



Bruno Filipe Vaz

# **Medição de Tensões em Bielas Utilizando Interferometria Laser**

93/2012

Campinas  
2012



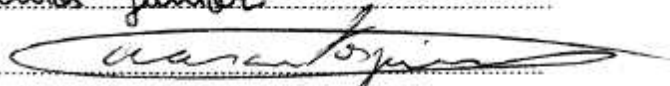
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Bruno Filipe Vaz

# **Medição de Tensões em Bielas Utilizando Interferometria Laser**

Orientador: Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Junior

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO  
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO  
ALUNO... Bruno Filipe Vaz ...  
E ORIENTADO PELO  
PROF. DR. Auteliano Antunes dos  
Santos Junior ...  
  
ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS, 2012

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

V477m Vaz, Bruno Filipe  
Medição de tensões em bielas utilizando  
interferometria laser / Bruno Filipe Vaz. --Campinas, SP:  
[s.n.], 2012.

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

1. Interferometria. 2. Medidores de tensão. 3. Testes  
não-destrutivos. 4. Análise de variância. 5. Análise de  
variâncias. I. Santos Junior, Auteliano Antunes dos,  
1963-. II. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Stress measurement in rods using laser interferometry

Palavras-chave em Inglês: Interferometry, Stress measurement, Non-destructive  
testing, Analysis of variances

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Pedro Paulo Balestrassi, Renato Pavanello

Data da defesa: 09-08-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

## Medição de Tensões em Bielas Utilizando Interferometria Laser

Autor: Bruno Filipe Vaz

Orientador: Auteliano Antunes dos Santos Junior

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



---

Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Junior, Presidente  
DPM/FEM/UNICAMP



---

Prof. Dr. Renato Pavanello  
DMC/FEM/UNICAMP



---

Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi  
IEPG/UNIFEI

Campinas, 9 de agosto de 2012

Dedico este trabalho aos meus pais por todo o apoio que recebi ao longo da minha vida.  
Mesmo estando longe os sentimentos de proteção, amor e carinho nunca estão ausentes.

## **Agradecimentos**

Para a realização desse trabalho, algumas pessoas foram imprescindíveis, às quais eu agradeço:

Aos meus pais, por todo o apoio.

Ao meu orientador pelas oportunidades, pelo apoio e pela motivação e suporte que me ofereceu.

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

Gostaria de agradecer também a colaboração a colaboração dos Engs. Alex Rodrigues, Élcio Ferracini, Rafael Augusto, Sergio Villalva, da ThyssenKrupp pela ajuda e colaboração.

À Sra. Gisleiva Ferreira pela ajuda e apoio durante a realização dos ensaios.

*“É melhor tentar e falhar,  
que preocupar-se e ver a vida passar;  
é melhor tentar, ainda que em vão,  
que sentar-se fazendo nada até o final.  
Eu prefiro na chuva caminhar,  
que em dias tristes em casa me esconder.  
Prefiro ser feliz, embora louco,  
que em conformidade viver ...”*

Martin Luther King

## Resumo

Bielas falham quando submetidas a esforços que ultrapassam seu limite de escoamento. Esses elementos são projetados para suportar tanto esforços em tração quanto em compressão, embora os últimos sejam mais intensos. Para a criação de novas bielas, engenheiros fazem uso de análises de elementos finitos para validar seus desenhos, mas mesmo assim os desenhos atuais dessas peças seguem os modelos desenvolvidos décadas atrás. A validação das análises computacionais dos modelos é feita através de ensaios destrutivos ou medições e análises do produto em uso regular. Engenheiros de desenvolvimento e de testes seriam muito beneficiados por uma ferramenta de ensaios não destrutivos que possibilitassem validar resultados obtidos numericamente rapidamente e a um custo menor que os ensaios tradicionais. A obtenção de campos de tensão pode ser feita através de diversos métodos, dentre os quais se destaca como o mais amplamente utilizado o uso de *strain-gauges*. Este trabalho avalia o uso do método de medição de tensões em bielas por interferência de padrões de speckle, também conhecido como *Electronic Speckle Pattern Interferometry* (ESPI). As tensões medidas na região plana da alma da biela são comparadas com resultados de elementos finitos. Essa região corresponde à porção interior da alma, excluindo-se as regiões de borda que possuem uma espessura maior. Baseando-se nos conceitos de delineamento de experimentos – DoE (*Design of Experiments*), foi feito um planejamento dos experimentos com a finalidade de encontrar uma configuração de medições que elimine, ou ao menos minimize a influência de fatores incontroláveis (ruídos). Os ensaios foram realizados em uma biela forjada submetida a esforços compressivos. Concluindo o trabalho foi mostrado que os campos de tensão obtidos pela técnica ESPI estavam em acordo com os resultados obtidos pelo método de elementos finitos, ressaltando assim a utilidade e os benefícios da aplicação da técnica no desenvolvimento de novos produtos que visam um aumento da segurança em componentes de motores.

*Palavras chave:* Interferometria, medidores de tensão, testes não-destrutivos, análise de variância.



## Abstract

Conrods fail when submitted to stresses higher than its yield limit. They are designed to support both compressive and tractive forces, although the first is usually more intense. Engineers use Finite Element simulations to create new shapes, but the main design still follows the one developed several decades ago. The validation of the results is usually performed through destructive tests or field evaluation. Test Engineers and Designers would benefit of a non-destructive tool that would expedite the validation and cost much less than conventional tests. Several possible methods to obtain the stress field of a part might be used, among which the best known and widespread is the use of strain gauges. In this work we evaluate the application of Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) to measure stresses in conrods in substitution to the classical techniques. The measurements are performed in the flat surface of the conrod and the results compared with those from Finite Elements simulations. This region corresponds to the inner portion of the rod body, excluding only the edges of it that are slightly thicker. An experimental design was developed, based mainly on the concepts of Design of Experiments – DOE, to eliminate or at least reduce the influence of the uncontrollable factors (noise) over the results. The tests were performed with a conventional forged connecting rod submitted to compressive efforts. In conclusion, we showed that the measurements of the stress and strain fields obtained by the ESPI technique are in accordance with the simulations and that this technique is a very useful tool for design engineers, improving the safety and reducing the development cycle in engine applications.

*Key Words:* Interferometry, Stress measurement, Non-destructive testing, Analysis of variances.

## Lista de figuras

Figura 2.1 – Dispositivo pistão biela manivela. ....	6
Figura 2.2 – Formação de uma onda plana.....	10
Figura 2.3 – Formação da frente de onda esférica.....	11
Figura 2.4 – Conversão das frentes de onda.....	11
Figura 2.5 – Formação de interferência através de dois feixes de ondas planas interferindo obliquamente. ....	14
Figura 2.6 – Difração através de uma abertura a) Passagem de um feixe paralelo por uma abertura; b) Formação das novas frentes de onda.....	15
Figura 2.7 – Difração a) Fresnel; b) Fraunhofer.....	15
Figura 2.8 – Holografia a) gravação e b) reconstrução da imagem.....	17
Figura 2.9 – Holograma visto de diferentes ângulos. Diferença de perspectiva. ....	17
Figura 2.10 – Formação de franjas em holografia de tempo real. ....	19
Figura 2.11 – Formação de franjas por holografia de um objeto com superfície refletiva difusa. ....	22
Figura 2.12 – Diferença de fase em um padrão de interferência.....	23
Figura 2.13 – Utilização da técnica de hologramas “sandwich”. ....	26
Figura 2.14 – Objeto tridimensional com a representação de franjas advindas da deformação....	28
Figura 2.15 – a) Imagem feita com iluminação laser de uma superfície ópticamente rugosa b) Formação do efeito speckle. ....	30
Figura 2.16 – Densidade de probabilidade das intensidades em um padrão completamente desenvolvido de speckles.....	33
Figura 2.17 – Densidade de probabilidade das intensidades para uma combinação coerente de padrões de speckle. ....	34
Figura 2.18 – Arranjo básico gravação de uma imagem de speckle plana.....	35
Figura 2.19 – a) Formação das franjas de Young a partir de um padrão de speckles b) Relação entre a distância entre um par de speckles e as franjas de Young. ....	37
Figura 2.20 – Conceito de aparecimento de speckles a) sem feixe de referência b) com feixe de referência. ....	39
Figura 2.21 – Montagem básica para o método da dupla exposição.....	40

Figura 2.22 – Arranjo para medições fora do plano. ....	42
Figura 2.23 – Arranjos alternativos para medições no plano. ....	44
Figura 2.24 – Geometria para um arranjo com feixe de referência. ....	53
Figura 2.25 – Montagem simples para deslocamento de fase ..... 56	56
Figura 2.26 – Saída do detector como função do deslocamento de fase. ....	56
Figura 3.1 – Laboratório de ensaios mecânicos utilizado para os testes. ....	67
Figura 3.2 – Dispositivo de tração/compressão utilizado nos testes. ....	67
Figura 3.3 – Dispositivo ESPI a) CPU, aquisição de dados e interface; b) Fonte laser; c) Braços extensores; d) Fixador. ....	69
Figura 3.4 – Dispositivo de acoplamento a) Olhal menor; b) Olhal maior; c) Biela.....	70
Figura 3.5 – Método de medição. ....	74
Figura 3.6 – Generalização de um processo ou sistema. ....	76
Figura 4.1 – Carta de controle para as variáveis de controle do planejamento. ....	94
Figura 4.2 – Efeito dos níveis na média e na relação sinal-ruído. ....	102
Figura 4.3 – Função utilidade para a média e o desvio padrão. ....	106
Figura 4.4 – Biela forjada modelo Cummins utilizada nos experimentos.....	107
Figura 4.5 – Seção transversal da alma da biela. ....	108
Figura 4.6 – Tensão equivalente ao longo da alma da biela para 10 kN. ....	112
Figura 4.7 – Tensão equivalente ao longo da alma da biela para 20 kN. ....	113
Figura 4.8 – Tensão equivalente ao longo da alma da biela para 30 kN. ....	113
Figura 4.9 – Modelo simplificado da biela em perspectiva.....	114
Figura 4.10 – Modelo do conjunto biela mais fixador usado nas simulações. ....	115
Figura 4.11 – Tensões equivalentes obtidas de para carregamento de 10 kN. ....	115
Figura 4.12 – Tensões equivalentes obtidas de para carregamento de 20 kN. ....	116
Figura 4.13 – Tensões equivalentes obtidas de para carregamento de 30 kN. ....	116
Figura 4.14 – Mapas de fase para cargas de a) 10 kN, b) 20 e c) 30 kN.....	119
Figura 4.15 – Tensão principal ( $\sigma_1$ ) para carga de 10 kN.....	120
Figura 4.16 – Tensão principal ( $\sigma_1$ ) para carga de 20 kN.....	120
Figura 4.17 – Tensão principal ( $\sigma_1$ ) para carga de 30 kN.....	121
Figura 4.18 – Tensão equivalente para carga de 10 kN.....	122
Figura 4.19 – Tensão equivalente para carga de 20 kN.....	122

Figura 4.20 – Tensão equivalente para carga de 30 kN.....	123
Figura 4.21 – Perfil de tensões equivalentes para um carregamento de 10 kN.....	124
Figura 4.22 – Perfil de tensões equivalentes para um carregamento de 20 kN.....	124
Figura 4.23 – Perfil de tensões equivalentes para um carregamento de 30 kN.....	125
Figura A.1 – Elemento linear RS deslocado por R'S'.....	137
Figura A.2 – Elemento bidimensional PQ e seu deslocamento.....	138

## Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Dimensões Principais biela.....	71
Tabela 3.2 - Propriedades físicas e composição química do aço SAE 1040.....	71
Tabela 3.3 – Variáveis de controle agrupadas por origem. ....	82
Tabela 3.4 – Fontes de variabilidade no sistema.....	86
Tabela 3.5 – Fatores de projeto e de variabilidade e seus níveis.....	87
Tabela 3.6 – Arranjos experimentais para um ensaio $2^4$ .....	90
Tabela 3.7 – Aleatorização dos experimentos.....	91
Tabela 4.1 – Tensões equivalentes em cada sequência de medição para os diferentes níveis das variáveis.....	93
Tabela 4.2 – Resumo dos valores medidos com as respectivas médias e desvio padrão. ....	95
Tabela 4.3 – Efeito de cada fator de interesse e suas interações para média e desvio padrão. ....	96
Tabela 4.4 – Soma dos quadrados, média quadrática, estimadores e p-value para o experimento, para média das tensões. ....	100
Tabela 4.5 – Análise do Planejamento de Taguchi. ....	103
Tabela 4.6 – Pesos e metas da função <i>desirability</i> . ....	104
Tabela 4.7 – Resumo das entradas da função <i>desirability</i> .....	105
Tabela 4.8 – Níveis dos fatores de interesse escolhidos.....	109
Tabela 4.9 – Nível de tensão esperado para as diferentes cargas aplicadas. ....	111
Tabela 4.10 – Diferença entre os resultados obtidos das simulações do modelo completo e simplificado .....	117
Tabela 4.11 – Média das tensões equivalentes medidas e desvios padrões para todos os carregamentos.....	126
Tabela 4.12 – Comparação entre os valores medidos e esperados das tensões equivalentes.....	126

## Lista de símbolos

### Letras Latinas

A – Amplitude de onde eletromagnética.	[-]
B – Campo magnético.	[A/m]
<b>B</b> – Vetor indução magnética.	[-]
Br – Brilho na imagem.	[-]
<b>C</b> – Vetor de sensibilidade.	[-]
c – Velocidade da luz no vácuo.	[m/s]
d – Deslocamento.	[mm]
D – Diâmetro.	[mm]
<b>D</b> – Vetor deslocamento elétrico.	[-]
E – Módulo de elasticidade de Young.	[GPa]
f – Frequência.	[Hz]
I – Intensidade luminosa.	[-]
<b>J</b> – Vetor densidade de corrente.	[-]
K – Constante.	[-]
k – Constante.	[-]
M – Magnificação.	[-]
U – Amplitude de onda num ponto.	[-]
u – Deslocamento em relação a direção $x$ .	[mm]
v – Deslocamento em relação a direção $y$ .	[mm]
V – Voltagem da CCD.	[Volts]
x – Direção, eixo coordenado.	[-]
y – Direção, eixo coordenado.	[-]
z – Direção, eixo coordenado.	[-]

### Letras Gregas

$\rho$ – Densidade de carga elétrica.	[A/m <sup>2</sup> ]
---------------------------------------	---------------------

$\varepsilon$ – Constante dielétrica.	[-]
$\mu$ – Permeabilidade magnética.	[N/A <sup>2</sup> ]
$\omega$ – Frequência angular.	[rad/s]
$\gamma$ – Modulação de fase.	[-]
$\varepsilon$ – Deformação.	[-]
$\theta$ – Inclinação de feixe.	[rad]
$\kappa$ – Contraste de feixe.	[-]
$\lambda$ – Comprimento de onda.	[nm]
$\nu$ – Coeficiente de Poisson.	[-]
$\sigma$ – Tensão.	[MPa]
$\phi$ – Fase de onda.	[rad]
$\psi$ – Diferença de fase.	[rad]

## Símbolos e Abreviaturas

**CCD** – Dispositivo de Carga acoplada (*Charge-Coupled Device*).

**ESPI** – Interferometria por correlação de padrões de *speckles* (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*).

**PZT** – Transdutor piezo elétrico.

**ISTRA** – Software de processamento utilizado.

**.BER** – Formato de saída do arquivo de borda utilizado.

**.INI** – Formato de dados do ISTRA

**FD** – Fatores de influência.

**MC** – Fatores mantidos constantes.

**LV** – Fatores livres para variar.

**FC** – Fatores controláveis de variabilidade.

**FI** – Fatores incontroláveis.

**FR** – Fator de ruído.

**<>** – Média temporal.

# Sumário

Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vii
Abstract.....	viii
Lista de figuras .....	ix
Lista de tabelas .....	xii
Lista de símbolos .....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Bielas em motores a combustão interna .....	3
1.2 Objetivo .....	4
2 CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Descrição da biela e suas funções.....	5
2.2 Medição de tensões por métodos óticos .....	6
2.2.1 Natureza da luz e interferência .....	7
2.2.2 Holografia.....	16
2.2.3 Interferometria holográfica.....	18
a) Holografia de tempo real .....	18
b) Holografia de dupla exposição.....	20
c) Holografia de objetos difusos.....	21
d) Objetos de fase .....	24
e) Hogramas em sandwich.....	25
f) Análise de tensões em holografia .....	27
2.2.4 O efeito speckle .....	29



a) Speckle objetivo .....	30
b) Speckle subjetivo .....	31
c) Distribuição das intensidades .....	32
2.2.5 Interferometria de speckle .....	34
a) Fotografia de speckles .....	35
b) Interferometria por correlação de speckle .....	38
2.2.6 – Eletronic Speckle Pattern Interferometry .....	43
a) Otimização da intensidade da iluminação .....	49
b) Resolução da câmera e tamanho do speckle .....	50
c) O caso de dois feixes .....	51
d) Feixe de referência .....	52
2.2.7 – Deslocamento de fase .....	54
a) Técnica dos três passos.....	58
b) Técnica dos quatro passos .....	59
2.3 Estado da arte em interferometria laser .....	60
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	66
3.1 Materiais .....	70
3.2 Métodos de medição.....	72
3.3 Planejamento experimental.....	75
3.3.1 Determinação do problema.....	79
3.3.2 Determinação da variável de resposta e dos fatores .....	80
3.3.3 Arranjo experimental.....	87
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	92
4.1 Análise estatística .....	92
4.1.1 Análise de Variância (ANOVA).....	97

4.1.2 Análise do planejamento proposto (Taguchi).....	101
4.1.3 Análise da função utilidade e otimização .....	103
4.2 Ensaio da biela.....	106
4.2.1 Cálculo analítico das tensões na alma .....	110
4.2.2 Simulação numérica simplificada das tensões na alma .....	112
4.2.3 Simulação numérica tridimensional das tensões na alma.....	114
4.4 Comentários e observações .....	127
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	128
5.1 Trabalhos futuros.....	131
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	132
Apêndice.....	136
A.1 – Descrição do deslocamento de pequenas superfícies. ....	136
Apêndice B .....	141
B.1 – Perda de correlação em padrões de speckle .....	141

# 1 INTRODUÇÃO

Na busca por maior competitividade, a indústria automobilística tem procurado desenvolver novos componentes que atendam melhor as necessidades de seus clientes, sem que esses percam confiabilidade e desempenho. Especificamente no mercado de motores, as tendências atuais são o desenvolvimento de sistemas com maior potência, torque e rotações, além de sistemas que visam redução no consumo de combustível. Esses produtos devem ser capazes de atender aos atuais e futuros requisitos impostos pelas leis que controlam emissões nos diversos mercados atendidos pelos fabricantes, visando sempre que possível uma redução nos custos de produção, possibilitando aumento de margens e competitividade.

Dois frentes de trabalho são clássicas nesses esforços por redução de custo e aumento da confiabilidade, sendo a primeira a busca por novos materiais com características como maior resistência ao desgaste por fadiga, maiores tensões de ruptura e mais baratos. A segunda foca esforços na redução de material, alterando geometria ou o próprio processo de fabricação sempre de forma a não comprometer as características básicas dessa peça. Em ambos os casos é indispensável o conhecimento de todas as cargas que atuam sobre a peça ao longo de seu uso, tanto em condições normais de operação quanto em condições extremas para que tais alterações não tragam prejuízos ao seu comportamento ao longo de sua vida útil.

