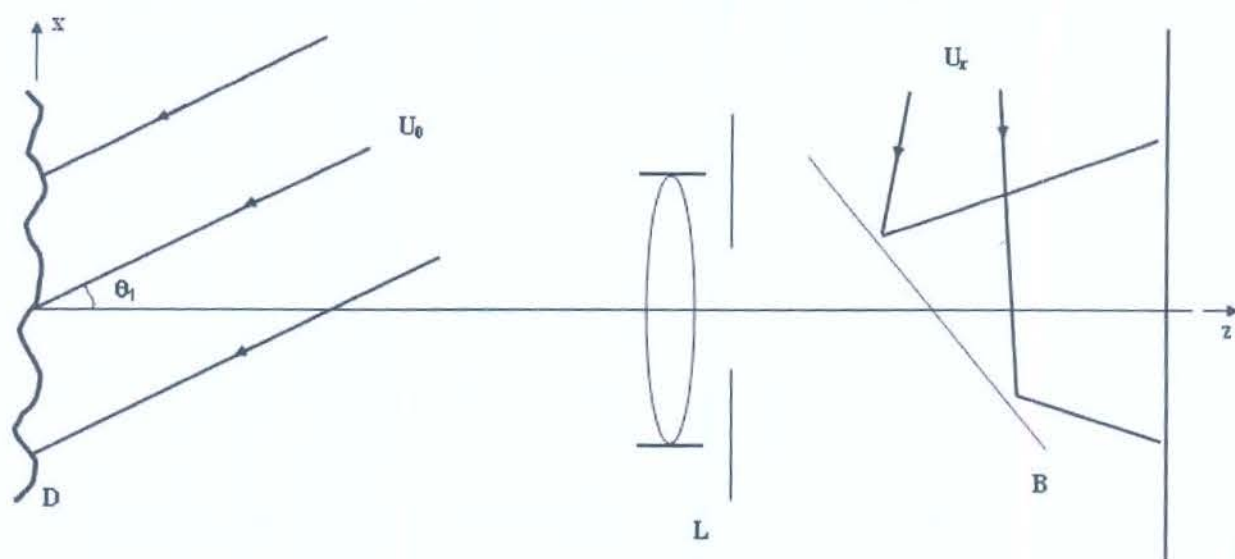


Figura A.8: Modelo para obtenção de deslocamentos normais. (Jones e Wykes, 1989).

Para um deslocamento na direção normal à superfície (Δ_z), tem-se a relação de fase expressa pela Equação A.64. Percebe-se que o ângulo do feixe de referência não afeta o resultado.

$$\Delta\phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)(1 + \cos\theta_1)\Delta_z \quad (\text{A.64})$$

Diversas aplicações de interferometria por correlação de *speckles* baseiam-se no aparato mostrado acima. No entanto, muitas vezes a sensibilidade deste modelo é muito alta para problemas práticos. Um outro arranjo que tem menor sensibilidade é ilustrado pela Figura A.9. Nesta utiliza-se dois feixes de iluminação U_1 e U_2 , a respectivos ângulos θ_1 e θ_2 em relação a normal à superfície. As ondas refletidas pelo objeto (D) atravessarão o conjunto lente-orifício (L), formando uma imagem no plano I . Qualquer movimentação do objeto irá alterar as fases de ambos os feixes, obtendo-se a relação expressa na Equação A.65.