Os ensaios de tração e compressão são úteis para o levantamento dessas tensões, sendo indispensáveis na validação de modelos numéricos feitos para simulação de comportamento da peça. Nesses ensaios a amostra é submetida a uma carga unidirecional que induz deformações inicialmente elásticas e em seguida plásticas à peça. O interesse do ensaio é justamente a medição dessas deformações para, a partir delas e conhecendo-se as características do material em questão, poder inferir sobre as tensões às quais a peça é submetida. Assim, é possível comparar os resultados da medição com os obtidos numericamente para a validação dos modelos, tornando possível utilizar esses modelos para

determinar características importantes e de interesse no desenvolvimento da peça em situações diferentes de carregamento.

A forma mais tradicional e amplamente difundida de medição dessas deformações é através do uso de extensômetros (também conhecidos como *strain-gauges*). Esses podem ser feitos de material piezelétrico que, ao ser deformado, tem sua resistência elétrica variada proporcionalmente à sua deformação, quanto de um material condutor simples que modifica sua resistência modificando a seção transversal do filamento durante o carregamento. O *strain-gauge* deve ser fixado à peça, sendo muito mais sensível às deformações na direção paralela ao enrolamento principal do que na direção perpendicular. Sendo assim, para obter as deformações em varias direções, deve-se utilizar múltiplos *strain-gauges*. Outro problema é que esses dispositivos fornecem a deformação local da amostra, mas, em peças grandes, é necessário utilizar vários *strain-gauges* para medir deformações em posições diferentes da peça.

Uma alternativa ao uso de extensômetros são os métodos óticos de medição de deformação e tensões. Esses métodos se utilizam de imagens obtidas em dois momentos, antes e depois da aplicação da carga, para obter campos de deformação. Dentre esses métodos destaca-se o ESPI (Eletronic Speckle Pattern Interferometry), que será apresentado, discutido e utilizado em experimentos nesse trabalho. Esse método utiliza basicamente do efeito speckle, que será explicado no capítulo 2, para a obtenção de campos de deformação e tensão.

Dentre as maiores vantagens desse método sobre métodos tradicionais destaca-se a obtenção do campo de deformação e tensão de toda a superfície da peça de uma única vez e de maneira rápida (apenas o tempo necessário para a captura da imagem e processamento do resultado, em geral alguns segundos). Além disso, pode-se destacar também o caráter não destrutivo do ensaio realizado, uma vez que não há necessidade de instalação de nenhum equipamento diretamente na peça. Uma vez feita à montagem e ajuste inicial do equipamento de medição, pode-se trocar a amostra ensaiada muito rapidamente, bastando substituí-la pela próxima e recomeçar os ensaios, sem a necessidade de mudança em nenhum parâmetro.

A grande desvantagem desse método é a necessidade de um ambiente altamente controlado para a realização do ensaio. A carga deve ser aplicada controladamente de forma que fontes de vibração na peça e no equipamento de medição sejam eliminadas ou, ao menos, mantidas em níveis reduzidos para não afetar a estabilidade do conjunto durante a aquisição da imagem pelo equipamento. Outra fonte de variabilidade a ser controlada é a iluminação do ambiente onde as medições ocorrem. Variações na intensidade luminosa do ambiente podem comprometer a qualidade das imagens obtidas, prejudicando assim os resultados deduzidos a partir das mesmas. O método é muito sensível a influências externas, perdendo correlação facilmente, o que praticamente inviabiliza sua aplicação em ambiente industrial, sendo necessário um laboratório com condições controladas para que resultados consistentes sejam obtidos.

Mesmo o equipamento ESPI sendo relativamente autônomo no processamento das imagens obtidas e no cálculo dos campos de deformação e tensão, bem como nos padrões de franjas, a aplicação do método requer conhecimentos sólidos de fenômenos óticos como interferência e difração. Requer ainda conhecimentos em relação à peça que está sendo ensaiada para que os resultados possam ser analisados criticamente e para que possíveis resultados discrepantes sejam detectados e rejeitados, evitando assim falsas conclusões na análise da peça que podem levar a erros no projeto de um novo produto em desenvolvimento.

## **1.1 Bielas em motores a combustão interna**

Em um motor de combustão interna, a biela é o dispositivo responsável por fazer a ligação do pistão com o virabrequim. Essa ligação da biela ao virabrequim forma o chamado sistema biela manivela, responsável por transferir o movimento linear do pistão produzido pela combustão ocorrida dentro da câmara de em movimento circular no virabrequim. Esse, por sua vez, será transmitido ao eixo principal gerando o movimento

circular do mesmo. A biela se compõe de dois olhais, sendo que o olhal menor é ligado ao pistão enquanto o olhal maior se liga ao virabrequim.

O atrito entre a biela e o eixo de fixação do pistão e do virabrequim aos olhais é geralmente diminuído pelo uso de um anel de material anti-atrito (bronze), ou pelo uso de um rolamento. Uma biela pode possuir também uma furação para a passagem de óleo lubrificante, sendo esse utilizado também para diminuir o atrito nas regiões de junção.

Os principais esforços presentes na biela são de compressão (durante a descida do pistão), e de tração (durante a subida). Dessa forma, todo o desenvolvimento que é feito em bielas deve levar em consideração essas tensões, às quais ela será submetida durante toda sua vida. Maiores pressões de combustão dentro do cilindro gerariam a diminuição do consumo de combustível e a melhora da eficiência do motor, além de redução de emissões, trazendo em consequência a necessidade do desenvolvimento de novas bielas, que sejam capazes de resistir a esses maiores esforços.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo desse trabalho é desenvolver uma metodologia de medição de tensão em bielas para ensaios estáticos utilizando a técnica conhecida como ESPI, que se baseia no efeito speckle gerado pelo uso de iluminação coerente. Essa técnica deve ser validada pela comparação dos resultados obtidos com resultados clássicos e aceitos pela indústria e também com simulações numéricas. O objetivo dessa técnica é no futuro diminuir drasticamente o tempo de validação de um resultado obtido com o auxílio de um software de elementos finitos, contribuindo para o desenvolvimento de novos produtos. O trabalho inclui uma revisão dos conceitos necessários para a compreensão da interferometria, e por consequência dos métodos de medição de tensões e deformações por via ótica. Em seguida, o trabalho se propõe a desenvolver uma metodologia experimental e, por fim, apresentar os resultados obtidos.

## **2 CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Métodos óticos usados na análise de problemas de engenharia vêm se tornando uma realidade com o desenvolvimento e validação de técnicas que diminuem o tempo de ensaio e também produzem resultados precisos e completos. Com isso, mais empresas e universidades estudam a possibilidade de aplicar essas técnicas ao desenvolvimento de seus produtos e experimentos. Com isso acabam por atrair mais a atenção de engenheiros para essa nova área, ainda tão pouco explorada.

Esse capítulo dedica-se à apresentação dos conceitos necessários à compreensão do trabalho a ser desenvolvido. Inicialmente serão apresentados conceitos sobre biela bem como os esforços aos quais a mesma está submetida quando em operação em um motor. Em seguida será dado um panorama das técnicas de interferometria laser existentes, inicialmente fazendo uma revisão dos conceitos óticos envolvidos e, em seguida, dando maior detalhamento aos métodos propriamente ditos. Por fim será feito um levantamento do estado da arte sobre o assunto.

### **2.1 Descrição da biela e suas funções**

Motores a combustão interna são máquinas térmicas capazes de converter energia química em energia térmica através da combustão, que leva à expansão de gases gerando energia mecânica em um eixo de saída. Distinguem-se dois tipos de motores principais: os alternativos, caracterizados por elementos que realizam movimentos repetitivos de translação (motores 2 e 4 tempos), e motores rotativos, que se utilizam de elementos com movimento puramente rotativos (turbinas a gás, por exemplo). Os motores alternativos são, sem dúvida, os mais empregados na indústria automobilística enquanto os rotativos encontram grande emprego na indústria aeronáutica e de energia.

A maior parte dos motores alternativos se vale do dispositivo pistão biela manivela para transformar o movimento linear produzido pela combustão no interior da câmara de combustão em movimento rotativo no eixo de saída. Nesse dispositivo o pistão é o componente que determina o limite não fixo da câmara de combustão do motor e que possui movimento puramente linear. Ele se acopla também à biela, que é o dispositivo de conexão entre o pistão e a manivela (virabrequim) e que é responsável por alternar o movimento linear recebido do pistão para circular ao transmiti-lo ao virabrequim. Por fim o virabrequim é o componente com movimento circular que se acopla ao eixo de saída. A Figura 2.1 ilustra um sistema pistão biela manivela.

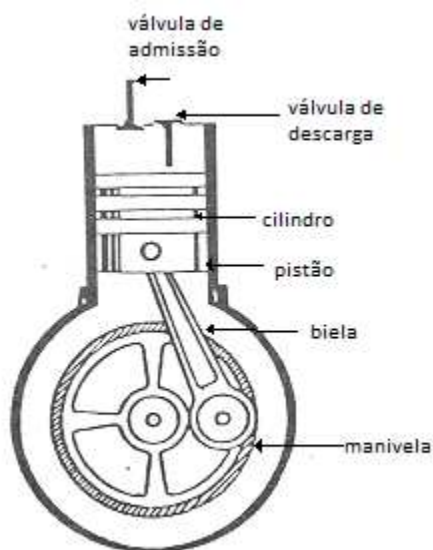


Figura 2.1 – Dispositivo pistão biela manivela. [Adaptado de [http://www.em.pucrs.br/lsfm/alunos/luc\\_gab/compressores.html#C](http://www.em.pucrs.br/lsfm/alunos/luc_gab/compressores.html#C)]

## 2.2 Medição de tensões por métodos óticos

Dentre os fenômenos óticos, o que mais se destaca em aplicações ligadas à engenharia em geral é a interferência. Apesar do conceito de interferência ser relativamente



antigo, ele só passou a ser aplicado a partir das décadas de 1950 e 1960, com o surgimento do laser. Uma das primeiras e mais importantes aplicações encontradas para a interferometria foi a medição de deformações em amostras de geometria complexa através do emprego de interferência de ondas luminosas. A partir dessas deformações é possível a determinação dos esforços envolvidos uma vez que sejam conhecidas as características do material sendo ensaiado.

### **2.2.1 Natureza da luz e interferência**

A verdadeira natureza da luz não é completamente determinada. Sua natureza se apoia em dois princípios fundamentais que serão descritos nessa seção. As duas formas diferentes para descrever a luz não são suficientes se consideradas isoladamente, nem tão pouco quando consideradas em conjunto. No entanto, isso não impossibilita a descrição de seu comportamento nem sua utilização em muitas aplicações nas mais diversas áreas da física e engenharia.

O modelo de onda eletromagnética considera a luz como sendo energia na forma de onda eletromagnética. A qualquer momento essa radiação pode ser descrita por dois vetores perpendiculares entre si e à direção do movimento dos raios, sendo o vetor campo elétrico (**E**) e o vetor campo magnético (**H**). Se partirmos dos princípios básicos de carga e da lei de Coulomb podemos desenvolver as regras de comportamento dessas ondas. Esse modelo falha ao não explicar completamente o comportamento da luz, considerando que esta é uma energia que se comporta como onda, não sendo capaz de explicar os fenômenos de fotoemissão e fotoresistividade (Cloud, 1998).

Já o modelo quântico é capaz de suprir algumas das deficiências existentes no modelo eletromagnético ao considerar que a luz é composta de partículas chamadas “*photons*” as quais têm suas características preditas estatisticamente. Para a maior parte dos trabalhos em ótica essa aproximação não precisa ser feita, sendo possível utilizar-se apenas da teoria eletromagnética para descrever o comportamento da luz.

No caso da interferometria também não é necessária a abordagem quântica e trataremos apenas da eletromagnética. O conjunto de bases matemáticas que descrevem a propagação e suas interações com os objetos é conhecido como equações Maxwell (Borne and Wolf, 1975). Para apresentar essas equações é necessário introduzir a simbologia para os parâmetros de campo, tais como,  $\mathbf{D}$  sendo o vetor deslocamento elétrico,  $\mathbf{J}$  o vetor densidade de corrente e  $\mathbf{B}$  vetor indução magnética.

Além disso, é necessário também definir alguns coeficientes que representam características do material em estudo sendo  $\sigma$  a condutividade específica,  $\rho$ : a densidade de carga elétrica,  $\epsilon$  a constante dielétrica e  $\mu$  a permeabilidade magnética.

Com isso, define-se  $\nabla$  como o operador,  $\frac{dx}{dt}i + \frac{dy}{dt}j + \frac{dz}{dt}k$  bem como o operador ' ' representando uma derivada temporal deste. Como isso, obtêm-se as equações básicas (Cloud, 1998):

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{1}{c} \mathbf{D}' = \frac{4\pi}{c} \mathbf{J} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{B}' = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

A Equação (2.3) é conhecida como a lei de Gauss, que define a densidade de carga sobre um elemento. A Equação (2.4) mostra que não existem fontes ou fugas para a luz. O símbolo  $c$  refere-se à velocidade da luz no vácuo. Além dessas equações, é possível definir as equações básicas do material:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.7)$$

A partir dessas equações básicas é possível realizar a uma série de desenvolvimentos e simplificações, que serão omitidos aqui por não estarem dentre os objetivos desse trabalho, mas que podem ser facilmente encontradas em Born and Wolf, 1975, e Garbuny, 1965. A partir dessa manipulação, chega-se à Equação que descreve o movimento das ondas:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = K\mu \frac{d^2 \mathbf{E}}{dt^2} \quad (2.8)$$

Onde:  $K\mu = 1/v^2$

$v$  é a velocidade de propagação da onda,

$K$  é a constante dieletrica do meio =  $\epsilon/c^2$

A solução harmônica mais simples da onda plana é dada por uma função seno ou cosseno tal como:

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

Onde:  $A$  é a amplitude no plano da onda,

$\lambda$  é o comprimento de onda.

Essa solução unidimensional é facilmente generalizada para a propagação de onda através de um eixo determinado por um vetor unitário  $\alpha$  definido no plano cartesiano.

$$\alpha = li + mj + nk \quad (2.10)$$

A onda viajando na direção  $\alpha$  assume a seguinte forma:

$$E = A \cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda}[vt - (lx + my + nz)]\right\} \quad (2.11)$$

Se for definido um vetor posição  $\mathbf{r}$ , é possível reescrever a Equação (2.11) como:

$$E = A \cos(\omega t - k \cdot r) \quad (2.12)$$

Onde  $\omega$  é a frequência angular em radianos e  $k$  é o vetor número de onda  $k\alpha = \frac{2\pi\alpha}{\lambda}$ .

Na prática dificilmente são encontradas ondas básicas como essa. Em geral, as ondas de luz encontradas são compostas de diferentes comprimentos de onda e polarizações. No entanto, essas ondas podem ser tratadas através da superposição de ondas básicas.

Da definição das equações de propagação da onda, é possível tratar do conceito de frente de onda, que será fundamental para o entendimento de interferência. Frente de onda ou superfície de onda como sendo o lugar geométrico de todos os pontos em que a fase de vibração ou variação harmônica de uma quantidade física é a mesma. Os dois principais tipos de frente de onda são o plano e o esférico.

A frente de onda plana é aquela na qual não existe variação de fase numa seção transversal do feixe ( $\Phi = \text{constante} = 0$ ). As ondas planas são facilmente modeladas matematicamente, o que torna cálculos muito mais simples. Esse tipo de onda pode ser reproduzido em laboratório com um grau adequado de precisão em relação à onda teórica. A Figura 2.2 ilustra uma onda plana.

Já a onda esférica é aquela que resulta da propagação de um feixe luz em todas as direções a partir de uma fonte luminosa pontual. Recebe esse nome devido ao fato de que a superfície que contém uma determinada fase ser uma esfera centrada na fonte luminosa e todas as ondas se propagarem na direção do raio. A Figura 2.3 ilustra a propagação de uma onda esférica.

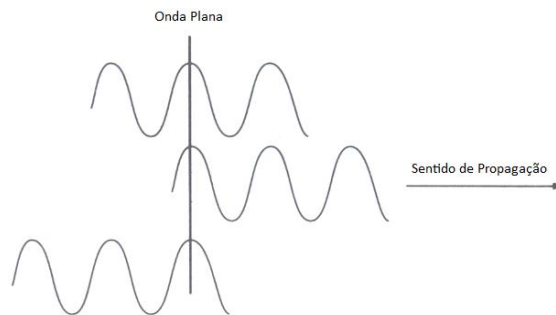


Figura 2.2 – Formação de uma onda plana. [adaptado de Cloud, 1998]

Para a frente de onda plana, a Equação (2.12) descreve a propagação do feixe, uma vez que não há defasagem entre as ondas. Já para uma onda esférica a Equação (2.13) descreve a propagação.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{A}(\mathbf{r}) \cos(\omega t - k\mathbf{r} + \Phi_0) \quad (2.13)$$

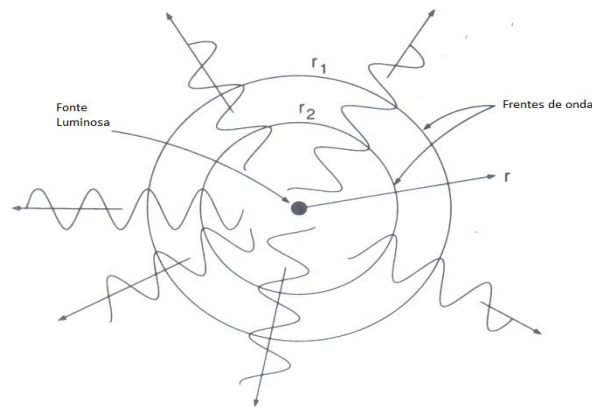


Figura 2.3 – Formação da frente de onda esférica. [adaptado de Cloud, 1998]

É possível converter uma onda plana em esférica e vice versa utilizando apenas lentes. Isso se evidencia na Figura 2.4, onde um feixe de luz paralelo é convertido em um feixe esférico e depois novamente em paralelo, utilizando as propriedades óticas das lentes utilizadas.

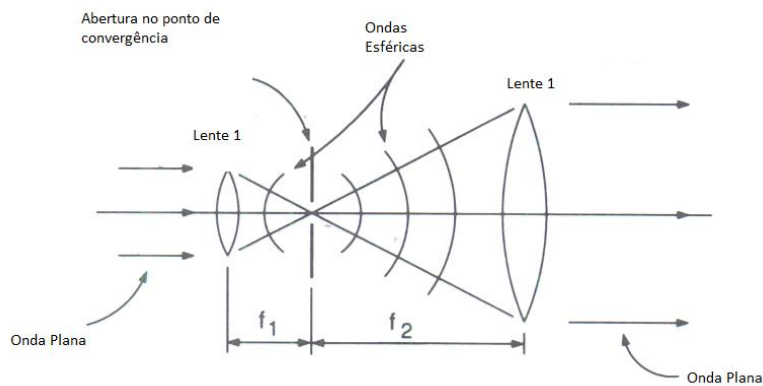


Figura 2.4 – Conversão das frentes de onda. [adaptado de Cloud, 1998]

Um conceito de fundamental importância nesse trabalho é o de interferência de ondas. Por simplicidade, trata-se aqui de duas ondas viajando através do mesmo eixo. Para haver interferência as ondas precisam ser coerentes, ou seja, ter a mesma polarização e o mesmo comprimento de onda. A representação básica dessas ondas é dada pelas equações (2.14) e (2.15).

$$E_1 = A_1 \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (z - vt) \right] \quad (2.14)$$

$$E_2 = A_2 \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (z - vt - r) \right] \quad (2.15)$$

O parâmetro  $r$  presente na segunda Equação vem da diferença de posição da fonte luminosa da segunda onda em relação à primeira. Para facilitar o desenvolvimento nas equações a seguir considera-se que as amplitudes são iguais entre si, e iguais a  $A$ . Dessa forma, a onda resultante da interferência é:

$$E_S = E_1 + E_2 = 2A \cos \frac{\pi r}{\lambda} \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \left( z - vt - \frac{r}{2} \right) \right] \quad (2.16)$$

O termo que define a amplitude da onda é  $2A \cos \frac{\pi r}{\lambda}$ , enquanto o segundo cosseno é responsável pela variação dessa amplitude ao longo do comprimento de onda, sendo esse o termo que considera a defasagem relativa entre as ondas. A intensidade é dada pelo quadrado da amplitude, como pode ser visto na Equação (2.17).

$$I_S = 4A^2 \cos^2 \frac{\pi r}{\lambda} \quad (2.17)$$

O caso da interferência de duas ondas não colineares plana é tratado a seguir. Esse caso de interferência é particularmente importante na criação de hologramas e padrões de

speckle. Faz-se a hipótese de que as ondas se propagam através dos eixos  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ . Assim, as magnitudes do vetor elétrico das ondas serão:

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{A}_1 \cos(\omega t - k_1 \cdot \mathbf{r} + \Phi_{01}) \quad (2.18)$$

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{A}_2 \cos(\omega t - k_2 \cdot \mathbf{r} + \Phi_{02}) \quad (2.19)$$

onde  $\Phi_{01}$  e  $\Phi_{02}$  são as fases iniciais de cada onda em  $r = 0$ ,  $k_1$  e  $k_2$  são vetores de propagação dependentes de  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ . O mesmo procedimento é adotado para encontrar o vetor  $\mathbf{E}_S$  resultante.

$$\mathbf{E}_S = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = \mathbf{A}_1 \cos(\omega t - \Phi_1) + \mathbf{A}_2 \cos(\omega t - \Phi_2) \quad (2.20)$$

sendo que  $\Phi_1 = k_1 \cdot \mathbf{r} - \Phi_{01}$  e  $\Phi_2 = k_2 \cdot \mathbf{r} - \Phi_{02}$ .

Após alguns cálculos e simplificações é possível desenvolver a expressão (2.21) para a intensidade da onda resultante. Nessa Equação o operador  $\langle \rangle$  representa a média temporal.

$$I_S = 2A^2_S(\mathbf{r}) \langle \cos^2(\omega t - \Phi_S(\mathbf{r})) \rangle \quad (2.21)$$

Utilizando o conceito de intensidades de cada uma das ondas que compõe a onda resultante  $I_1$  e  $I_2$  pode-se essa expressão para (2.22) que será usada no restante do trabalho para calcular a intensidade resultante.

$$I_S = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta \quad (2.22)$$

Nessa expressão,  $\Delta$  substitui  $[(k_2 - k_1) \cdot \mathbf{r} - \Phi_0]$ . A Figura 2.5 ilustra a formação da interferência por duas ondas planas interferindo obliquamente.

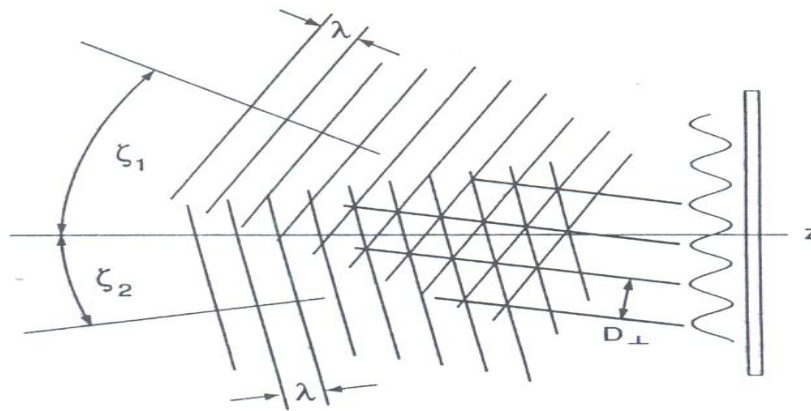


Figura 2.5 – Formação de interferência através de dois feixes de ondas planas interferindo obliquamente. [Adaptado de Cloud, 1998]

Outro conceito de fundamental importância é o de difração. Quando um feixe de luz incide em uma abertura ou uma superfície com rugosidade de maior ordem que o comprimento de onda do feixe, esse passa a não se comportar mais de acordo com o modelo de propagação que o governava. Nesse caso, a luz sofre um fenômeno de espalhamento não consistente com os fenômenos de reflexão ou mesmo de refração.

Para explicar esse fenômeno utiliza-se o Princípio de Huygens, segundo o qual, cada ponto na frente de onda se comporta como uma fonte luminosa, produzindo ondas secundárias que se espalham em todas as direções. Essas, ao se comporem, formarão uma nova frente de onda. A amplitude dessas novas ondas será máxima na direção do deslocamento e tenderá a zero numa direção ortogonal. A Figura 2.6a mostra a passagem de um feixe paralelo por uma abertura, enquanto a Figura 2.6b mostra a formação das novas frentes de onda.

Dois tipos de difração são obtidos a partir da passagem do feixe por uma abertura. O primeiro, conhecido como difração de Fresnel, ocorre quando é feita a captura do feixe de saída a uma distância finita da abertura. Nesse caso, são observados anéis concêntricos de intensidade variável, que diminuem na direção radial, como se pode ver na Figura 2.7a.



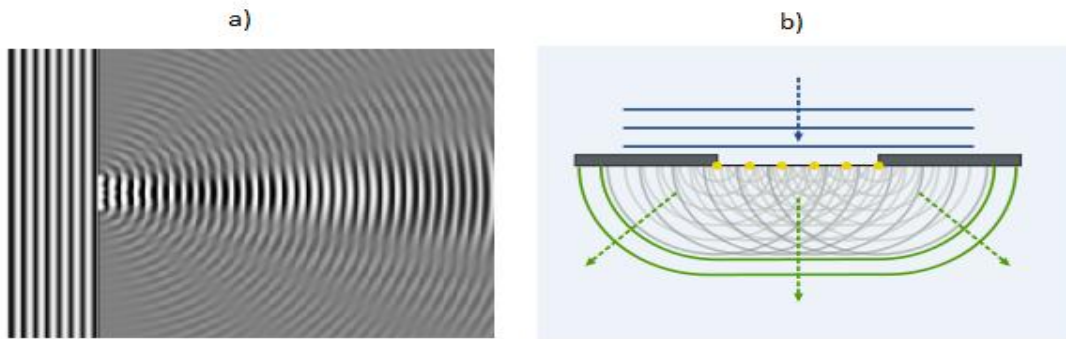


Figura 2.6 – Difração através de uma abertura a) Passagem de um feixe paralelo por uma abertura; b) Formação das novas frentes de onda.

Já a difração de Fraunhofer ocorre quando os feixes de saída interferem no infinito (para obter tal condição faz-se uso de lentes para deslocar o ponto focal do infinito para um ponto a distância finita). Nesse caso surge uma nova frente de onda praticamente paralela, sendo que a intensidade luminosa concentra-se na região central, como pode ser visto na Figura 2.7b.

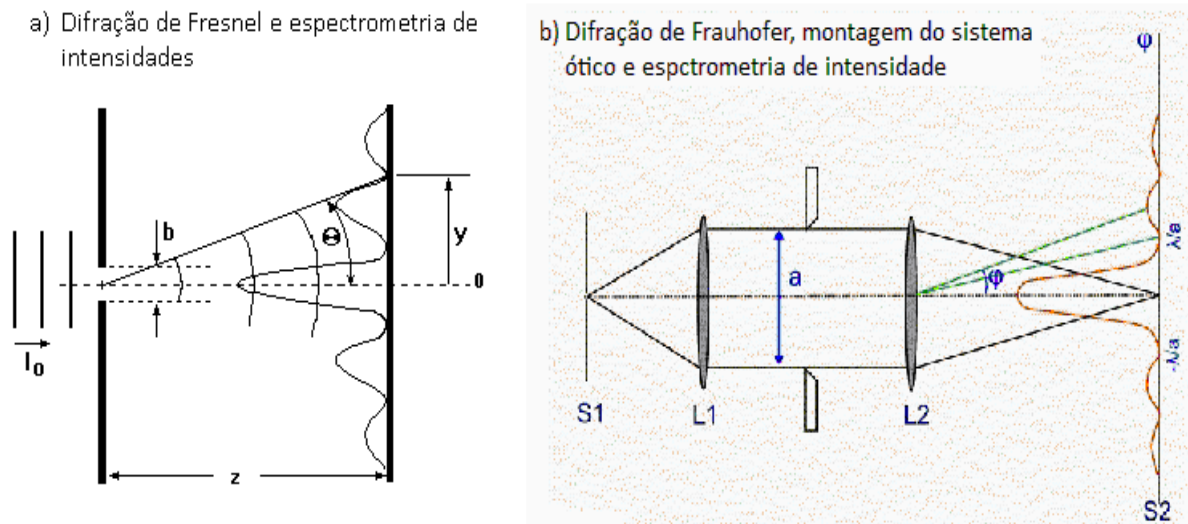


Figura 2.7 – Difração a) Fresnel; b) Fraunhofer.

### 2.2.2 Holografia

A holografia é uma técnica de gravação de imagens que permite a gravação em uma película bidimensional de toda a informação tridimensional do objeto iluminado. Essa informação tridimensional pode ser completamente recuperada quando se ilumina a película com a mesma luz usada como referência na gravação e na mesma direção. Para Jones e Wykes (1989), holografia é a técnica na qual uma frente de onda pode ser gravada e em seguida reconstruída na ausência da onda original.

A holografia foi desenvolvida por Dennis Gabor (1949) inicialmente para melhorar a performance dos microscópios eletrônicos. O principal problema à época era a dificuldade de lidar com as aberrações esféricas nas lentes eletromagnéticas utilizadas naquele tipo de microscópio. Essas aberrações estão ligadas às defasagens introduzidas no feixe de elétrons quando da passagem desse pela lente. Ao se registrar uma imagem, informações de amplitude e fase são gravadas juntas, sendo impossível gravá-las separadamente pelas técnicas existentes. Gabor decidiu desenvolver uma técnica na qual, após serem gravadas, essas informações pudessem ser separadas, para assim eliminar, ou ao menos melhorar, o problema das defasagens introduzidas na lente.

Apesar de a técnica ter sido desenvolvida em 1949, ela só pode ser empregada a partir da década de 60, com o surgimento do laser. A necessidade da luz coerente surge do fato de que os meios de gravação são sensíveis apenas às variações de intensidade luminosa, sendo assim necessário converter informações de fase em intensidade. Isso é feito adicionando-se um feixe de referência ao sistema, como pode ser visto na Figura 2.8a. Assim, fica claro que o que é gravado é a interferência de dois feixes, um que ilumina o objeto e é espalhado em direção à película (feixe objeto), e outro de referência, que não sofre espalhamento.

Mesmo sendo indispensável o uso de luz coerente na gravação do holograma, podemos reconstruir a imagem, em alguns casos, usando luz monocromática, tais como as obtidas de lâmpadas de sódio e mercúrio, ou mesmo com luz branca. A Figura 2.8b mostra como fazer a reconstrução da imagem usando o feixe de referência.

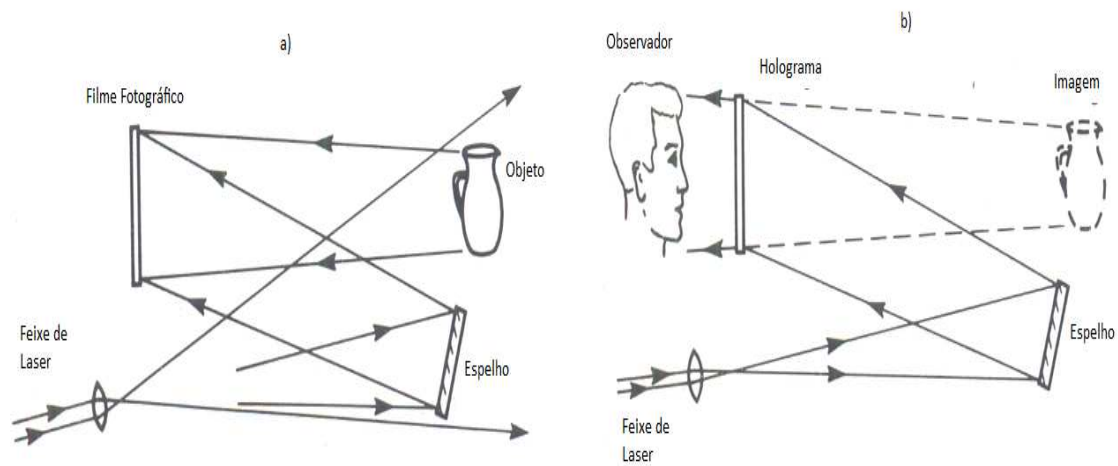


Figura 2.8 – Holografia a) gravação e b) reconstrução da imagem. [Adaptado de Hariharan, 1991]

Para um observador, a onda reconstruída é indistinguível da onda objeto original. Isso ocorre, pois ele vê uma imagem tridimensional que mostra todos os efeitos normais de perspectiva e profundidade que o objeto normal exibiria, como pode ser visto na Figura 2.9.

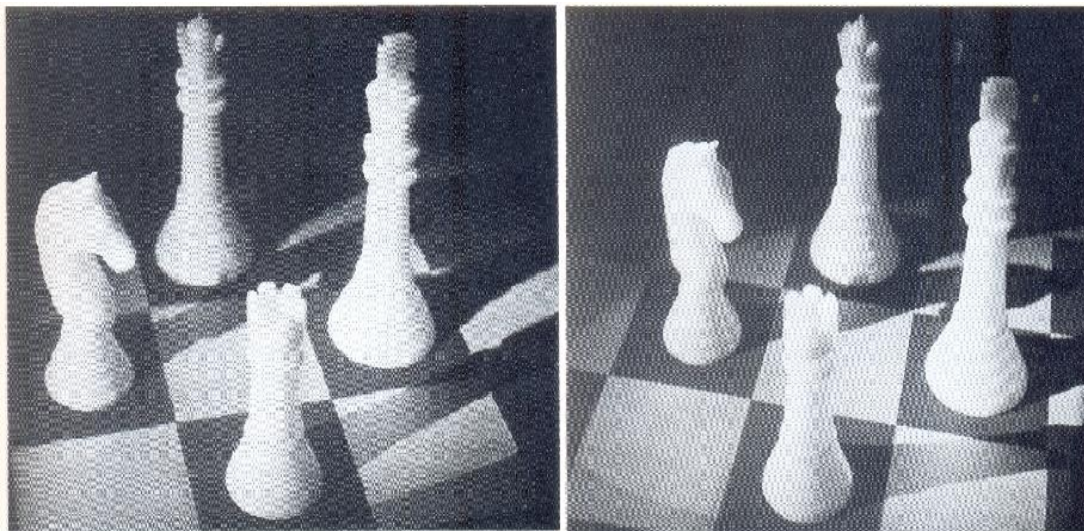


Figura 2.9 – Holograma visto de diferentes ângulos. Diferença de perspectiva. [Adaptado de Hariharan, 1991]

### 2.2.3 Interferometria holográfica

Para Hariharam (1991) a interferometria holográfica é uma extensão dos métodos de medição nos quais, pelo menos uma das ondas que interferem é reconstruída via holograma. A grande vantagem do método é que ele permite o armazenamento e a reconstrução de toda a informação de fase e amplitude contida na luz que se espalhou quando uma superfície rugosa é iluminada. Com isso torna-se possível obter a forma e a posição de um corpo precisamente em dois momentos distintos, e em seguida comparar essas informações e fazer inferências sobre deslocamentos e deformações.

Apesar de suas evidentes vantagens, tais como rapidez dos ensaios, precisão nos resultados e a possibilidade de realizar testes não destrutivos, a interferometria holográfica vem sendo introduzida lentamente em ensaios pela indústria. Isso ocorre principalmente devido a dois fatores: às altas necessidades de estabilidade para a realização dos ensaios, em geral incompatíveis com o ambiente industrial, e ao fato de que as técnicas de gravação da imagem introduzem atrasos (“delays”) que impossibilitam o tratamento em tempo real da imagem. Esse segundo problema tem sido eliminado em equipamentos mais novos, que utilizam câmeras CCD e processadores mais potentes, reduzindo esse atraso e possibilitando inspeção em tempo real dos ensaios. A seguir são descritas as principais técnicas de Interferometria Holográfica.

#### *a) Holografia de tempo real*

Nessa técnica, temos uma necessidade primária, que é o posicionamento do filme fotográfico, depois de revelado, na mesma posição em que sua gravação foi feita. Podemos usar para tanto uma técnica de revelação desse filme na posição de gravação, sem introduzir distúrbios a essa posição, ou mesmo um apoio que se desloque mecanicamente e volte para a exata posição de gravação.

Inicialmente o objeto é iluminado em uma condição livre de cargas, gravando essa imagem em um holograma primário. Após a revelação dessa imagem, o objeto é iluminado com o feixe de referência. Feito isso, a imagem virtual irá se sobrepor ao objeto real. O objeto nesse momento é também iluminado pelo mesmo feixe utilizado na gravação do primeiro holograma. Se a forma do objeto sofrer qualquer pequena variação, haverá dois conjuntos de ondas chegando ao observador, sendo um proveniente da reconstrução do holograma primário e o outro da onda transmitida diretamente do objeto no estado atual. Esses dois conjuntos de ondas irão interferir e se somar em pontos onde a diferença de caminho óptico é zero, ou igual a um número inteiro de comprimentos de onda. Nos outros pontos a amplitude será resultante da defasagem dos caminhos óticos. A Figura 2.10 mostra como essa interferência se forma para um caso simples.

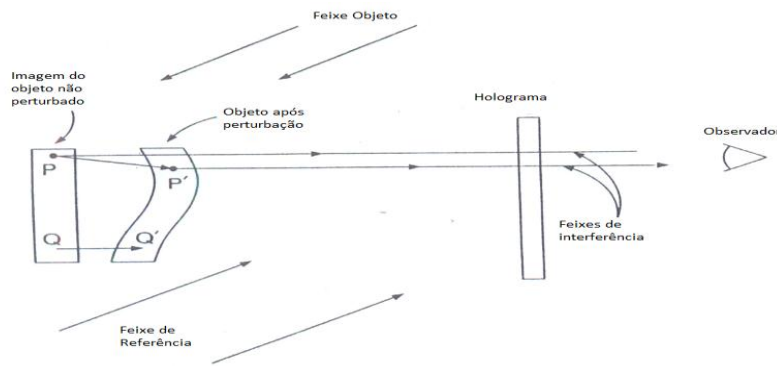


Figura 2.10 – Formação de franjas em holografia de tempo real. [Adaptado de Cloud, 1998]

A amplitude complexa da onda obtida pela primeira exposição do objeto no estado inicial é dada pela Equação (2.23), sendo que o multiplicador negativo advém do fato do holograma ser o negativo da imagem real. Após a movimentação do objeto, a amplitude do feixe objeto passa a ser dada pela Equação 2.24.

$$U_{OR} = -K_1 A(x, y) e^{i\phi(x, y)} \quad (2.23)$$

$$U_O = K_2 A(x, y) e^{i[\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)]} \quad (2.24)$$

O observador irá enxergar a soma desses dois feixes. A amplitude dessa soma é mostrada na Equação (2.25), enquanto a intensidade pode ser vista na Equação (2.26).

$$U_S = U_O + U_{OR} = KA(x, y)e^{i\Phi(x, y)}[-1 + e^{i\Delta\Phi(x, y)}] \quad (2.25)$$

$$I_S = U_S U_S^* = K^2 A^2(x, y)[2 - e^{i\Delta\Phi(x, y)} - e^{-i\Delta\Phi(x, y)}] \quad (2.26)$$

*b) Holografia de dupla exposição*

Nesse segundo método, dois hologramas do objeto são gravados sobre um mesmo filme fotográfico. O primeiro holograma é gravado com o objeto em seu estado inicial, normalmente livre da ação de qualquer carga. O segundo holograma é gravado com o objeto já deformado, após a aplicação da carga. Feito isso, quando o filme é iluminado com o feixe de referência haverá a reconstrução de duas imagens, uma referente ao objeto não solicitado e outra referente ao objeto carregado. A interferência dessas duas imagens forma um padrão de franjas que revela as variações na forma do objeto.