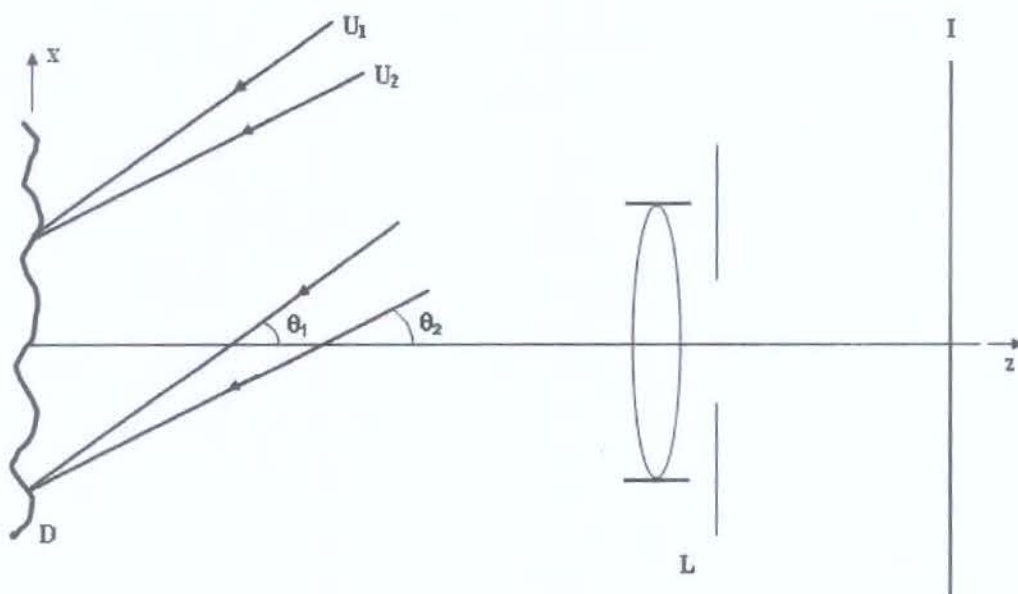


Figura A.9: Outro modelo para obtenção de deslocamentos normais. (Jones e Wykes, 1989).

$$\Delta\phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)(\cos\theta_{i1} - \cos\theta_{i2})\Delta_z \quad (\text{A.65})$$

Um arranjo para medição de deslocamentos tangenciais é apresentado na Figura A.10, este arranjo foi proposto por Leendertz (1970). O objeto encontra-se no plano xy sendo iluminado por dois feixes que apresentam uma diferença de fase γ . Os dois feixes incidem sobre ângulos iguais e opostos em relação ao eixo x .

A intensidade dada pela combinação entre os feixes num ponto qualquer da imagem pode ser expressa pela Equação A.66, onde I_i representa a intensidade do feixe i . Ao ser deslocado por $\vec{d} = (d_x, d_y, d_z)$, a intensidade resultante será dada pela Equação A.67.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \gamma \quad (\text{A.66})$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\gamma + \Delta\phi) \quad (\text{A.67})$$

As fases relativas de U_1 e U_2 são constantes ao longo de planos paralelos ao plano yz . Dessa forma, as componentes do deslocamento d_y e d_z não introduzirão mudança de fase. A partir da Equação A.63 é possível estabelecer uma relação entre a diferença de fase ($\Delta\phi$) e o deslocamento d_x , sendo esta expressa pela Equação A.68. As componentes de espaçamento de franjas Δx_x e Δx_y nas direções d_x e d_y , são obtidas a partir da Equação A.68, sendo apresentadas respectivamente pelas Equações A.69 e A.70.