Para a técnica de dupla exposição, o holograma carrega dois hologramas completamente separados. As amplitudes desses hologramas são definidas pelas equações (2.27) e (2.28).

$$U_{01} = A_1(x, y)e^{i\Phi_1(x, y)} \quad (2.27)$$

$$U_{02} = A_2(x, y)e^{i\Phi_2(x, y)} \quad (2.28)$$

Devido ao fato de que a interferometria holográfica trata apenas do caso de pequenas deformações e movimentações, pode-se inferir que a diferença da distribuição de amplitudes não varia consideravelmente. Sendo assim  $A_1(x, y) = A_2(x, y) = A(x, y)$ . Com isso calculamos a amplitude da onda total reconstruída pela Equação (2.29). Em seguida obtemos a intensidade pela Equação (2.30).

$$U_I = KA(x, y)\{e^{i\Phi(x, y)} + e^{i[\Phi(x, y) + \Delta\Phi(x, y)]}\} \quad (2.29)$$

$$I = U_1 U_1^* = K^2 A^2(x, y) [2 + e^{i\Delta\Phi(x, y)} + e^{-i\Delta\Phi(x, y)}] \quad (2.30)$$

Nesse caso é adequado considerar que a fase da segunda onda  $\Phi_2$  é dada por:  $\Phi_2 = \Phi_1 + \Delta\Phi$ , e assim  $\Phi_1 = \Phi$ , por simplificação nas equações (2.29) e (2.30).

Essa técnica é muito mais fácil de ser implementada que a técnica de tempo real, uma vez que as duas ondas que interferem são gravadas sempre no mesmo filme. No entanto, distorções da emulsão de gravação podem afetar ambas as imagens, o que diminui a precisão das medições. Outra grande limitação da técnica é que o objeto não pode sofrer deslocamentos no período entre as duas exposições. Além disso, em áreas do objeto que não sofreram variação de posição durante o ensaio, as ondas têm a mesma fase, formando uma área clara no diagrama, o que dificulta a identificação de pequenos deslocamentos.

### *c) Holografia de objetos difusos*

A rugosidade superficial pode ser, em muitos casos, uma barreira à aplicação de técnicas óticas em alguns materiais e peças. Isso ocorre principalmente devido ao fenômeno de espalhamento difuso que um feixe de luz coerente sofre quando o mesmo incide sobre uma superfície com rugosidade superior ao comprimento de onda da luz incidente. Uma grande vantagem das técnicas de interferometria holográfica é a capacidade que possuem de serem aplicadas em casos onde a rugosidade superficial do objeto em estudo é relativamente grande.

Para ilustrar como isso é possível e para determinar as relações entre a ordem de distância das franjas no padrão e o deslocamento sofrido por um ponto correspondente no objeto, admite-se uma pequena superfície que sofreu uma pequena translação, como pode ser observado na Figura 2.11, na qual os pontos P e Q sofrem deslocamentos idênticos descritos pelo vetor **L**.

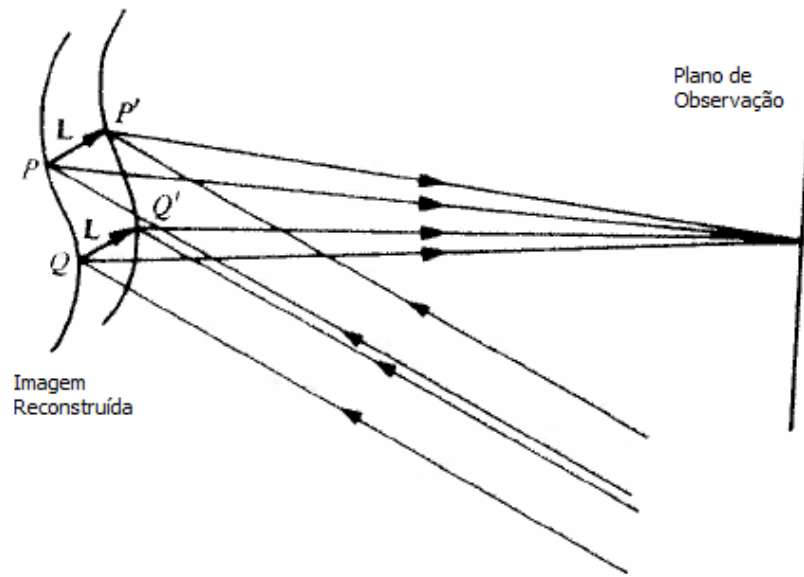


Figura 2.11 – Formação de franjas por holografia de um objeto com superfície refletiva difusa. [Adaptado de Hariharan, 1991]

Para esse caso, a Equação 2.31 mostra a amplitude complexa da onda refletida pelo objeto antes do deslocamento, onde o termo da diferença de fase  $\phi(x,y)$  varia aleatoriamente sobre a superfície devido à rugosidade presente na mesma.

$$o_1(x, y) = |o(x, y)| \exp[-i\phi(x, y)] \quad (2.31)$$

Seguindo o mesmo raciocínio é possível obter a amplitude complexa da onda refletida pelo objeto após o mesmo ser deslocado pela Equação 2.32.

$$o_2(x, y) = |o(x, y)| \exp[-i\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)] \quad (2.32)$$

É importante ressaltar que o termo relativo à mudança de fase induzida pelo deslocamento  $\Delta\phi(x,y)$  é constante ao longo de todo o objeto, uma vez que o mesmo não sofre deformações, e também devido às pequenas deformações. Para obter o padrão de interferência é preciso determinar a intensidade luminosa medida no captor gerada pelas frentes de onda incidentes (Equação 2.33).



$$I(x, y) = |o_1(x, y) + o_2(x, y)|^2 \quad (2.33)$$

Expandindo o termo quadrático em função das partes real e imaginária das frentes de onda tem-se a intensidade luminosa resultante dada pela Equação 2.34, onde  $I_1$  e  $I_2$  são as intensidades médias de cada frente de onda.

$$\begin{aligned} I(x, y) &= \langle o_1 o_1^* \rangle \langle o_2 o_2^* \rangle \langle o_1 o_2^* \rangle \langle o_1^* o_2 \rangle = [\exp(i\Delta\phi) + \exp(-i\Delta\phi)] \\ &= I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{\frac{1}{2}} \cos \Delta\phi \end{aligned} \quad (2.34)$$

Para avaliar o padrão de franjas formado basta considerar as diferenças no caminho ótico entre dois pontos nas duas frentes de onda geradas. A diferença de fase entre as frentes de onda  $\Delta\phi$ , que é responsável pela formação dos padrões de interferência vistos pelo observador, pode então ser dada pela variação total de caminho ótico desde a fonte S até o observador O. Considerando apenas pequenos deslocamentos (sendo que esses deslocamentos atendem à relação  $L \ll SP$  na Figura 2.12)  $\Delta\phi$  pode ser dado pela Equação 2.35.

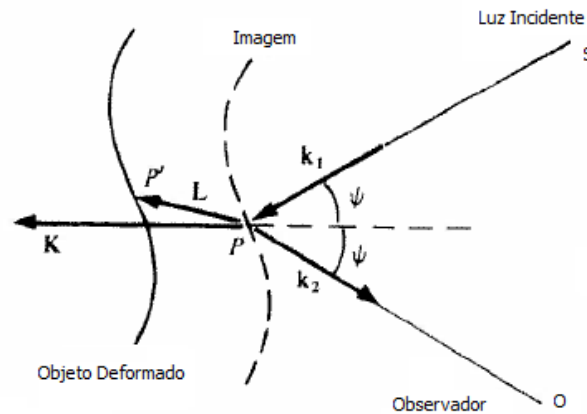


Figura 2.12 – Diferença de fase em um padrão de interferência. [Adaptado de Hariharan, 1991]

$$\Delta\phi(x, y) = L \cdot (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \quad (2.35)$$

Na Equação 2.35,  $\mathbf{k}_1$  e  $\mathbf{k}_2$  são os vetores de propagação da frente de onda incidente e refletida respectivamente. Esses vetores são tomados sobre as linhas de iluminação e observação, respectivamente, e ambos têm magnitude  $2\pi/\lambda$ . Já a diferença  $(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)$  é definida na bissetriz do ângulo  $2\psi$  e tem magnitude dada por  $|(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)| = (4\pi/\lambda) \cos \psi$ .

*d) Objetos de fase*

Algumas aplicações da interferometria clássica são conhecidas por levarem a bons resultados, tais como a observação de linhas de correntes em escoamentos, bem como a visualização de ondas de calor em deslocamento. Mesmo nessas aplicações a interferometria holográfica oferece vantagens sobre a aplicação de técnicas clássicas, como por exemplo, a técnica de Moiré.

Dentre as vantagens pode-se destacar a possibilidade da utilização de equipamentos óticos de qualidade inferior. Espelhos com acabamento superficial mediano, bem como aberturas não tão precisas são suficientes para a obtenção de padrões de interferência úteis. Isso se deve ao fato de o erro associado à fase contribuir igualmente para ambos os feixes incidentes (antes e depois da deformação), sendo que, no geral, seu efeito acaba sendo anulado. No entanto, a principal contribuição dessa técnica é a possibilidade da introdução de telas difusas no interferômetro, possibilitando a obtenção e visualização do padrão de interferência a partir de diversos ângulos através de um range definido para os mesmos, que é variável de acordo com a configuração ótica do interferômetro. Isso torna possível o estudo em três dimensões da distribuição do índice de refração, trazendo informações tridimensionais do objeto. A Equação 2.36 fornece a fase  $\phi(x,y)$  ao longo da imagem em função do índice de refração  $n_0$  do meio e também do estado não perturbado  $n(x,y,z)$ .

$$\phi(x, y) = k_0 \int [n(x, y, z) - n_0] dz \quad (2.36)$$

Na Equação 2.36 é assumido que o gradiente do índice de refração na seção de teste é pequeno, o que implica nos raios se propagarem em uma linha reta paralela ao eixo z. Em

muitas situações praticas pode-se aproximar o sistema para um sistema bidimensional com variação do índice de refração na direção z. Nesse caso, a distribuição dos índices de refração pode ser calculada diretamente da Equação 2.36.

Outro caso comum é a existência de uma distribuição esférica do índice de refração em torno de um ponto central. Assumindo que a distribuição é radialmente simétrica em um eixo normal ao eixo de observação, tomado como sendo o eixo y, para um raio que se propaga na direção z tem-se:

$$dz = (r^2 - x^2)^{-1/2} r dr \quad (2.37)$$

Aplicando a expressão encontrada para dz da Equação 2.37 na Equação 2.36, obtém-se uma nova forma de expressar a fase  $\phi(x,y)$  em coordenadas esféricas, mostrada aqui pela Equação 2.38.

$$\phi(x, y) = 2 \int_x^\infty f(r)(r^2 - x^2)^{-1/2} r dr \quad (2.38)$$

A Equação 2.38 é conhecida como a transformada de Abel e pode ser invertida para obter-se a frequência da onda  $f(r)$ . Quando é necessário determinar uma distribuição assimétrica de índices de refração, o problema é muito mais desafiador, mas não será tratado nesse capítulo. Maiores referências nesse caso particular podem ser encontradas em Sweeney & Vest, 1973, ou em Cha & Vest, 1979.

#### *e) Hologramas em sandwich*

Conforme visto anteriormente, uma das formas de se obter um padrão de interferência holográfico bastante conhecido e com aplicações consolidadas é através da técnica da dupla exposição (seção 2.2.3 b). Nesta, um objeto é exposto em dois momentos diferentes, normalmente separados por uma deformação ou perturbação neste, a qual é o objeto de interesse da medição interferométrica sendo feita.

No entanto, é possível obter padrões interferométricos a partir de dois hologramas gravados conjuntamente com feixes de referência não paralelos. Isso é possível graças a uma técnica conhecida como holograma em sanduiche (“sandwich”). Pode-se ver uma aplicação na Figura 2.13.

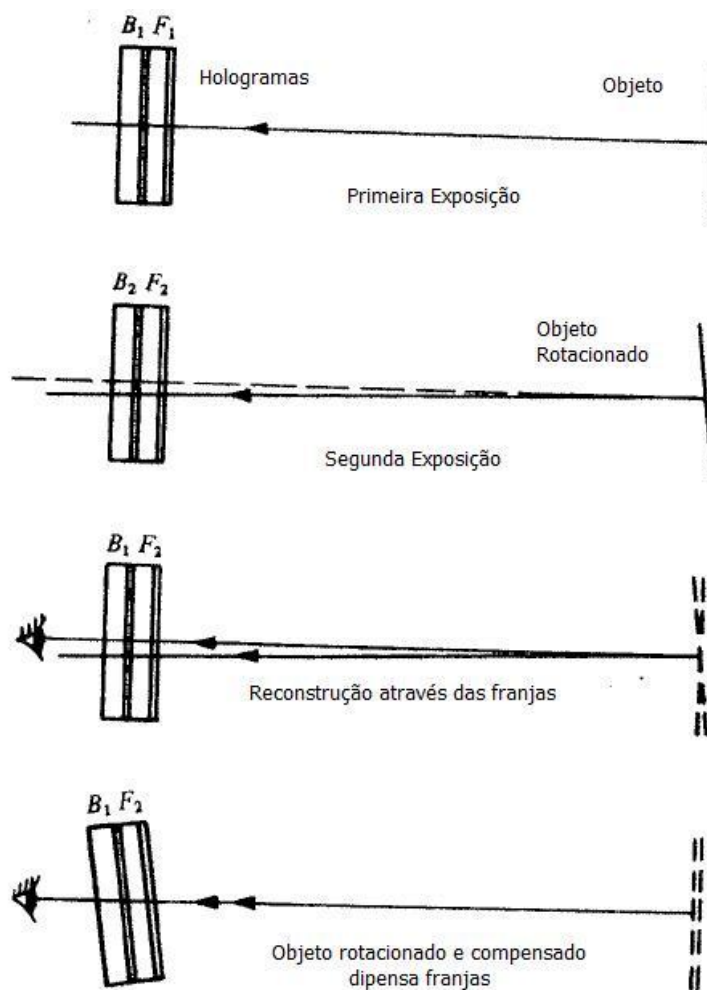


Figura 2.13 – Utilização da técnica de hologramas “sandwich”. [Adaptado de Hariharan, 1991]

Essa técnica consiste em colocar dois filmes fotográficos em um mesmo anteparo com as superfícies que contém a emulsão fotográfica expostas ao objeto. A partir da Figura

2.13 é possível ver que a exposição do objeto não deformado é feita respeitando a configuração  $B_1, F_1$  e, depois de sofrer deformações, as configurações passam a ser  $B_2, F_2$  e  $B_3, F_3$ , conforme a carga é progressivamente aumentada. Após ser feita a aquisição de todas as imagens combina-se, por exemplo,  $B_1$  e  $F_2$  e ilumina-se o conjunto com os feixes de referência originais, gerando assim um padrão de franjas que representa as deformações sofridas pelo objeto entre os dois momentos representados. É possível ainda compensar a deformação sofrida pelo objeto aplicando uma leve inclinação ao conjunto (“sandwich”).

*f) Análise de tensões em holografia*

Ao fazer uma inspeção visual de um mapa de franjas obtido por interferometria holográfica, é possível retirar muitas informações sobre o tipo e a magnitude do movimento sofrido pelo objeto. Essa análise é, no entanto, muito qualitativa sendo eficaz em casos onde se deseja verificar pontos de concentração de tensões ou defeitos. A obtenção de dados quantitativos, no entanto, requer mais manipulações desse mapa de franjas.

Para o cálculo de tensões é mais fácil fazer a medição das deformações associadas ao movimento do objeto e em seguida convertermos esses valores em tensões. Considere-se  $L_x, L_y$  e  $L_z$  como sendo as componentes x, y e z, respectivamente, da variação de posição do objeto. Assim, as componentes normais da deformação são dadas pela Equação 2.39.

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial L_x / \partial x \\ \partial L_y / \partial y \\ \partial L_z / \partial z \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

A partir da Equação 2.39 pode-se calcular as deformações tangenciais que foram induzidas sobre o objeto durante o carregamento. Essas deformações são dadas pela Equação 2.40.

$$\begin{bmatrix} \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\partial L_x / \partial x) + (\partial L_y / \partial x) \\ (\partial L_y / \partial y) + (\partial L_z / \partial y) \\ (\partial L_z / \partial z) + (\partial L_x / \partial z) \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Muitos são os métodos disponíveis para a obtenção variações de posição de pontos na superfície de um objeto, e por consequência também das deformações. Alguns desses métodos tendem a se focar na observação da localização das franjas, tendo como vantagem o fato de serem capazes de dar medidas diretas de deslocamentos superficiais e, em alguns casos, até mesmo das deformações, como em Stetson (1976). A grande desvantagem desses métodos é a baixa precisão dos resultados obtidos, além de serem de difícil aplicação em casos onde movimentos de translação e rotação se combinam.

Outro método direto e mais preciso é o uso de vetores de franja. Quando um objeto sofre carregamento ele se movimenta conforme uma composição de deslocamentos e rotações. Quando isso ocorre, para qualquer deformação homogênea, as franjas serão formadas pela interseção da superfície do objeto com superfícies igualmente espaçadas que são contornos de fase constantes (lugar geométrico das franjas). Seja a Figura 2.14, na qual há a representação tridimensional de um objeto, com quatro pontos de interesse, definindo três direções dentro desse objeto. O vetor de franjas  $\mathbf{K}_f$  como sendo é perpendicular ao lugar geométrico das franjas e tem seu vetor unitário  $\mathbf{k}_f$  dado pela Equação 2.41. A magnitude do vetor franja é dada na Equação 2.42.

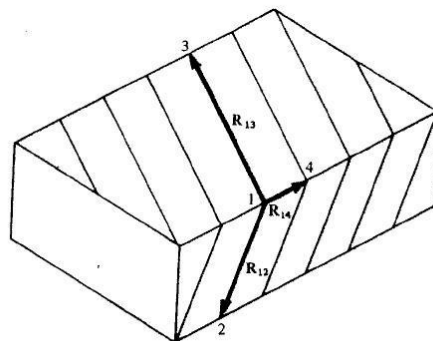


Figura 2.14 – Objeto tridimensional com a representação de franjas advindas da deformação. [Adaptado de Hariharan, 1991]

$$\hat{\mathbf{k}}_f = (\mathbf{R}_{12} \times \mathbf{R}_{13}) / |\mathbf{R}_{12} \times \mathbf{R}_{13}| \quad (2.41)$$

$$|\mathbf{K}_f| = 2\pi / \hat{\mathbf{k}}_f \cdot \mathbf{R}_{14} \quad (2.42)$$

Para a aplicação desse método deve-se determinar os vetores  $\mathbf{K}_{f1}$ ,  $\mathbf{K}_{f2}$  e  $\mathbf{K}_{f3}$  correspondentes as três direções de observação bem como os diferentes valores do vetor sensibilidade  $\mathbf{K}_1$ ,  $\mathbf{K}_2$  e  $\mathbf{K}_3$ . Como resultado, a Equação 2.43 representa os valores de  $\mathbf{K}_{fn}$ .

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{f1x} & \mathbf{K}_{f1y} & \mathbf{K}_{f1z} \\ \mathbf{K}_{f2x} & \mathbf{K}_{f2y} & \mathbf{K}_{f2z} \\ \mathbf{K}_{f3x} & \mathbf{K}_{f3y} & \mathbf{K}_{f3z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{1x} & \mathbf{K}_{1y} & \mathbf{K}_{1z} \\ \mathbf{K}_{2x} & \mathbf{K}_{2y} & \mathbf{K}_{2z} \\ \mathbf{K}_{3x} & \mathbf{K}_{3y} & \mathbf{K}_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial L_x / \partial x & \partial L_y / \partial x & \partial L_z / \partial x \\ \partial L_x / \partial y & \partial L_y / \partial y & \partial L_z / \partial y \\ \partial L_x / \partial z & \partial L_y / \partial z & \partial L_z / \partial z \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

A Equação 2.43 mostra que os componentes do vetor de franja e do vetor de sensibilidade ao longo dos eixos x, y e z estão ligados através do gradiente de deslocamentos. É possível então avaliar as deformações induzidas no objeto através das equações 2.39 e 2.40.

## 2.2.4 O efeito speckle

Com o surgimento do laser, muitos problemas de iluminação pareciam resolvidos. Os usuários de métodos óticos previam que muito avanço poderia ser obtido principalmente no campo da fotografia e filmagens utilizando uma iluminação coerente temporal e espacialmente, intensa, com feixe estreito e monocromático. No entanto, descobriu-se que ao fazer imagens utilizando iluminação a laser, essas apresentavam uma estrutura granular que limitava severamente a resolução.

Essa estrutura granular é formada por inúmeros pequenos pontos, conhecidos como speckles, que se formam sempre que um feixe de luz coerente ilumina uma superfície opticamente rugosa, ou seja, com rugosidade de ordem igual ou maior que o comprimento de

onda do feixe. Os speckles aparecem devido à reflexão randômica do feixe incidente, gerando um espalhamento da luz coerente. O processo de captura dessas imagens é sensível à intensidade da luz recebida em cada ponto do captor. Assim, quando a aquisição é feita, nota-se, como era esperado, que a distribuição das intensidades é completamente randômica com a posição. A Figura 2.15a ilustra a imagem de uma superfície óticamente rugosa feita com iluminação coerente. Já a Figura 2.15b mostra o mecanismo de formação do efeito speckle. A maioria das superfícies tem rugosidade da ordem do comprimento de onda dos lasers mais comuns ( $0,6 \mu\text{m}$ ). Assim, a utilização do laser como iluminação para fotografia se mostrou muito pior que a iluminação não coerente, sendo logo descontinuado para essa finalidade.

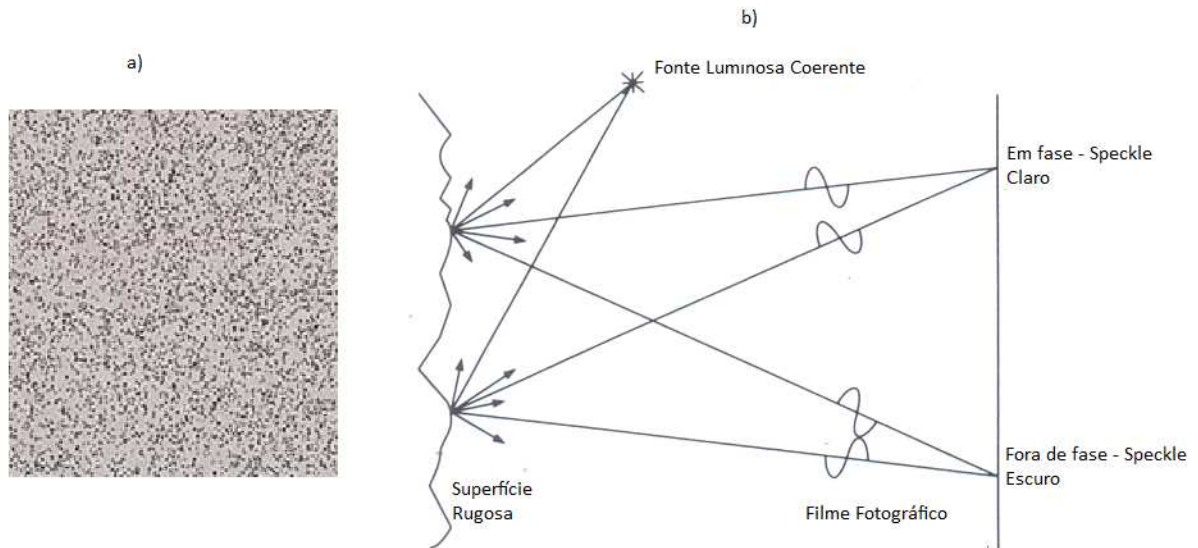


Figura 2.15 – a) Imagem feita com iluminação laser de uma superfície óticamente rugosa b) Formação do efeito speckle.

#### a) *Speckle objetivo*

Para visualizar melhor a formação dos speckles é necessário simplificar a explanação sobre o processo. Todo ponto em uma superfície iluminada pode ser considerado como um absorvedor e reemissor de luz. Esse ponto emite ondas esféricas similares às descritas pelas



equações de Huygens-Fresnel para a difração. O caminho ótico que cada feixe de onda reemitido pela superfície vai seguir depende da forma da rugosidade local da superfície. Dessa forma, a intensidade de cada ponto na imagem de speckles depende desse caminho ótico bem como da distância (L) do captor ao objeto na qual essa imagem é capturada. Goodman (1976) diz que se um objeto tem área iluminada com diâmetro D e está a uma distância L, o tamanho médio estatístico dos speckles será:

$$S_{obj} = 1.22 \frac{L}{D} \lambda \quad (2.44)$$

O conceito de speckle objetivo vem do fato de a imagem ser observada diretamente, sem o auxílio de nenhum componente ótico. Assim, fica evidente que é muito difícil a utilização do conceito de speckle objetivo na prática, sendo mais comum a existência de padrões subjetivos de speckles.

#### *b) Speckle subjetivo*

A introdução de uma lente no sistema ótico para a formação de uma imagem do padrão de speckle implica na existência de speckle subjetivo. É sabido da teoria ótica que a introdução de uma lente de abertura finita resulta na impossibilidade da transmissão de ondas em frequências abaixo de um limite determinado pela geometria da lente. Isso equivale a dizer que cada lente tem uma resolução fundamental. Dessa forma devemos ter um cuidado especial no uso de lentes para evitar que os speckles formados sejam menores que a resolução do sistema ótico empregado, o que implicaria na distorção do padrão, impossibilitando sua utilização.

No campo da ótica, a resolução de um sistema é a capacidade do mesmo separar detalhes em imagens próximas, ou seja, a resolução é a mínima distância que dois objetos podem assumir de forma que seja possível identificar os dois separadamente. O conceito de resolução espacial pode ser derivado do conceito de resolução angular o qual, por sua vez, é

baseado na teoria da difração da luz se propagando por uma abertura. Pelo conceito de Rayleigh, temos a Equação 2.45 que fornece a resolução espacial, onde  $f$  é a distância focal,  $D$  o diâmetro da abertura e  $\lambda$  o comprimento de onda da luz incidente.

$$\Delta l = 1.22 \frac{f\lambda}{D} \quad (2.45)$$

O tamanho do speckle pode ser definido como sendo o limite de resolução do sistema. Para tanto, a taxa de abertura do sistema é definida como sendo  $F = \text{comprimento focal}/\text{abertura} = f/a$ , e  $M$  como sendo a magnificação (ou Amplificação) do sistema. Tem-se:

$$S_{subj} \approx 1.22(1 + M)\lambda F \quad (2.46)$$

### *c) Distribuição das intensidades*

A intensidade de cada ponto em um padrão é definida estatisticamente por Goodman (1975). Devido à natureza da superfície iluminada é possível ter dois tipos diferentes de padrões. O primeiro, conhecido como completamente desenvolvido, representa padrões formados a partir da interferência de luz polarizada homogeneamente resultando em um padrão igualmente polarizado. Isso ocorre quando a luz é simplesmente espalhada na superfície iluminada.

No entanto, algumas superfícies como o vidro opaco ou objetos com uma camada superficial de tinta branca, nas quais a luz penetra antes de ser refletida e espalhada, geram despolarizações na luz. Nesse caso surge um padrão não completamente desenvolvido. Ennos (1975) mostrou que as distribuições de brilho dessas duas classes de padrões são diferentes. Para a compreensão dos seguintes passos desse trabalho será apresentada apenas a distribuição de brilho referente ao padrão completamente desenvolvido, dada pela Equação 2.47.

$$P(I)dI = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left(\frac{-I}{\langle I \rangle}\right) \quad (2.47)$$

Na Equação 2.47 é mostrada a distribuição estatística das intensidades no padrão de speckle, sendo que  $\langle I \rangle$  é a intensidade média do padrão, obtida através de uma amostragem de vários pontos do padrão. Nessa Equação a probabilidade da intensidade  $I$  em um determinado ponto está entre  $I$  e  $I + dI$ . A Figura 2.16 mostra a densidade de probabilidade da distribuição de intensidades em um padrão de speckles completamente desenvolvido.

Uma prática comum nos experimentos que utilizam técnicas de interferometria é a adição de um feixe de referência para interferir com o feixe objeto, formando um padrão de interferência. A adição desse feixe irá gerar efeitos tanto no tamanho dos speckles como na distribuição das intensidades. Ennos (1975) demonstra que a adição do feixe de referência dobra o tamanho do speckle médio.

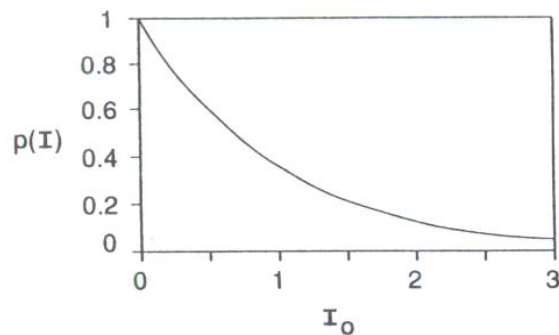


Figura 2.16 – Densidade de probabilidade das intensidades em um padrão completamente desenvolvido de speckles. [Adaptado de Cloud, 1998]

Já para a distribuição das intensidades Burch (1970) analisou estatisticamente os efeitos sentidos pela adição da referência. A Equação 2.48 mostra essa nova distribuição de intensidades, sendo que nessa equação  $J_0$  é dada por uma função de Bessel de ordem zero.

$$P(I) = \left(\frac{2}{I_0}\right) \exp - \left(1 + 2\frac{I}{I_0}\right) J_0 \left[ 2\left(2\frac{I}{I_0}\right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.48)$$

Essa função não difere muito do padrão de speckle formado por apenas um feixe objeto. Aqui haverá ainda um predomínio absoluto dos pontos escuros. A Figura 2.17 mostra a densidade de intensidades para a Equação 2.48.

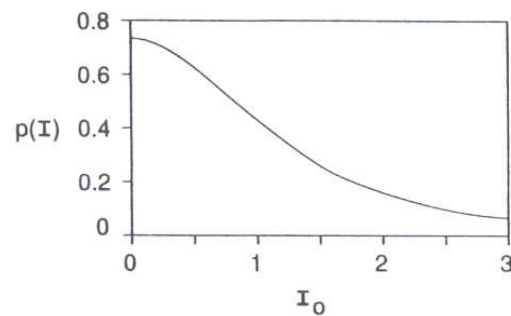


Figura 2.17 – Densidade de probabilidade das intensidades para uma combinação coerente de padrões de speckle. [Adaptado de Cloud, 1998]

### 2.2.5 Interferometria de speckle

A interferometria de speckles consiste na observação de um padrão de franjas derivado da observação de uma superfície ópticamente rugosa iluminada com luz coerente em dois momentos diferentes, sendo em geral, um estado não deformado seguido de um estado com a peça já carregada. Em razão do método de gravação do padrão e da observação das franjas, essas podem ser sensíveis a deslocamentos locais, a gradientes de deslocamento ou mesmo à primeira derivada do gradiente de deslocamentos. Esta seção apresenta os três tipos principais de interferometria de speckles.

### a) Fotografia de speckles

Essa técnica se assemelha à holografia de dupla exposição, utilizando o mesmo princípio de gravação das imagens. Um objeto é iluminado com luz coerente em uma posição não deformada gerando uma primeira imagem que é capturada. Em seguida, o objeto é carregado e em seguida iluminado novamente pela mesma luz tendo essa segunda imagem gravada sobre o mesmo filme fotográfico que a primeira. Cada uma dessas imagens corresponde a um padrão de speckles do mesmo objeto, sendo que pode-se considerar esses padrões como idênticos, a menos do fato de eles estarem deslocados. As condições necessárias para assumir que ambos os padrões são idênticos estão mostradas no apêndice A, que trata das considerações pertinentes à hipótese de pequenas deformações.

O quão deslocado estão os padrões é função do deslocamento sofrido pelo objeto entre as duas gravações, assim, se o deslocamento entre os dois padrões pode ser medido, podemos determinar o deslocamento sofrido pelo objeto.

A técnica mais comum de fotografia de speckles é a de abertura única, sendo que variações dessa técnica, como o uso de abertura dupla e a fotografia de speckles com luz branca, têm aplicações muito específicas e não serão abordadas. Para abertura única podemos utilizar um aparato de gravação de imagens como mostrado na Figura 2.18.

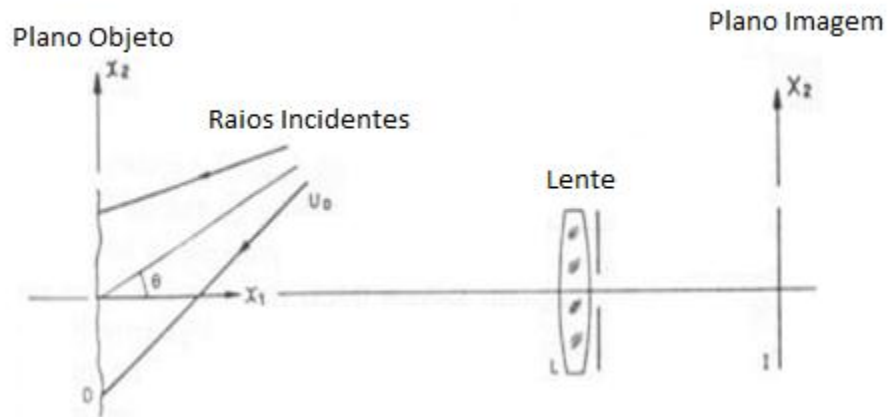


Figura 2.18 – Arranjo básico gravação de uma imagem de speckle plana. [Adaptado de Jones & Wykes]

Nesse arranjo a abertura da lente determina o tamanho do speckle gravado, como mostrado na Equação 2.46. Uma dupla exposição comum é utilizada aqui para se obter ambos padrões de speckle do objeto. O filme contendo os padrões não possui franjas evidentes quando observado com iluminação natural. Porém, quando iluminado com uma fonte luminosa pontual, fica evidente uma complexa rede de difração na qual várias franjas de Young de diferente ordem podem ser observadas. A distância entre as franjas e a orientação delas é função do deslocamento de cada parte de objeto.

Para descrever matematicamente essa técnica admite-se que cada padrão possui uma distribuição de amplitudes que é função da posição no filme fotográfico, tal como  $A(x,y)$ . Sabe-se também que a intensidade luminosa em um determinado ponto é função quadrática da amplitude  $I = A^2(x,y)$ . Como os dois padrões são considerados idênticos, exceto por um deslocamento, define-se a intensidade luminosa do segundo padrão pela Equação 2.49.

$$I(x + u, y + v) = A^2(x + u, y + v) \quad (2.49)$$

A intensidade total vista no padrão será a soma das intensidades de cada imagem. A Figura 2.19a apresenta uma fotografia de speckles iluminada com uma fonte pontual formando um padrão de franjas de Young. Sabe-se que a distância entre as franjas se relaciona com o deslocamento sofrido pelo objeto. Definindo  $p$  como sendo o espaçamento entre dois speckles, a distância do filme à tela é  $D$  e o espaçamento entre as franjas  $d$ . Pela Figura 2.19b pode-se deduzir a distância entre os speckles por meio da Equação 2.50.

$$\text{sen } \theta \approx \tan \theta = \frac{d}{D} = \frac{\lambda}{p}$$

Daí:

$$p = \frac{\lambda D}{d} \quad (2.50)$$

A partir da distância entre os pares de speckles pode-se determinar o quanto o objeto se deslocou, uma vez que o padrão também se desloca em uma proporção equivalente à magnificação do sistema ótico.

Essa técnica é limitada principalmente em relação à sua sensibilidade. Para que as franjas sejam visíveis, o deslocamento do objeto no plano de gravação do padrão deve ser maior que o tamanho do speckle no mesmo plano. Sendo assim, o deslocamento mínimo é dado pela Equação 2.51, onde  $q_s$  é o tamanho do speckle e  $M$  a magnificação do sistema.

$$d_{min} > \frac{q_s}{M} \quad (2.51)$$

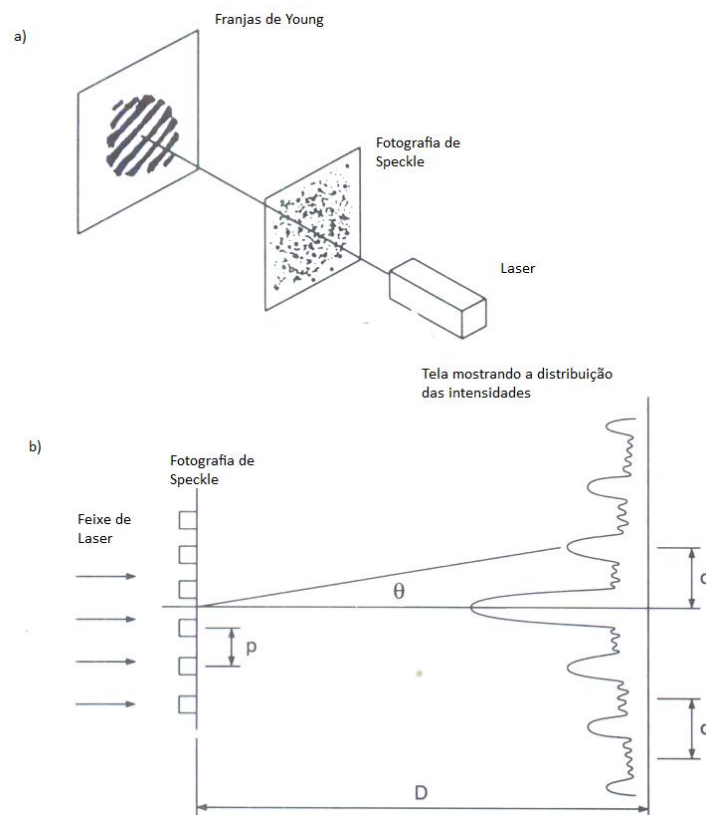


Figura 2.19 – a) Formação das franjas de Young a partir de um padrão de speckles b) Relação entre a distância entre um par de speckles e as franjas de Young. [Adaptado de Cloud, 1998]

Além disso, o deslocamento deve respeitar o máximo determinado pela perda de correlação do padrão, descrita no apêndice B. Por fim o tamanho máximo do objeto iluminado é limitado apenas pela potência do laser. No entanto, quando áreas muito grandes são iluminadas, erros devido a aberrações na lente surgem, prejudicando a qualidade do padrão obtido.