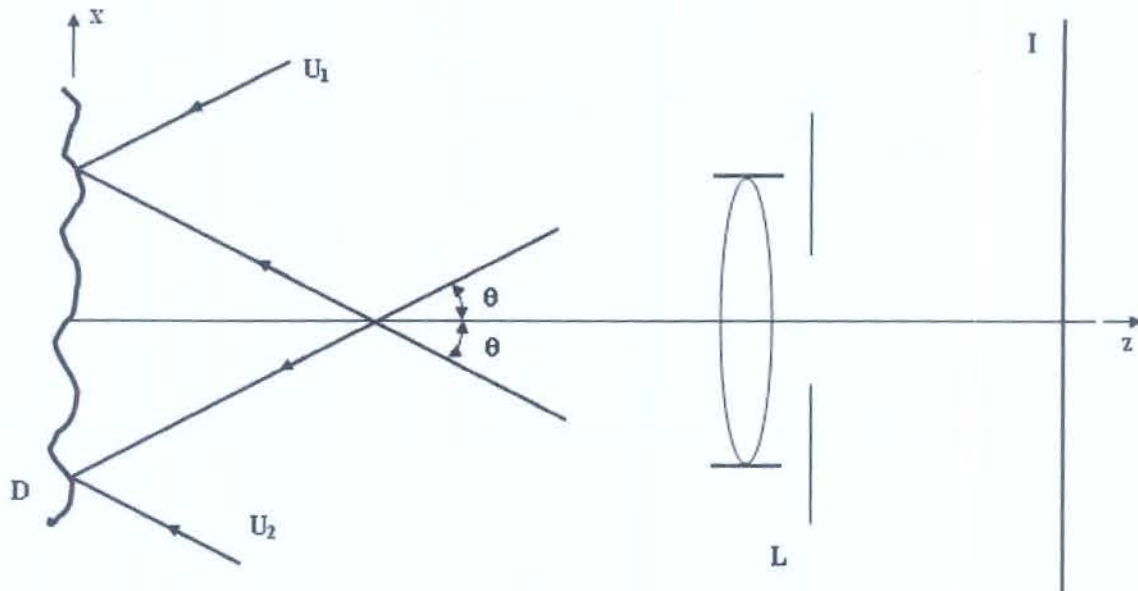


Figura A.10: Arranjo para medição de deslocamentos tangenciais. (Leendertz, 1970).

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} d_x \sin \theta \quad (\text{A.68})$$

$$\Delta x_x = \frac{2\pi}{\partial(\Delta\phi)/\partial x} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta d_{x,x}} \quad (\text{A.69})$$

$$\Delta x_y = \frac{2\pi}{\partial(\Delta\phi)/\partial y} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta d_{x,y}} \quad (\text{A.70})$$

Ao se utilizar uma iluminação equivalente a aplicada anteriormente, no entanto, sendo agora no plano yz , a relação de fase será expressa pela Equação A.71, enquanto que os espaçamentos de franja serão dados pelas Equações A.72 e A.73.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} d_y \sin \theta \quad (\text{A.71})$$

$$\Delta x_x = \frac{\lambda}{2 \sin \theta d_{y,x}} \quad (\text{A.72})$$

$$\Delta x_y = \frac{\lambda}{2 \sin \theta d_{y,y}} \quad (\text{A.73})$$

Nota-se que será necessária a iluminação através das duas geometrias para que se obtenham as duas componentes de deslocamento tangencial, além das componentes do tensor de tensões obtidas pelos espaçamentos de franjas. Um arranjo proposto por Jones e Leendertz (1974) elimina essa necessidade. Nesse caso, o objeto encontra-se no plano xy e é iluminado por um feixe propagando-se no plano xz e por outro que se propaga no plano yz , ambos a ângulos iguais (θ) em relação a normal. A visualização é normal à direção z . A relação entre a diferença de fase e os deslocamentos é dada pela Equação A.74 e as relações entre espaçamentos de franjas e componentes do tensor dadas pelas Equações A.75 e A.76.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (d_x - d_y) \sin \theta \quad (\text{A.74})$$

$$\Delta x_x = \frac{\lambda}{\sin \theta (d_{x,x} - d_{x,y})} \quad (\text{A.75})$$

$$\Delta x_y = \frac{\lambda}{\sin \theta (d_{x,y} - d_{y,y})} \quad (\text{A.76})$$

Os métodos baseados na interferometria por correlação de *speckles* a partir de fotografias apresentam problemas relacionados à visibilidade de franjas, além da necessidade de estabilidade do sistema ser elevada. Tais limitações deixaram a interferometria por correlação de *speckles* em desuso, até o advento da aquisição de imagens e processamento digital de imagens, iniciando-se assim os processos conhecidos como Interferometria Eletrônica entre Padrões de *Speckles*.

A.4 Mudança de fase para o aprimoramento da interferometria

Uma técnica interessante que permite melhorar a precisão, conveniência e utilidade de todos os processos interferométricos consiste na inserção de caminhos ópticos que provoquem mudanças de fase conhecidas. Dessa forma, aplicando tais mudanças é possível deduzir a fase exata para um ponto, através da medição de intensidade somente, sem haver a necessidade de se mapear franjas ou interpolar entre elas.

A interpretação dos dados contidos em franjas de interferometria baseia-se na análise de uma figura onde as franjas podem demonstrar a deflexão de uma estrutura; o formato de uma superfície; a deformação numa superfície ou o estado de tensão num objeto transparente. Para que esse padrão de franjas seja interpretado, é necessário que se conte as franjas e se multiplique o número de ordem de franja (N) por um fator que depende do comprimento de onda da luz utilizada, da geometria do sistema e possivelmente de algumas propriedades do material. Através de interpolações é possível se determinar o valor em qualquer ponto no campo. Existem diversas dificuldades relacionadas a interpretação de franjas, no entanto, ao se introduzir mudanças de fase conhecidas tais dificuldades podem ser superadas.