#### *b) Interferometria por correlação de speckle*

Esse método é de especial interesse por ser a base para a interferometria eletrônica por padrão de speckles, que vem ganhando importância muito rapidamente tanto no meio científico quanto industrial, à medida que seu potencial vem sendo convertido em aplicações de grande utilidade. A diferença principal desse método para a fotografia de speckles é a introdução de um novo padrão para interferir com o obtido do objeto iluminado a cada gravação. Em geral, esse novo padrão é um feixe de referência, que se mistura de forma coerente com o primeiro, formando franjas de interferência. As principais vantagens desse método são a sua maior sensibilidade a deslocamentos fora do plano e a possibilidade de comparar os padrões eletronicamente, fazendo uso de processamento digital de imagens.

Quando o objeto sendo iluminado é deslocado, os speckles acompanham a movimentação. No entanto, essa variação é muito pequena para deslocamentos longitudinais (fora do plano, na direção  $z$ ). Isso porque os grupos de ondas formados pelos speckles são muito alongados, como explicita Vest (1979). Os speckles são visíveis apenas quando atingem o filme de gravação, sendo que esse alongamento das ondas previne grandes modificações no padrão quando o objeto sofre deslocamentos na direção  $z$ , como se pode ver na Figura 2.20a.

Porém, quando é adicionado à montagem básica um feixe de referência com ângulo de incidência muito próximo de zero o alongamento dessas ondas diminuirá consideravelmente, como pode ser visto pela Figura 2.20b. O efeito da introdução do feixe de referência é tornar o speckle muito dependente da diferença de fase entre o feixe objeto e



o feixe de referência. Com isso, além de diminuir o alongamento dos grupos de onda, esses passam a ser periódicos. Assim quando introduzimos um deslocamento no objeto de meio comprimento de onda na direção fora do plano, o speckle irá mudar de claro para escuro, o que faz essa técnica mais sensível a esse tipo de deslocamento.

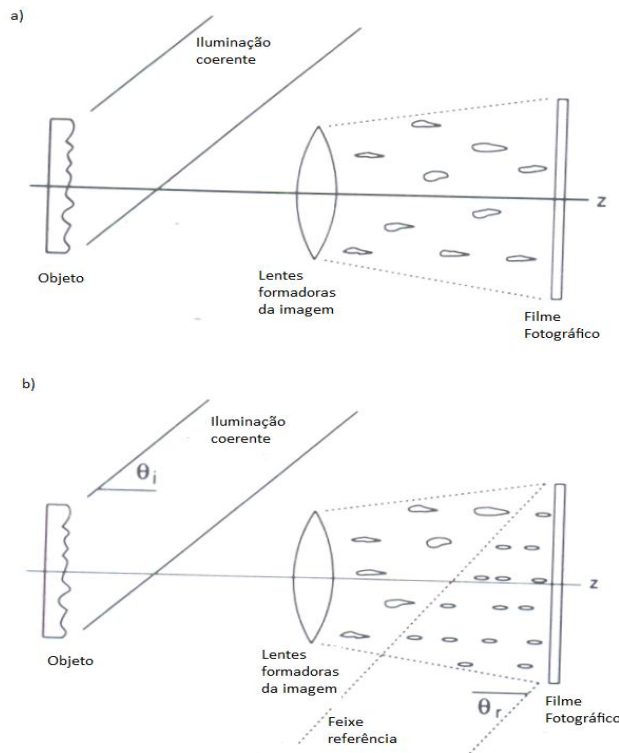


Figura 2.20 – Conceito de aparecimento de speckles a) sem feixe de referência b) com feixe de referência. [Adaptado de Cloud, 1998]

Para fazer a captura e correlação das imagens nos dois estados do objeto três métodos podem ser usados. O primeiro método é a interferometria de tempo real, na qual o primeiro estado é registrado num filme fotográfico, revelado e em seguida posto de volta à mesma posição utilizada para a primeira gravação. Esse filme contém o negativo do padrão. Quando levado à posição original, com o objeto iluminado, os speckles claros irão se alinhar com os pontos escuros no filme, deixando a imagem completamente escura. Quando o objeto é movimentado, os speckles do feixe objeto irão se deslocar juntamente, fazendo com que a imagem no filme comece a apresentar franjas originárias da interferência dos

dois padrões. A grande dificuldade desse método é o posicionamento do filme após a primeira gravação, sendo necessário um sistema de posicionamento com mecânica fina para alcançar precisão de ordem maior que o comprimento de onda do laser.

O segundo método é o de dupla exposição no qual os padrões nos dois estados do objeto são gravados sobre o mesmo filme, muito semelhante ao feito para padrões holográficos. O principal inconveniente dessa técnica é a baixa visibilidade das franjas, devido à diminuição da resolução causada por fenômenos de difusão da emulsão fotográfica durante as gravações. Por fim, há o método de exposição por tempo médio, que é semelhante à gravação de um único holograma e que necessita de uma fonte de vibração do objeto.

Para fazer gravações sensíveis a deslocamentos fora e dentro do plano são necessárias montagens diferentes. Inicialmente este trabalho trata do caso fora do plano. A montagem básica, deixando de fora fonte de luz, espelhos e filtros pode ser vista na Figura 2.21.

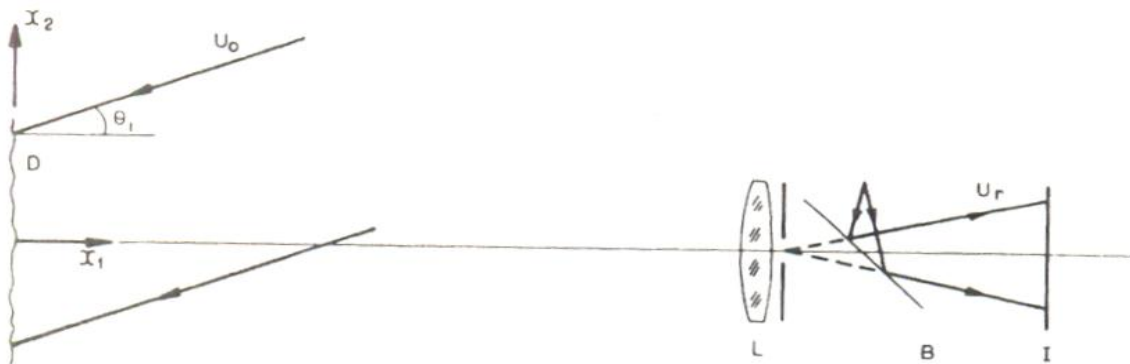


Figura 2.21 – Montagem básica para o método da dupla exposição. [Adaptado de Jones & Wykes, 1983]

Nesse arranjo é considerado o ângulo de observação  $\theta_v = 0^\circ$ . Assume-se, por simplicidade, que o sistema é operado em interferometria de tempo real. Considera-se  $\Delta\Phi$  como a diferença de fase entre os padrões nos dois estados do objeto e  $\Delta z$  a variação da posição. Dessa forma, a relação das fases entre as gravações é dada pela Equação 2.52.

$$\Delta\Phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)(1 + \cos\theta_i)\Delta z \quad (2.52)$$

O brilho da imagem vista no filme fotográfico, que é o negativo do padrão original, irá variar conforme o objeto é deslocado na direção  $z$ . As franjas escuras serão vistas a cada deslocamento de  $\Delta\Phi = 2n\pi$ , sendo que aparecerão franjas escuras no padrão sempre que:

$$\Delta z = \frac{n\lambda}{1 + \cos\theta_i} \quad (2.53)$$

O princípio descrito pelas equações 2.52 e 2.53 é utilizado em muitas aplicações de interferometria de speckle, incluindo ESPI. Para algumas aplicações pontuais, no entanto, a montagem apresentada na Figura 2.18 pode ter uma sensibilidade muito alta. Jones e Wykes (1983) propõem o uso de dois feixes iluminando o objeto com ângulos de incidência diferentes e a eliminação do feixe de referência como solução para a sensibilidade. Ao fazer isso a relação entre as fases e o deslocamento em  $z$  passa a ser:

$$\Delta\Phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)(\cos\theta_{i1} - \cos\theta_{i2})\Delta z \quad (2.54)$$

Por meio da Equação 2.54 é possível notar que menores deslocamentos em  $z$  introduzem maiores variações de fase no padrão. Já para deslocamentos no plano, Leendertz (1970) propõe o arranjo da Figura 2.22. Nesse arranjo dois feixes objetos com ângulos de incidência iguais em magnitude, porém direcionalmente opostos, são usados.

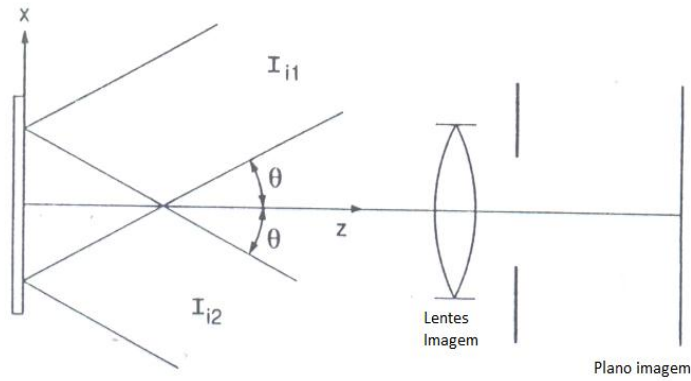


Figura 2.22 – Arranjo para medições fora do plano. [Adaptado de Leendertz, 1970]

Nesse arranjo a relação da variação da fase com o deslocamento é dada pela Equação 2.55, na qual  $d_x$  refere-se ao deslocamento na direção  $x$ , sendo que para deslocamentos em  $y$  a equação é a mesma, exceto pelo termo  $d_y$  no lugar de  $d_x$ . A demonstração de validade dessa equação é suprimida, mas pode ser encontrada em Cloud (1998) e Jones e Wykes (1983).

$$\Delta\Phi = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) d_x \text{sen } \theta \quad (2.55)$$

A Equação 2.55 descreve a variação de fase sensível à apenas uma direção de deslocamento. Nesse caso, ambos os feixes de iluminação se propagam no mesmo plano (seja  $xz$  ou  $yz$ ). Para fazer a medição do campo de deslocamento completo no plano  $xy$  precisamos fazer duas medições individuais e somá-las. Uma alternativa a isso seria utilizar um feixe de iluminação se propagando em  $xz$  e outro em  $yz$ . Assim a relação de fase com o deslocamento seria dada pela Equação 2.56.

$$\Delta\Phi = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) (d_x - d_y) \text{sen } \theta \quad (2.56)$$

Dois outros arranjos alternativos para medições em plano são mostrados na Figura 2.23, sendo que ambos foram propostos por Jones e Wykes (1983).

### **2.2.6 – Eletronic Speckle Pattern Interferometry**

Os padrões de speckle tipicamente têm speckles de tamanho mínimo da ordem de 5 a 100  $\mu\text{m}$ , o que possibilita a aquisição de imagens utilizando câmeras de televisão comuns. Com esses padrões obtidos eletronicamente pode-se utilizar processamento convencional de imagens para obter correlação de franjas semelhantes às obtidas manualmente através dos padrões fotográficos. Essa metodologia é conhecida como ESPI e foi primeiramente descrita por Butters e Leendertz (1971), com trabalhos semelhantes sendo apresentados por Biedermann et al. (1975) e Lokberg et al. (1976).

A maior vantagem do emprego da técnica de ESPI é justamente a possibilidade da obtenção dos padrões de correlação de franjas em tempo real na tela do monitor, durante a aplicação da carga no corpo de prova, sem a necessidade de nenhuma forma de tratamento de fotografia, realocação de filme fotográfico, ou qualquer intervenção sobre o sistema durante o ensaio.

A correlação de intensidades utilizando a técnica ESPI pode ser feita tanto por adição quanto por subtração dos padrões. Quando a subtração é utilizada, captura-se uma imagem do padrão de speckles obtido do objeto não deformado e em seguida esta é gravada eletronicamente na memória da central de processamento. Em seguida o objeto é deformado e o sinal obtido a cada momento durante a deformação é subtraído do padrão gravado, gerando um padrão de franjas de interferência que passa por um filtro passa alta e é retificada e mostrada na tela. Para a soma dos padrões o processo é similar, somando-se os sinais em tempo real ao invés de subtraí-los. O sinal resultante é também filtrado e retificado antes de ser disponibilizado.

A exata relação entre as intensidades da imagem mostrada no monitor e a imagem original é uma função complicada que envolve tanto o processamento eletrônico realizado quanto o brilho e o contraste do monitor. Para a análise das franjas mostradas considera-se que a voltagem na saída do captador da câmera é linearmente proporcional à intensidade da imagem original e que o brilho do monitor é proporcional à voltagem de saída de câmera.

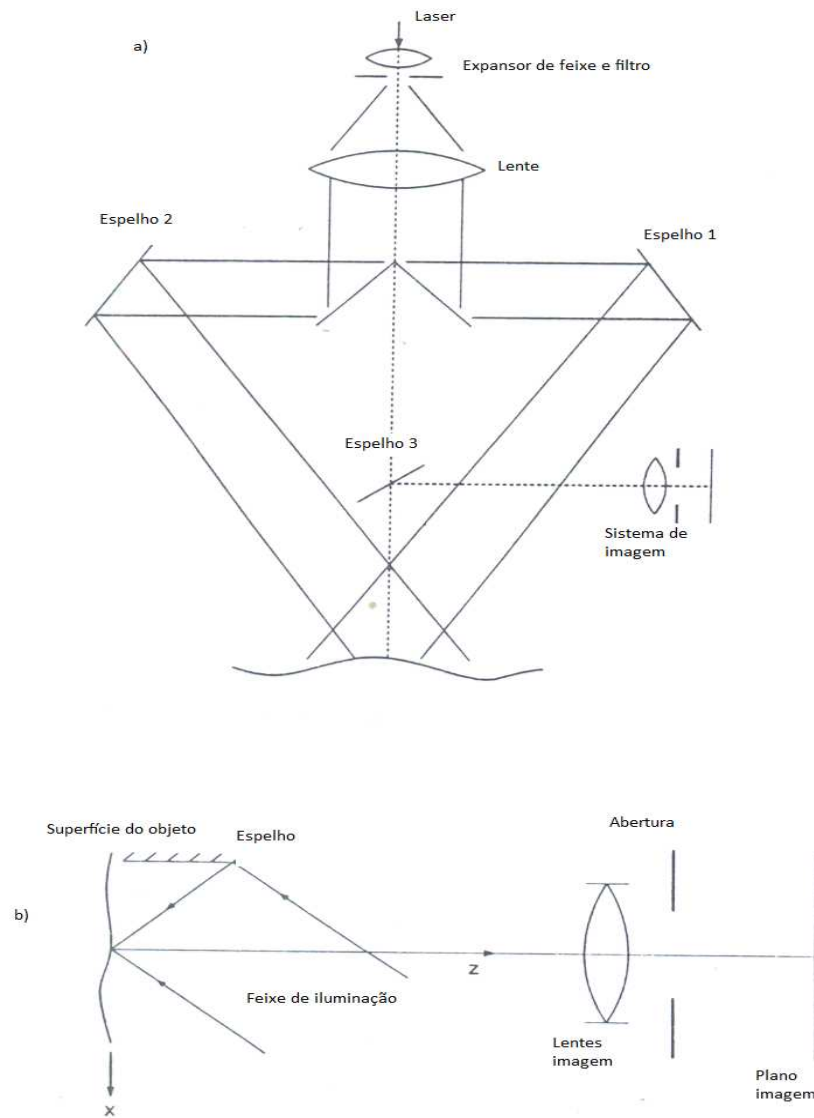


Figura 2.23 – Arranjos alternativos para medições no plano. [Adaptado de Jones & Wykes, 1983]

Inicialmente, posiciona-se o captor da câmara no plano imagem do interferômetro de speckle utilizado. Seguindo a metodologia faz-se a captura da imagem relativa ao objeto no estado não deformado e em seguida esta é armazenada. Por fim o objeto é deformado e o sinal é subtraído em tempo real e mostrado na tela.

As áreas em que o objeto não experimenta deformação, ou nas quais os padrões mantêm correlação perfeita aparecerão com sinal zero resultante (ou seja, como uma região preta). As áreas nas quais a correlação não é mantida resultam em sinais não nulos com intensidades variáveis. As equações 2.57 e 2.58 mostram as intensidades dos padrões antes ( $\mathfrak{S}_1$ ) e depois ( $\mathfrak{S}_2$ ) do carregamento, onde  $I_1$  e  $I_2$  representam as intensidades de cada um dos respectivos feixes que incidem sobre o objeto,  $\psi$  a diferença de fase entre os feixes e  $\Delta\phi$  a diferença de fase referente ao deslocamento.

$$\mathfrak{S}_1 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \psi \quad (2.57)$$

$$\mathfrak{S}_2 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\psi + \Delta\phi) \quad (2.58)$$

Uma vez que as tensões de saída da câmara  $V_1$  e  $V_2$  são proporcionais à intensidade da imagem original captada, o sinal subtraído é dado pela Equação 2.59.

$$V_s = (V_1 - V_2) \propto (\mathfrak{S}_1 - \mathfrak{S}_2) = 2\sqrt{I_1 I_2} [\cos \psi - \cos(\psi + \Delta\phi)] = 4\sqrt{I_1 I_2} \sin\left(\psi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \sin\frac{1}{2}\Delta\phi \quad (2.59)$$

Esse sinal possui valores negativos. O monitor mostra para sinais negativos pontos escuros (de sinal nulo), o que não corresponde à realidade nesse caso. Para se evitar esse problema o sinal é retificado, sendo que o sinal enviado ao monitor para ser mostrado é equivalente à  $|V_s|$ . Dessa forma o brilho  $B$  em um dado ponto no monitor será dado pela Equação 2.60, onde  $K$  é uma constante.

$$Br = 4K[I_1 I_2 \sin^2\left(\psi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \sin^2\frac{1}{2}\Delta\phi] \quad (2.60)$$

Como o brilho é a média ao longo de uma linha com diferença de fase relativa ao deslocamento constante ( $\Delta\phi = \text{constante}$ ), ele varia entre um máximo  $B_{\max}$  e um mínimo  $B_{\min}$  dados pelas equações 2.61 e 2.62 respectivamente.

$$Br_{\max} = 2K\sqrt{I_1 I_2}, \quad \Delta\phi = (2n+1)\pi, \quad n = 0, 1, 2... \quad (2.61)$$

$$Br_{\min} = 0, \quad \Delta\phi = 2n\pi, \quad n = 0, 1, 2... \quad (2.62)$$

O uso do filtro de passa alta melhora a visibilidade das franjas, pois remove os ruídos de baixa frequência junto com as variações na média das intensidades dos speckles e é normalmente utilizado para aumentar a clareza das franjas.

Outra forma de fazer a correlação das franjas, como já dito anteriormente, é fazendo a soma dos sinais obtidos antes e depois da deformação do objeto. Neste método a câmera é novamente posicionada no plano da imagem do interferômetro. As duas imagens não precisam ser superpostas simultaneamente uma vez que a câmera tem a característica de persistência temporal da ordem de 1 ms, fazendo com que a voltagem de saída da câmera seja proporcional à soma das intensidades se o tempo entre as iluminações do objeto for menor que o tempo de persistência. Essa técnica é mais utilizada quando um laser de pulso dual é utilizado, ou quando se deseja observar o valor médio das franjas no tempo.

Quando os dois padrões de speckle são somados, áreas de correlação máxima apresentarão os maiores contrastes dos speckles, sendo que quando a correlação diminui, o contraste dos speckles acompanha a tendência, diminuindo seu valor. O contraste diminui a um valor mínimo, mas não chega à zero, valor no qual os dois padrões estão completamente descorrelacionados. A voltagem de saída da câmera  $V_A$  é proporcional à soma das intensidades e é dada pela Equação 2.63.

$$V_A \propto (\mathfrak{S}_1 + \mathfrak{S}_2) = 2I_1 + 2I_2 + 4\sqrt{I_1 I_2} \cos(\psi + \frac{1}{2}\Delta\phi) \cos\frac{1}{2}\Delta\phi \quad (2.63)$$



O contraste do padrão de speckle obtido pode ser definido como o desvio padrão da intensidade. Para uma linha de diferença de fase do deslocamento  $\Delta\phi$  constante, pode-se mostrar que o contraste do padrão resultante  $\sigma_{12}$  é dado pela Equação 2.64, onde  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são os desvios padrão das intensidades  $I_1$  e  $I_2$ , respectivamente.

$$\sigma_{12} = 2[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 8\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle \cos^2 \frac{1}{2} \Delta\phi]^{\frac{1}{2}} \quad (2.64)$$

Como já dito anteriormente, e observado da Equação 2.64, os valores do contraste  $\sigma_{12}$  variam entre um valor máximo e mínimo, conforme visto nas equações 2.65 e 2.66.

$$[\sigma_{12}]_{m\acute{a}x} = 2[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2I_1 I_2]^{\frac{1}{2}}, \quad \Delta\phi = 2n\pi, \quad n = 0, 1, 2 \quad (2.65)$$

$$[\sigma_{12}]_{m\acute{i}n} = 2[\sigma_1^2 + \sigma_2^2]^{\frac{1}{2}}, \quad \Delta\phi = (2n + 1)\pi, \quad n = 0, 1, 2 \quad (2.66)$$

Enquanto o valor do contraste das intensidades somadas varia, o valor médio da intensidade resultante se mantém constante ao longo de uma linha de diferença de fase  $\Delta\phi$  constante, como mostrado na Equação 2.67. Assim, quando a soma dos dois padrões de speckles é mostrada diretamente na tela, a média das intensidades é constante e a variação na correlação é mostrada como uma variação no contraste dos padrões, mas não nas intensidades. A componente de corrente contínua do sinal é removida pelo uso de filtros, gerando o sinal retificado. O brilho resultante no monitor pode ser considerado como proporcional à raiz quadrada do contraste  $\sigma_{12}$ , como visto na Equação 2.68.

$$\langle \mathfrak{I}_1 + \mathfrak{I}_2 \rangle = 2\langle I_1 \rangle + 2\langle I_2 \rangle \quad (2.67)$$

$$Br = K \left[ \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle \cos^2 \frac{1}{2} \Delta\phi \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.68)$$

Assim, as intensidades mostradas no monitor variarão entre o valor máximo e mínimo mostrados nas equações 2.65 e 2.66 que, quando comparadas com as equações

2.60, 2.61 e 2.62, mostram que os pontos de brilho mínimo das franjas obtidos pela técnica de subtração dos sinais correspondem aos pontos de brilho máximo obtidos através da adição do sinal. Nota-se também que a subtração dos sinais fornece uma visibilidade muito melhor das franjas, uma vez que o brilho mínimo obtido (padrões totalmente descorrelacionados) corresponde a um sinal zero, enquanto quando somamos os padrões esse mínimo é diferente de zero, sendo assim mais difícil de ser identificado. Porém, quando a soma é utilizada não necessitamos de um armazenador de sinal, o que torna o sistema mais simples.

A capacidade do sistema de vídeo de diferenciar pequenos detalhes nas imagens é claramente limitada. Seja a imagem de uma malha grosseira em branco e preto no captor da câmera mostrada no monitor; quando a malha é refinada, diminuindo seu espaçamento, uma malha equivalente será observada na tela. Conforme espaçamento da malha for reduzido, o contraste dela é reduzido. Quando essa malha for suficientemente pequena, nenhuma estrutura de malha será observada no monitor.

A frequência de resposta de uma câmera é determinada primeiramente pelo tamanho e espaçamento de cada fotodetector usado e, em segundo lugar, pela frequência de resposta do circuito usado subsequentemente no processamento do sinal. Pelo teorema da amostragem de Nyquist-Shannon sabe-se que a máxima frequência presente no sinal deve ser menor ou igual à metade da frequência de amostragem do sistema. Para satisfazer esse requisito, o espaçamento dos elementos deve ser tal que corresponda à metade de um comprimento de onda da maior frequência espacial no padrão de speckles. Normalmente esse espaçamento é da ordem de  $20\ \mu\text{m}$ , correspondente a uma frequência espacial de  $50\ \text{mm}^{-1}$ . Para os dispositivos ESPI, no entanto, essa condição não precisa ser necessariamente satisfeita, uma vez que frequências maiores se confundem com sinais de menor frequência (um efeito que pode ser observado em câmeras de televisão normais, quando padrões muito finos de um objeto aparecem muito mais grosseiros na tela). Esse efeito pode trazer contribuições úteis para o sinal que gera as franjas.

A seguir faz-se uma rápida abordagem dos principais fatores de influência na qualidade dos padrões de speckles obtidos por ESPI.

*a) Otimização da intensidade da iluminação*

Para um dado tipo de câmera de TV, um nível mínimo de intensidade de luz deve atingir o captor da câmera para que um sinal de saída seja criado. Este deve possuir uma determinada intensidade para que possa ser captado e distinguido do ruído eletrônico inerente ao equipamento. Um aumento na intensidade de luz captada acarreta um aumento na intensidade do sinal de saída da câmera. Essa relação é verdadeira até que o sinal de saída atinja um nível de saturação, acima do qual a voltagem obtida na saída permanece constante para todo aumento de intensidade no captor.

A intensidade dos padrões de speckles varia randomicamente ao longo de toda a imagem sendo captada. Para evitar a perda de informação, a intensidade global do padrão deve estar abaixo da saturação da câmera para toda a área útil da imagem. A Equação 2.69 mostra a relação que deve ser mantida para todo o padrão de speckle, onde  $\langle I_t \rangle$  é o valor médio da intensidade,  $\langle \sigma_t \rangle$  o desvio padrão da mesma e  $I_{sat}$  a intensidade de saturação da câmera.

$$\langle I_t \rangle + 2\sigma_t < I_{sat} \quad (2.69)$$

Quando a Equação 2.69 é satisfeita a intensidade do padrão é menor que a intensidade de saturação para 95% da imagem. Quando são utilizados dois feixes para a iluminação do objeto e a subtração como método de correlação dos padrões, a intensidade média dos feixes que atinge o objeto deve ser igual aos valores médios de cada feixe, e o pico combinado de intensidade deve ser aproximadamente igual à intensidade de saturação da câmera. Quando apenas um feixe de referência é utilizado, esse deve ser ajustado em acordo com a Equação 2.70.

$$\frac{1}{4} I_{sat} \leq \langle I_r \rangle \leq \frac{1}{2} I_{sat} \quad (2.70)$$

### *b) Resolução da câmera e tamanho do speckle*

A escolha dos equipamentos de captação e tratamento das imagens deve sempre ter como principal objetivo a capacidade desse sistema prover uma resolução adequada ao padrão de speckles obtido. A resolução espacial de um sistema de vídeo na direção vertical é dada pelo número de linhas de scan. Um sistema padrão que possui 525 linhas de scan e um detector ativo de área 13 x 10 mm, por exemplo, deve ter no mínimo uma resolução vertical da ordem de 20  $\mu\text{m}$  no plano de detecção.

Já para a resolução horizontal, a frequência temporal de resposta do sistema de vídeo é o principal fator. Em geral, a resposta é razoavelmente uniforme para valores de até 4 MHz e cai para valores mais baixos para 10 MHz. Aqui, ressalta-se que a frequência temporal de resposta está diretamente relacionada à frequência espacial presente na imagem. Como exemplo, quando há uma malha de 20  $\mu\text{m}$  de espaçamento na direção horizontal, haverá uma voltagem de saída com frequência de 9,45 MHz. Como dito anteriormente, a 10 MHz tem-se um sinal de baixa intensidade para a resposta em frequência. Assim, pode-se considerar 20  $\mu\text{m}$  como o limite superior de resolução na direção horizontal. Pode-se também concluir que tanto o limite horizontal quanto vertical são praticamente idênticos e da ordem de 20  $\mu\text{m}$  para um sistema de vídeo padrão.

Das equações 2.60, 2.61 e 2.62 foi visto que a correlação das franjas surge a partir da variação do desvio padrão do sinal subtraído ou somado seguindo as variações na diferença de fase geradas por diferença na posição ( $\Delta\phi$ ). Se o contraste de cada um dos sinais é reduzido, o desvio padrão do sinal subtraído ou somado também será reduzido e a visibilidade das franjas de correlação irá diminuir como consequência. O sinal de saída da câmera pode ser expresso pela Equação 2.71, na qual o termo  $V_1$  surge a partir do termo ( $I_1 + I_2$ ) e o termo  $(V_{cor})_{2,1}$  vem de  $2(I_1 I_2)^{1/2} \cos\psi$  e  $2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\psi + \Delta\phi)$ .

$$V_{2,1} = V_1 + (V_{cor})_{2,1} \quad (2.71)$$

Como  $V_1$  permanece inalterada quando o objeto é deslocado, esse termo é ruído. Dessa forma, haverá uma maximização da visibilidade das franjas quando o desvio padrão do termo  $(V_{cor})_{2,1}$  for maximizado. Para um dado ponto dentro da imagem, o valor de  $(V_{cor})_{2,1}$  é dado pela Equação 2.72, onde  $k$  é uma constante, e  $\Delta A$  é o valor equivalente da área de útil de captação da câmera.

$$(V_{cor})_{2,1} = k\langle\sqrt{I_1 I_2} \cos(\psi + \Delta\phi)\rangle\Delta A \quad (2.72)$$

Se a variação de  $\psi$  ao longo da área útil é menor que  $2\pi$ , então o valor de  $(V_{cor})_{2,1}$  para uma linha de  $\Delta\phi$  constante variará entre  $\pm k\langle\sqrt{I_1 I_2} \cos(\psi + \Delta\phi)\rangle\Delta A$ . Quando o valor de  $\psi$  varia de  $2\pi$  ou mais, o valor de  $(V_{cor})_{2,1}$  ao longo de toda a imagem é aproximadamente zero, sendo que nesse caso não se observa nenhuma franja de correlação se formando.

*c) O caso de dois feixes*

Quando duas frentes de ondas de intensidade  $I_1$  e  $I_2$  incidem sobre o objeto, ambos os feixes são carregando informações de speckle. Essa configuração é comumente encontrada na medição de deslocamentos no plano. A distribuição da frequência espacial da combinação de ambos os feixes será similar tanto à distribuição de  $I_1$  quanto de  $I_2$  separadamente. A máxima frequência espacial da distribuição é determinada pelo diâmetro da abertura da lente objetiva e dado pela Equação 2.73, na qual  $d_0$  é distância entre a lente e a imagem,  $M$  é a magnificação da lente e  $a$  é a abertura real da lente.

$$\frac{1}{f_{m\acute{a}x}} \approx 1,22(1 + M) \frac{\lambda d_0}{a} \quad (2.73)$$

Se a distância do objeto à lente objetiva é consideravelmente maior que a distância da lente à imagem, então, da equação constitutiva da lente,  $d_0$  é aproximadamente a distância

focal da lente. O menor speckle tem o seu tamanho  $S_{\text{mín}}$  dado pela Equação 2.74, onde  $F$  é a abertura numérica da lente.

$$S_{\text{mín}} = \frac{1}{f_{\text{máx}}} \approx 1,22(1 + M)\lambda F \quad (2.74)$$

Se, por exemplo, o menor ponto a ser distinguido pelo sistema tem  $20 \mu\text{m}$ , correspondente a uma frequência espacial de 50 linhas/mm, então para uma resolução adequada é necessário uma abertura numérica  $F$  maior que 30. Uma abertura pequena deve ser usada se a escala do padrão de speckles for grande o suficiente para ser detectada pela câmera. Se a abertura numérica, nesse caso, for diminuída (o que aqui significa aumentar a abertura real da lente), a frequência espacial do padrão de speckles irá consequentemente aumentar, e a resolução do sistema não será mais suficiente para a observação do padrão completo.

#### *d) Feixe de referência*

Num sistema que se utiliza de um feixe de referência e que tem como melhor exemplo o arranjo clássico de um interferômetro para a medição de deslocamentos fora do plano,  $I_1$  é uma intensidade randômica de speckle e  $I_2$  é uniforme ao longo de todo o plano imagem. A Figura 2.24 mostra a geometria básica do sistema.

A diferença de fase  $\psi$  entre  $I_1$  e  $I_2$  é dada pela Equação 2.75, a qual leva em consideração os comprimentos do caminho ótico seguido por cada feixe. Na Equação 2.75 temos  $O$  como o centro da abertura da lente objetiva,  $O'$  como o ponto a partir do qual o feixe de referência diverge,  $P$  como um ponto no plano imagem,  $\psi_1$  a fase do feixe de referência em  $O'$  que é constante ao longo do feixe,  $\psi_2$  a fase randômica do feixe objeto em  $O$  e  $l_{OP}$  e  $l_{O'P}$  as distâncias de  $O$  e  $O'$  até  $P$ .

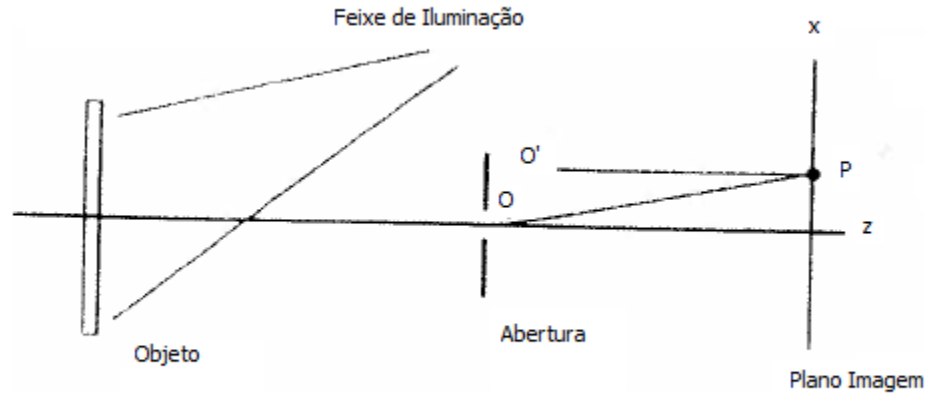


Figura 2.24 – Geometria para um arranjo com feixe de referência [Adaptado de Cloud, 1998].

$$\psi = \psi_2 + \frac{2\pi l_{OP}}{\lambda} - \left[ \psi_1 + \frac{2\pi l_{O'P}}{\lambda} \right] = \psi_2 - \psi_1 + \frac{2\pi}{\lambda} (l_{OP} - l_{O'P}) \quad (2.75)$$

Como já visto anteriormente (na seção b) desse capítulo, se  $\psi$  varia de  $2\pi$  ou mais dentro da área útil da câmera, a correlação do sinal será muito pequena, tendendo a zero. Nesse caso, o interesse maior é no termo  $\Omega = \frac{2\pi}{\lambda} (l_{OP} - l_{O'P})$ , que deve variar consideravelmente menos que  $2\pi$  para que a correlação do sinal não seja pequena. Quando O e O' são coincidentes atinge-se a situação ideal, que quando possível, deve ser satisfeita. Nesse caso diz-se que O e O' são conjugados.

A técnica ESPI tem ganhado espaço a cada dia devido principalmente ao seu grande potencial de aplicação em diversas áreas de medições em engenharias e ciências. Deve-se, no entanto, notar que o método possui suas limitações. As técnicas eletrônicas de speckle bem como de holografia não substituem facilmente as técnicas de holografia baseadas em filmes fotográficos. Ao invés disso, a técnica deve ser encarada como mais uma poderosa ferramenta a ser utilizada em análises experimentais.

Como principais vantagens da técnica ESPI pode-se destacar:

- Quando comparado o tempo gasto na realização de um ensaio utilizando filme fotográfico convencional com a técnica ESPI tem-se uma enorme economia de tempo.
- O ambiente necessário para a realização dos ensaios não requer superfícies altamente estáveis por longos períodos como em outras técnicas.
- O sistema pode ser utilizado em ambientes com iluminação natural ou artificial. Não é necessário o uso de salas escuras.
- Por não necessitar de filme fotográfico e nem de processamento do filme, o custo de material por experimento é muito reduzido, bem como potenciais problemas de segurança.
- Pessoas com pouco conhecimento em ótica podem operar o sistema facilmente.

Entre as desvantagens do emprego do método pode-se citar a sensibilidade das medições, que é menor do que a encontrada em técnicas que utilizam filme fotográfico, e a limitação do tamanho do objeto sendo ensaiado, limitada normalmente pela potência do laser disponível e pelas condições da superfície necessárias, que podem diminuir a tolerância do sistema a pequenas inclinações, como no caso de materiais já desgastados.

### **2.2.7 – Deslocamento de fase**

As técnicas de deslocamento de fase são empregadas nos métodos de interferometria para promover uma melhora tanto na precisão quanto na facilidade de uso e na utilidade dos mesmos. A ideia principal por trás do conceito é inserir em um dos caminhos óticos um dispositivo capaz de aplicar deslocamentos de fase conhecidos. Quando esse procedimento é repetido algumas poucas vezes, é possível deduzir a fase de um ponto aleatório apenas fazendo medições de intensidade nesse ponto.

Quando usado o deslocamento de fase não há mais a necessidade de mapear as franjas e fazer interpolações das mesmas para a obtenção da fase. Isso pode ser considerado



como um grande avanço nas técnicas interferométricas. Com computadores (interferometria eletrônica), a tarefa de identificar uma franja e a partir dela numerar as outras se torna pouco prática, uma vez que os padrões de franjas são em sua maioria muito heterogêneos, o que dificulta a identificação dos centros das franjas e também de seus limites.

Por conta disso concentra-se aqui em tirar proveito das características principais do sistema de aquisição eletrônica (câmera e computador integrados). Uma câmera de vídeo fornece bons mapas de brilho, intensidade e irradiância. Esses mapas podem ser digitalizados de forma rápida e precisa, possibilitando armazenamento fácil. Utilizando-se de algum processamento de imagens os computadores são capazes de reconstruir esses mapas e mostrá-los na tela. O problema então se resume a conseguir extrair as informações necessárias para as análises dos padrões apenas a partir dos mapas de brilho local de cada imagem.

Para ajudar no entendimento do conceito por trás da técnica considera-se um interferômetro simples tal como mostrado na Figura 2.25. Nesse caso, o objetivo é fazer medições de deslocamentos fora do plano (direção  $z$ ) de um ponto  $P$  no objeto. Os fatores geométricos serão ignorados nessa análise, pois é considerado que a luz atinge a superfície próxima ao eixo normal à mesma. Uma onda espalhada pela superfície percorre o caminho ótico ligando o ponto  $P$  ao detector  $Q$ . Nessa análise é incluído também um feixe de referência próximo ao eixo ótico incidindo no detector. As franjas irão, portanto, se formar nas proximidades do detector como visto na Figura 2.25. Considera-se também que as franjas escuras correspondem a irradiância próxima a zero, mas não exatamente devido ao não perfeito balanceamento dos feixes e outras fontes de ruídos.