O uso de computadores para realizar o trabalho de encontrar uma franja e a partir desta numerar as restantes, torna-se pouco prático, uma vez os padrões de franjas são muito heterogêneos. Fica difícil a localização de centros de franjas e também de seus limites, através de métodos unicamente computacionais.

Uma forma mais eficiente de se utilizar o processamento de imagens computacional consiste em se basear nas informações de intensidade que podem facilmente ser adquiridas,

gravadas, processadas e então ter seus resultados apresentados. Para isso, deve-se conseguir todas as informações necessárias, apenas através dos padrões de intensidade. É nesse ponto que a idéia de mudança de fase pode ser empregada. A intensidade em um ponto no plano imagem de um interferômetro pode ser dada pela Equação A.88, onde I_R é a intensidade do feixe de referência; I_O é a intensidade do feixe de objeto e ϕ é a diferença de fase entre os feixes de referência e objeto.

$$I = I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos \phi \quad (\text{A.88})$$

Nota-se a presença de três valores desconhecidos: a intensidade do feixe de referência, a intensidade do feixe objeto e a diferença de fase entre estes feixes. Logo, no mínimo, três medições devem ser realizadas, para que três valores de I independentes sejam obtidos.

Além disso, existe uma dificuldade adicional quanto ao fato de se obter deslocamentos maiores do que metade ou que um comprimento de onda. Para deslocamentos entre $\lambda/2$ e λ , tem-se $\pi < \phi < 2\pi$, podendo estes serem resolvidos através dos devidos cuidados com os sinais das equações. Já para deslocamentos onde $\phi > 2\pi$, deve-se realizar uma etapa conhecida como desempacotamento de fase.

Existem diversas formas de se obter a fase de uma onda. Uma delas consiste em introduzir uma modulação de fase temporal e medir-se as intensidades dos padrões de *speckles* resultantes conforme se mudam as fases. A fase da onda original pode ser obtida com a ajuda de processamentos computacionais.

Em interferômetros, a modulação de fase temporal pode ser introduzida de diversas maneiras: movimentando um espelho; girando uma placa de vidro; movimentando uma rede; girando um polarizador ou utilizando um modulador acústico-óptico ou eletro-óptico. Atualmente, a técnica de mudança de fase mais comum é a que utiliza um espelho montado sobre um transdutor piezo-elétrico (PZT) no feixe de referência.

As voltagens obtidas nos foto-detecores de uma câmara estão relacionadas a intensidade média incidindo sobre o detector. Conforme a fase é variada (no feixe de referência, por exemplo) a voltagem de saída no detector deveria variar. No entanto, a relação entre o tamanho dos *speckles* e do elemento detector influencia nessa modulação, ou seja, caso os *speckles* sejam maiores que os elementos detectores a modulação será muito detalhada; caso os *speckles* sejam do mesmo tamanho que os elementos detectores a modulação será detalhada e, por último, caso os *speckles* sejam menores do que os elementos detectores, baixa ou nenhuma modulação será observada.

Existem dois algoritmos principais para obtenção da fase de uma onda, sendo um deles conhecido como técnica da integração, onde integra-se a intensidade enquanto a fase é variada, e o outro conhecido como técnica das etapas, onde aplica-se mudanças de fase conhecidas obtendo-se intensidades discretas relativas a tais mudanças. Apresentam-se três casos onde se aplica a técnica das etapas. No primeiro caso, tem-se o mínimo de passos necessários para determinação das três incógnitas. Já o segundo caso, apresenta o método mais comumente utilizado. O terceiro e último caso trata de um método onde torna-se desnecessário o conhecimento da mudança de fase a ser aplicada, diminuindo as calibrações necessárias.

A.4.1 Técnica dos três passos

Como a Equação A.88 apresenta três valores desconhecidos, um mínimo de três intensidades devem ser obtidas. Nesta técnica, obtém-se três medições de intensidade variando-se a fase em valores discretos. Dois casos são apresentados, sendo que cada um empregará uma mudança de fase.

No primeiro caso, utiliza-se uma mudança $\Delta = \pi/2$. Cada uma das intensidades pode ser dada pelas Equações A.89, A.90 e A.91, onde γ é a modulação de intensidade.

$$I_1(x, y) = I_0(x, y) \left(1 + \gamma \cos \left[\phi(x, y) + \frac{1}{4} \pi \right] \right) \quad (\text{A.89})$$

$$I_2(x, y) = I_0(x, y) \left(1 + \gamma \cos \left[\phi(x, y) + \frac{3}{4} \pi \right] \right) \quad (\text{A.90})$$

$$I_3(x, y) = I_0(x, y) \left(1 + \gamma \cos \left[\phi(x, y) + \frac{5}{4} \pi \right] \right) \quad (\text{A.91})$$

Quando se utiliza de passos discretos, tem-se que $\gamma = \gamma_0$. Dessa forma, a partir de manipulações algébricas, a diferença de fase entre os feixes de referência e iluminação para cada ponto é dada pela Equação A.92 e a modulação de fase pela Equação A.93.

$$\phi(x, y) = \arctan \left(\frac{I_3(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_2(x, y)} \right) \quad (\text{A.92})$$

$$\gamma(x, y) = \frac{\sqrt{[I_1(x, y) - I_2(x, y)]^2 + [I_2(x, y) - I_3(x, y)]^2}}{2I_0} \quad (\text{A.93})$$

Para o caso em que se tem uma mudança de fase de $2\pi/3$, a diferença de fase entre os feixes de referência e objeto é dada pela Equação A.94 e a modulação de intensidade pela Equação A.95.

$$\phi(x, y) = \arctan \left(\frac{\sqrt{3}I_3(x, y) - I_2(x, y)}{2I_1(x, y) - I_2(x, y) - I_3(x, y)} \right) \quad (\text{A.94})$$

$$\gamma(x, y) = \frac{\sqrt{3[I_1(x, y) - I_2(x, y)]^2 + [2I_1(x, y) - I_2(x, y) - I_3(x, y)]^2}}{2I_0} \quad (\text{A.95})$$

A.4.2 Técnica dos quatro passos

Esse é um algoritmo muito comum para cálculos de fase (Wyant, 1982). Tem a vantagem de que o ruído causado pelos *speckles* pode ser removido, criando melhoras na visualização de franjas (Creath, 1990).

Utilizando-se de uma mudança de fase $\Delta = \pi/2$, a modulação de amplitude é $\gamma = \gamma_0$ para o caso em que se tem medições discretas. Logo a diferença de fase entre os feixes objeto e de referência será dada pela Equação A.96, enquanto que a modulação de fase pela Equação A.97.

$$\phi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}\right) \quad (\text{A.96})$$

$$\gamma(x, y) = \frac{\sqrt{[I_4(x, y) - I_2(x, y)]^2 + [I_1(x, y) - I_3(x, y)]^2}}{2I_0} \quad (\text{A.97})$$

A.4.3 Técnica de Carré

Nas técnicas anteriores era necessário se conhecer a mudança de fase, seja pela calibração do dispositivo que causa a mudança ou medindo-se diretamente a quantidade da mudança. Carré (1966) desenvolveu uma técnica em que a mudança de fase não precisa ser conhecida, necessitando apenas ser constante entre medições consecutivas de intensidade. As Equações A.98, A.99, A.100 e A.101 apresentam as intensidades obtidas para quatro medições. A diferença de fase entre os feixes de referência e objeto é dada pela Equação A.102 e a modulação de intensidade pela Equação A.103.

$$I_1(x, y) = I_0(x, y) \left(1 + \gamma \cos \left[\phi(x, y) - \frac{3}{2} \alpha \right] \right) \quad (\text{A.98})$$

$$I_2(x, y) = I_0(x, y) \left(1 + \gamma \cos \left[\phi(x, y) - \frac{1}{2} \alpha \right] \right) \quad (\text{A.99})$$

$$I_3(x, y) = I_0(x, y) \left(1 + \gamma \cos \left[\phi(x, y) + \frac{1}{2} \alpha \right] \right) \quad (\text{A.100})$$

$$I_4(x, y) = I_0(x, y) \left(1 + \gamma \cos \left[\phi(x, y) + \frac{3}{2} \alpha \right] \right) \quad (\text{A.101})$$

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\sqrt{[3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)][(I_2 - I_3) + (I_1 - I_4)]}}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} \quad (\text{A.102})$$

$$\gamma(x,y)=\frac{1}{2I_0}\sqrt{\frac{[(I_2-I_3)+(I_1-I_4)]^2+[(I_2+I_3)-(I_1+I_4)]^2}{2}} \tag{A.103}$$

A.4.4 Desempacotamento de fase

Como os cálculos para determinação da diferença de fase envolvem a determinação de arco-tangentes, a equação fica restrita a obtenção de ângulos variando entre 0 e π . Para que tais resultados sejam estendidos a obtenção de valores entre 0 e 2π , deve se analisar os sinais das quantidades proporcionais a $\text{sen}\phi$ e $\text{cos}\phi$. Este é o processo de desempacotamento de fase, que pode ser aplicado a todas as técnicas anteriores, exceto Carré. A Tabela A.2 mostra como se obter a fase, analisando-se os sinais de numerador e denominador.

Tabela A.2: Guia para obtenção do sinal de ϕ .

Numerador $\text{sen } \phi$	Denominador $\text{cos } \phi$	Fase ajustada	Intervalo de valores de fase
Positivo	Positivo	ϕ	$\left]0,\frac{1}{2}\pi\right[$
Positivo	Negativo	$\pi-\phi$	$\left]\frac{1}{2}\pi,\pi\right[$
Negativo	Negativo	$\pi+\phi$	$\left]\pi,\frac{3}{2}\pi\right[$
Negativo	Positivo	$2\pi-\phi$	$\left]\frac{3}{2}\pi,2\pi\right[$
0	Qualquer	π	π
Positivo	0	$\frac{1}{2}\pi$	$\frac{1}{2}\pi$
Negativo	0	$\frac{3}{2}\pi$	$\frac{3}{2}\pi$

Qualquer processo de desempacotamento de fase necessita de um ponto de referência ou ponto de partida. Caso o ponto de referência seja um ponto fixo, a fase calculada será absoluta, caso contrário um valor relativo será obtido.

Para se calcular o deslocamento, as fases antes e depois deste devem ser subtraídas. Os valores, para este caso, já passaram pelo processo de desempacotamento. Dessa forma, a diferença de fase pode ser calculada pela Equação A.104, enquanto a conversão de diferença de fase para deslocamento é dada pela Equação A.105, onde θ_i e θ_v são os ângulos de incidência e visualização, respectivamente.

$$\Delta\phi(x, y) = \phi_2(x, y) - \phi_1(x, y) \quad (\text{A.104})$$

$$d_z(x, y) = \frac{\Delta\phi(x, y)\lambda}{2\pi(\cos\theta_i - \cos\theta_v)} \quad (\text{A.105})$$

Apêndice B

B.1 Equacionamento das estimativas dos fatores – placa plana

Os resultados da Tabela 4.3 podem ser reorganizados de acordo com os níveis de seus respectivos fatores de acordo com a Tabela B.1, onde uma letra minúscula indica que o respectivo fator encontra-se em seu nível alto, enquanto que nenhuma letra significa que está no nível baixo. A partir destes valores desenvolvem-se as estimativas para os fatores e algumas de suas combinações, dadas pelas Equações B.1 a B.7.

Tabela B.1: Resultados reorganizados.

Ensaio	Fatores e Níveis				Tensão Von Mises [MPa]		Total
	A	B	C	D	Réplica 1	Réplica 2	
1 e 2	-	-	-	-	7,547	11,009	(1) = 18,556
3 e 4	+	-	-	+	6,015	6,355	ad = 12,370
5 e 6	-	+	-	+	13,732	14,130	bd = 27,862
7 e 8	+	+	-	-	13,051	14,981	ab = 28,032
9 e 10	-	-	+	+	6,072	5,845	cd = 11,916
11 e 12	+	-	+	-	7,377	8,682	ac = 16,059
13 e 14	-	+	+	-	13,165	14,981	bc = 28,146
15 e 16	+	+	+	+	11,576	11,349	abcd = 22,925

$$[A] = \frac{1}{4n}[-(1) + ad - bd + ab - cd + ac - bc + abcd] = -0,8866 \tag{B.1}$$

$$[B] = \frac{1}{4n}[-(1) - ad + bd + ab - cd - ac + bc + abcd] = 6,0079 \tag{B.2}$$

$$[C] = \frac{1}{4n} [-(1) - ad - bd - ab + cd + ac + bc + abcd] = -0,9718 \quad (B.3)$$

$$[D] = \frac{1}{4n} [-(1) + ad + bd - ab + cd - ac - bc + abcd] = -1,9648 \quad (B.4)$$

$$[AB] = \frac{1}{4n} [(1) - ad - bd + ab + cd - ac - bc + abcd] = -0,3759 \quad (B.5)$$

$$[AC] = \frac{1}{4n} [(1) - ad + bd - ab - cd + ac - bc + abcd] = 0,6171 \quad (B.6)$$

$$[AD] = \frac{1}{4n} [(1) + ad - bd - ab - cd - ac + bc + abcd] = -0,2341 \quad (B.7)$$

B.2 Equacionamento da análise de variâncias – placa plana

B.2.1 Somas de quadrados

$$SS_A = \frac{1}{8n} [-(1) + ad - bd + ab - cd + ac - bc + abcd]^2 = 3,1445 \quad (B.8)$$

$$SS_B = \frac{1}{8n} [-(1) - ad + bd + ab - cd - ac + bc + abcd]^2 = 144,3794 \quad (B.9)$$

$$SS_C = \frac{1}{8n} [-(1) - ad - bd - ab + cd + ac + bc + abcd]^2 = 3,7773 \quad (B.10)$$

$$SS_D = \frac{1}{8n} [-(1) + ad + bd - ab + cd - ac - bc + abcd]^2 = 15,4418 \quad (B.11)$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{8n} [(1) - ad - bd + ab + cd - ac - bc + abcd]^2 = 0,5653 \quad (B.12)$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{8n} [(1) - ad + bd - ab - cd + ac - bc + abcd]^2 = 1,5233 \quad (B.13)$$

$$SS_{AD} = \frac{1}{8n} [-(1) + ad - bd + ab - cd + ac - bc + abcd]^2 = 0,2192 \quad (B.14)$$

$$SS_{TOTAL} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 y_{ijkl}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} = 175,5915 \quad (B.15)$$

$$SS_{ERRO} = SS_{TOTAL} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{AD} = 10,5407 \quad (B.16)$$

B.2.2 Graus de Liberdade (DOF – degrees of freedom)

$$DOF_A = a - 1 = 1 \quad (B.17)$$

$$DOF_B = b - 1 = 1 \quad (B.18)$$

$$DOF_C = c - 1 = 1 \quad (B.19)$$

$$DOF_D = d - 1 = 1 \quad (B.20)$$

$$DOF_{AB} = (a - 1)(b - 1) = 1 \quad (B.21)$$

$$DOF_{AC} = (a - 1)(c - 1) = 1 \quad (B.22)$$

$$DOF_{AD} = (a - 1)(d - 1) = 1 \quad (B.23)$$

$$DOF_{TOTAL} = abcd - 1 = 15 \quad (B.24)$$

$$\begin{aligned} DOF_{ERRO} &= DOF_{TOTAL} - DOF_A - DOF_B - DOF_C - DOF_D \\ &\quad - DOF_{AB} - DOF_{AC} - DOF_{AD} \\ &= 8 \end{aligned} \quad (B.25)$$

B.2.3 Médias quadráticas

$$MS_A = \frac{SS_A}{DOF_A} = 3,1445 \quad (B.26)$$

$$MS_B = \frac{SS_B}{DOF_B} = 144,3794 \quad (B.27)$$

$$MS_C = \frac{SS_C}{DOF_C} = 3,7773 \quad (B.28)$$

$$MS_D = \frac{SS_D}{DOF_D} = 15,4418 \quad (B.29)$$

$$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{DOF_{AB}} = 0,5653 \quad (B.30)$$

$$MS_{AC} = \frac{SS_{AC}}{DOF_{AC}} = 1,5233 \quad (B.31)$$

$$MS_{AD} = \frac{SS_{AD}}{DOF_{AD}} = 0,2192 \quad (B.32)$$

$$MS_{TOTAL} = \frac{SS_{TOTAL}}{DOF_{TOTAL}} = 11,9728 \quad (B.33)$$

$$MS_{ERRO} = \frac{SS_{ERRO}}{DOF_{ERRO}} = 1,3176 \quad (B.34)$$

B.2.4 Estimadores F0

$$F_{0A} = \frac{MS_A}{MS_{ERRO}} = 2,3866 \quad (B.35)$$

$$F_{0B} = \frac{MS_B}{MS_{ERRO}} = 109,5783 \quad (B.36)$$

$$F_{0C} = \frac{MS_C}{MS_{ERRO}} = 2,8668 \quad (B.37)$$

$$F_{0D} = \frac{MS_D}{MS_{ERRO}} = 11,7197 \quad (B.38)$$

$$F_{0AB} = \frac{MS_{AB}}{MS_{ERRO}} = 0,4291 \quad (B.39)$$

$$F_{0AC} = \frac{MS_{AC}}{MS_{ERRO}} = 1,1561 \quad (B.40)$$

$$F_{0AD} = \frac{MS_{AD}}{MS_{ERRO}} = 0,1663 \quad (B.41)$$

Os resultados para os *p-values* foram obtidos diretamente do software Excel[®].

B.3 Análise pela metodologia de Taguchi

$$\bar{y} = \frac{y_{E+} + y_{E-}}{2} \quad (B.42)$$

$$S = desvpad(y_{E+}, y_{E-}) \quad (B.43)$$

B.4 Equacionamento da análise de variâncias – virabrequim

B.4.1 Somas de quadrados

O efeito A apresenta três níveis, logo $a = 3$. Já o efeito B apresenta dois níveis, sendo $b = 2$. Tem-se um total de $n = 3$ réplicas. Desenvolve-se abaixo as equações para obtenção das somas de quadrados, notando que o subscrito “.” indica uma somatória dos resultados nesse índice. Cada resultado pode ser dado pela expressão da Equação (B.44).

$$y_{ijk} \begin{cases} i = [1, a] \\ j = [1, b] \\ k = [1, n] \end{cases} \quad (B.44)$$

Dessa forma, tem-se as somas de quadrados dos efeitos, dadas pelas Equações B.45 à B.49.

$$SS_A = \frac{1}{bn} \left[\sum_{i=1}^{a=3} (y_{i..}^2) \right] - \frac{y_{...}^2}{abn} = 4,8701 \quad (B.45)$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \left[\sum_{j=1}^{b=2} (y_{.j.}^2) \right] - \frac{y_{...}^2}{abn} = 0,0043 \quad (B.46)$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^{a=3} \sum_{j=1}^{b=2} (y_{ij.}^2) \right] - \frac{y_{...}^2}{abn} - SS_A - SS_B = 0,1343 \quad (B.47)$$

$$SS_{TOTAL} = \left[\sum_{i=1}^{a=3} \sum_{j=1}^{b=2} \sum_{k=1}^{n=3} (y_{ijk}^2) \right] - \frac{y_{...}^2}{abn} = 5,6897 \quad (B.48)$$

$$SS_{ERRO} = SS_{TOTAL} - SS_A - SS_B - SS_{AB} = 0,6810 \quad (B.49)$$

B.4.2 Graus de Liberdade (DOF – degrees of freedom)

$$DOF_A = a - 1 = 2 \quad (B.50)$$

$$DOF_B = b - 1 = 1 \quad (B.51)$$

$$DOF_{AB} = (a - 1)(b - 1) = 2 \quad (B.52)$$

$$DOF_{TOTAL} = abn - 1 = 17 \quad (B.53)$$

$$DOF_{ERRO} = DOF_{TOTAL} - DOF_A - DOF_B - DOF_{AB} = 12 \quad (B.54)$$

B.4.3 Médias quadráticas

$$MS_A = \frac{SS_A}{DOF_A} = 2,4350 \quad (B.55)$$

$$MS_B = \frac{SS_B}{DOF_B} = 0,0043 \quad (B.56)$$

$$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{DOF_{AB}} = 0,0672 \quad (B.57)$$

$$MS_{TOTAL} = \frac{SS_{TOTAL}}{DOF_{TOTAL}} = 0,3347 \quad (B.58)$$

$$MS_{ERRO} = \frac{SS_{ERRO}}{DOF_{ERRO}} = 0,0568 \quad (B.59)$$

B.4.4 Estimadores F_0

$$F_{0A} = \frac{MS_A}{MS_{ERRO}} = 42,9072 \quad (B.60)$$

$$F_{0B} = \frac{MS_B}{MS_{ERRO}} = 0,0751 \quad (B.61)$$

$$F_{0AB} = \frac{MS_{AB}}{MS_{ERRO}} = 1,1833 \quad (B.63)$$

Os resultados para os *p-values* foram obtidos diretamente do software Excel[®].