Agora considera-se que o ponto  $P$  se desloca de uma distância  $d_z$  em direção ao detector, atingindo assim o ponto  $P'$ . As franjas de interferência irão se deslocar juntamente com o ponto relativamente ao detector. O feixe objeto experimentará um deslocamento de fase equivalente a  $\phi = 4\pi d_z/\lambda$ . Aqui o problema se torna deduzir a fase  $\phi$  e o deslocamento  $d_z$  utilizando apenas as medidas de intensidades feitas. A saída mínima do detector equivalente à franja escura será  $I_1$  enquanto a saída do detector após o deslocamento será  $I_2$ . A Equação 2.76 mostra o relacionamento desses fatores.

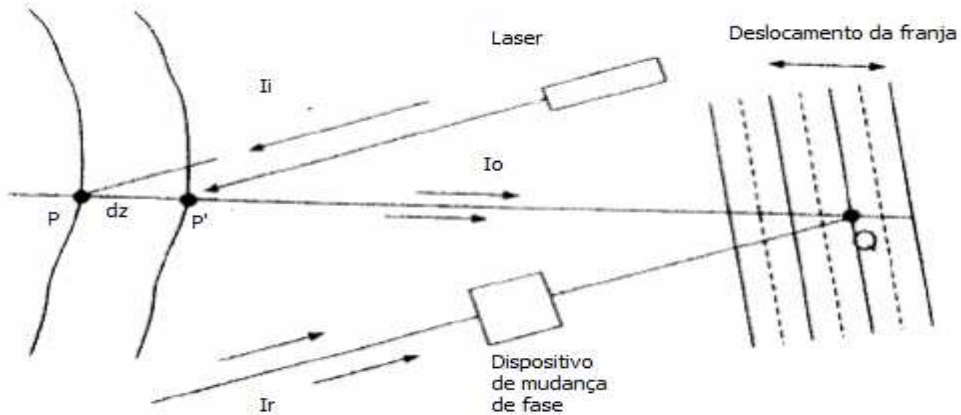


Figura 2.25 – Montagem simples para deslocamento de fase [Adaptado de Cloud, 1998].

$$I_2 = \frac{I_{\text{máx}} + I_1}{2} + \frac{I_{\text{máx}} - I_1}{2} \cos \phi \quad (2.76)$$

Na Equação 2.76 nota-se que ambos os termos estão divididos por dois, que é o termo introduzido uma vez que o caminho ótico diminui o dobro do deslocamento sofrido. Nela há dois termos desconhecidos que são  $I_{\text{máx}}$  e  $\phi$ , o que não possibilita que essa equação seja resolvida. A Figura 2.26 ilustra o problema.

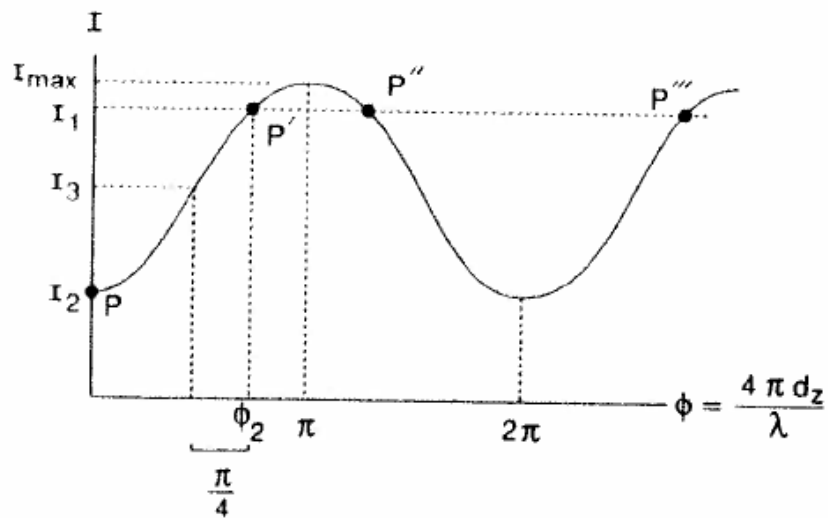


Figura 2.26 – Saída do detector como função do deslocamento de fase [Cloud, 1998].

A forma de resolver esse problema é fazer um novo deslocamento conhecido e então fazer uma nova medição. Uma terceira saída  $I_3$  do detector será registrada, fornecendo uma segunda Equação 2.77. O problema fica então reduzido a duas variáveis e duas equações, o que torna o sistema possível de ser resolvido.

$$I_3 = \frac{I_{máx} + I_1}{2} + \frac{I_{máx} - I_1}{2} \cos\left(\phi - \frac{\pi}{4}\right) \quad (2.77)$$

Pela Equação 2.77 é possível ver que o deslocamento introduzido era conhecido e equivalente a  $\pi/4$ . A partir da resolução do sistema obtém-se o valor de  $\phi$ , a partir do qual é obtido o valor de  $d_z$ . Quando se considera um objeto, basta utilizar um detector com um grande número de captos individuais, para cada qual se aplica o mesmo conceito. Empregando um computador para realizar os cálculos obtém-se a reconstrução do deslocamento de todo o objeto.

Muitas técnicas de mudança de fase são conhecidas. Um ponto em comum a todas é que para as medições é necessária a introdução de uma modulação temporal de fase, que consiste em um deslocamento relativo entre o feixe objeto e o feixe de referência. Esse deslocamento é dependente do tempo. Ao medir as intensidades dos padrões gerados pelos deslocamentos das fases é possível obter a fase da frente de onda, com o auxílio de um sistema de processamento computadorizado.

A forma mais comum de introduzir esses deslocamentos de fase é através da montagem de espelhos sobre um transdutor piezoeletrico (PZT) no feixe de referência. Esses transdutores são responsáveis por mover os espelhos linearmente com um alcance de alguns micrometros. Para realizar os deslocamentos no PZT pode-se utilizar um gerador de sinal programável. Se for utilizada uma técnica de deslocamento de fase em passos ao invés de uma modulação continua pode-se empregar um PZT calibrado, uma vez que apenas alguns valores discretos de tensão serão utilizados.

O objetivo desses transdutores piezoeletricos é a introdução de mudanças artificiais conhecidas e controladas no caminho ótico percorrido pelo feixe de referência. A

intensidade luminosa para cada região de interesse do padrão de speckles é amostrada em um determinado ponto (pixel), produzindo assim uma série de imagens digitais. Cada pixel desses é então quantizado por uma escala de cinza (em geral de 256 níveis). Essas imagens são então armazenadas, e os processamentos posteriores dependem de algoritmos que serão descritos nas próximas seções.

Em geral, pode-se dizer que um mínimo de três medições precisa ser feito para todas as técnicas de medição que usem deslocamento de fase. Quando é feita uma medição de intensidade luminosa de um padrão de interferência surgem três fatores desconhecidos, que são: a intensidade do feixe objeto  $I_O$ , a intensidade do feixe de referência  $I_R$  e a diferença de fase entre ambos  $\phi$ . Dessa forma, as variáveis de entrada no detector estão representadas na Equação 2.78.

$$I = I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos \phi \quad (2.78)$$

A variação de fase introduzida entre medidas adjacentes pode assumir qualquer valor entre 0 e  $\pi$  desde que seja mantida constante para todas as medidas (no caso de medição em passos) ou linear com o tempo (para métodos de modulação contínua de fase no tempo).

#### *a) Técnica dos três passos*

Como já visto na Equação 2.78, um mínimo de três medições deve ser feito para que o seja possível obter a fase de uma frente de onda. Assim são necessárias três intensidades medidas que devem formar um sistema com três equações e três variáveis. Cada uma das intensidades será obtida após a introdução de um deslocamento de fase equivalente a  $\alpha_i$ . Neste texto, a escolha foi por introduzir deslocamentos de fase de  $\Delta\alpha = \pi/2$ , porém outros valores poderiam ser escolhidos sem prejuízos ao resultado. Para os três deslocamentos consecutivos têm-se  $\alpha = \pi/4, 3\pi/4$  e  $5\pi/4$ . As intensidades medidas estão representadas nas equações 2.79, 2.80 e 2.81, onde  $\gamma$  é a modulação de intensidade.

$$I_1(x, y) = I_0(x, y) \left( 1 + \gamma_0 \cos \left[ \phi(x, y) + \frac{1}{4} \pi \right] \right) \quad (2.79)$$

$$I_2(x, y) = I_0(x, y) \left( 1 + \gamma_0 \cos \left[ \phi(x, y) + \frac{3}{4} \pi \right] \right) \quad (2.80)$$

$$I_3(x, y) = I_0(x, y) \left( 1 + \gamma_0 \cos \left[ \phi(x, y) + \frac{5}{4} \pi \right] \right) \quad (2.81)$$

Utilizar passos com valores discretos leva a  $\gamma = \gamma_0$ . A partir disso, aplica-se uma manipulação algébrica resultando numa diferença de fase entre os feixes para cada ponto, dada pela Equação 2.82, e a modulação de fase explicitada pela Equação 2.83.

$$\phi(x, y) = \arctan \left( \frac{I_3(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_2(x, y)} \right) \quad (2.82)$$

$$\gamma(x, y) = \frac{\sqrt{[I_1(x, y) - I_2(x, y)]^2 + [I_2(x, y) - I_3(x, y)]^2}}{2I_0} \quad (2.83)$$

Se a opção fosse por um deslocamento de fase  $\Delta\alpha = 2\pi/3$ , os valores seriam  $\alpha = -2\pi/3, 0$  e  $+2\pi/3$ . Seguindo o mesmo princípio que o utilizado para  $\Delta\alpha = \pi/2$ , e manipulando-se algebricamente o sistema obtido, a diferença de fase é dada pela Equação 2.84 e a modulação da fase pela Equação 2.85.

$$\phi(x, y) = \arctan \left( \frac{\sqrt{3}(I_3(x, y) - I_2(x, y))}{2I_1(x, y) - I_2(x, y) - I_3(x, y)} \right) \quad (2.84)$$

$$\gamma(x, y) = \frac{\sqrt{3[I_3(x, y) - I_2(x, y)]^2 + [2I_1(x, y) - I_2(x, y) - I_3(x, y)]^2}}{2I_0} \quad (2.85)$$

#### *b) Técnica dos quatro passos*

Uma das vantagens da aplicação dessa técnica foi descrita por Creath (1990), devido ao uso de processamento de imagens via pipe-line (no qual são usadas tabelas de consulta)

permitindo, dessa forma, remover ruídos causados pelo processo de formação dos speckles. Tal procedimento acaba por induzir uma melhora significativa na visibilidade das franjas. Essa técnica tem grande aceitação entre os métodos de correção de fase e pode ser encontrada em diversos trabalhos, como constatado por Wyant (1982).

Nesse caso o deslocamento de fase é  $\Delta\alpha = \pi/2$ . Portanto,  $\alpha_i$  assume os valores  $\alpha = 0, \pi/2, \pi$  e  $3\pi/2$ . A modulação de fase será  $\gamma = \gamma_0$  para o caso discreto, aqui empregado. Utilizando-se de cálculos semelhantes aos empregados na técnica de três passos, a fase e seu módulo em cada ponto são dados pelas equações 2.86 e 2.87 respectivamente.

$$\phi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}\right) \quad (2.86)$$

$$\gamma(x, y) = \frac{\sqrt{[I_4(x, y) - I_2(x, y)]^2 + [I_1(x, y) - I_3(x, y)]^2}}{2I_0} \quad (2.87)$$

### 2.3 Estado da arte em interferometria laser

Uma das principais referências em interferometria laser é Leendertz (1970) que descreve o efeito speckle como originário da iluminação de uma superfície rugosa com um feixe de luz coerente responsável por gerar uma dispersão randômica do feixe incidente e, por consequência, um padrão também randômico de interferência. Ele também enuncia que ao sobrepor dois padrões, a distribuição de intensidades no padrão resultante depende da fase relativa de cada ponto dos padrões originais. Ao se medir a correlação entre dois padrões obtidos em momentos diferentes é possível detectar uma variação da fase associada a deslocamentos sofridos no período entre aquisições. Com isso um método interferométrico de medida de deslocamento foi proposto com o objetivo de se obter o campo de deslocamentos da superfície iluminada de uma única vez.

Um problema recorrente das técnicas de análise de tensões e deformações utilizando interferometria é a interpretação quantitativa dos dados obtidos nos ensaios. Em geral, quando não automatizados, esses processos são demorados e dependentes da habilidade do operador. Para contornar esse problema Moore and Tyrer (1995) propõem um método automatizado de medição utilizando interferometria eletrônica por padrão de speckles. Eles descrevem o processo automatizado de deslocamento de fase para as medições de tensão e deformação, bem como o tratamento via software das imagens, o que permite a obtenção de campos bidimensionais com precisão para os deslocamentos medidos da ordem de 0,03  $\mu\text{m}$ .

Medições sequenciais do campo de deformação em diferentes direções são satisfatórias quando temos campos estacionários e com repetibilidade, sendo que para campos não estacionários ou com baixa repetibilidade ambas componentes precisam ser medidas simultaneamente. A primeira solução proposta para essa questão vem de Moore and Tyrer (1990). Medições de campos de tensões variantes no tempo precisam ter suas componentes gravadas simultaneamente para que os registros dos campos de tensão/deformação sejam feitos sob condições idênticas para ambas as direções. As primeiras tentativas de se fazer aquisições simultâneas foram feitas utilizando iluminação nas direções vertical e horizontal com comprimentos de onda diferentes. Dessa forma, como os comprimentos de onda da iluminação em cada direção eram diferentes, eles não interfeririam entre si. Bastava utilizar um arranjo com duas câmeras para gravar cada padrão de interferências separadamente. O problema era a ineficiência ótica do sistema, bem como o fato de o padrão de franjas ser dependente do comprimento de onda usado pela iluminação, o que daria padrões não compatíveis diretamente, sendo necessário um tratamento através de duas sensibilidades diferentes para que esses padrões pudessem ser utilizados em conjunto. Dessa forma, Moore and Tyrer decidiram utilizar dois feixes (em direções perpendiculares de iluminação), com o mesmo comprimento de onda, mas com polarização ortogonal entre ambos. Com polarizações ortogonais, os feixes não interfeririam entre si, bastando utilizar um separador de feixe por polarização para enviar cada feixe a uma das câmeras. Essa técnica era eficiente para superfícies que não criavam despolarização do feixe, porém falhava quando havia despolarização.

Fan et al. (1997), visando melhorar o procedimento proposto por Moore and Tyrer (1990), propuseram um novo método para a medição simultânea do campo completo de deslocamentos no plano da superfície utilizando deslocamento de fase com auxílio de fibra ótica. Um separador de feixes de 1x4 feito de fibra ótica é usado para separar o feixe proveniente da fonte laser em quatro feixes de igual intensidade. Um par desses feixes é utilizado para iluminar o objeto horizontalmente com o mesmo ângulo de incidência, sendo esses sensíveis somente a deslocamentos horizontais. O outro par ilumina o objeto de forma a ser sensível somente a deslocamentos verticais. A polarização da luz emitida para cada um dos pares é igual, porém entre pares existe uma defasagem equivalente a um ângulo reto. A distância percorrida pela luz é igual para ambos os feixes do mesmo par, porém diferente entre pares. Assim, os speckles se formarão da interferência entre cada par, sendo possível obter simultaneamente as componentes de deslocamento vertical e horizontal. Esse método fez possível o estudo de deformações em placas planas. No estudo, os autores ainda apresentam resultados de ensaios realizados como exemplo da aplicabilidade do método.

Em geral, a técnica de ESPI é aplicada na obtenção de campos de tensão e deformação apenas na zona elástica, devido à maior dificuldade de se obter correlação na zona plástica. Porém, Vial-Edwards et al. (2001) fizeram estudos com tensões uniaxiais com folhas de cobre semi-encruado utilizando a técnica ESPI com o objetivo de analisar detalhadamente a transição da região de deformação elástica para plástica, bem como da zona de deformação plástica homogênea para a não homogênea. Uma importante descoberta dos autores é que a transição da região elástica para plástica de deformação se caracteriza por uma diminuição gradual da inclinação das franjas com relação ao eixo de tração, e que durante o estágio homogêneo as franjas permaneciam paralelas, igualmente separadas e perpendiculares ao eixo de tração. Nos experimentos realizados, o limite de escoamento obtido para o cobre estava em completo acordo com as definições clássicas para o material. O coeficiente de encruamento se manteve quase inalterado no início do estágio plástico, aumentando progressivamente até atingir seu maior valor com a máxima carga aplicada. Nesse ponto, o aparecimento de franjas não igualmente espaçadas evidenciou o início da região de deformação plástica não homogênea. Esse método pode ser



utilizado em conjunto com um equipamento ESPI para a obtenção de um critério de falha de um componente.

Já Kennedy et al. (2002) realizaram experimentos para verificar a validade da técnica de ESPI, que tem uma precisão bem estabelecida quando aplicada a superfícies planas, para superfícies tridimensionais. Para tanto, eles compararam os resultados obtidos com a técnica aos resultados previstos pela equação bi-axial de tensão modificada para o cilindro fino e também com resultados obtidos com strain-gauge piezo-elétrico. Um dispositivo de fixação foi desenvolvido para a realização do ensaio, no qual dois pistões hidráulicos foram instalados internamente ao cilindro, sendo estes os responsáveis pela aplicação da carga. Os cilindros são fixados pelas suas bases. A tensão circunferencial no cilindro fino medida pela técnica ESPI mostrou uma boa correlação com os valores previstos tanto pela Equação de tensões modificada quanto pelos resultados obtidos com strain-gauges. Cabe ressaltar que por ser uma técnica desenvolvida inicialmente para a aplicação em superfícies planas, há razões óbvias que indicam a necessidade de mais investigação sobre a correlação obtida em superfícies tridimensionais.

No intuito de compactar os dispositivos de medição ESPI, bem como de torná-los portáteis, Hansen (2002) apresentou um equipamento compacto e estável capaz de realizar medições tanto em superfícies refletivas quanto em superfícies difusas. O equipamento é baseado em um interferômetro “*nearly path length compensated*” do tipo Fizeau, no qual o feixe de referência é obtido refletindo-se uma parte do feixe incidente através de um componente ótico colocado próximo ao objeto. Dessa forma, tanto o feixe de referência quanto o de incidência seguem aproximadamente o mesmo caminho ótico desde a fonte até o captor. Esse equipamento utiliza iluminação difusa do objeto combinada com o feixe de referência. Apesar das relaxações no alinhamento do equipamento, a iluminação difusa elimina a necessidade de qualquer preparação da superfície antes do teste, o que permite ao equipamento fazer facilmente medições de componentes micro-mecânicos. Além disso, o uso de iluminação difusa diminui o risco de acidentes com a fonte laser.

A maioria dos métodos óticos usa iluminação coerente com frente de onda geralmente plana. No entanto, em alguns casos quando é necessária a observação de uma superfície grande do objeto, torna-se obrigatório o uso de frentes de onda esféricas, o que

pode influenciar na aplicabilidade dos métodos. Martínez et al. (2003) desenvolveu um experimento visando observar o aparecimento de fraturas através da técnica de Moiré e in-plane ESPI, ambas utilizando iluminação de frente de onda esférica. Em geral, sob iluminação esférica, as informações sobre deslocamentos no plano obtidas através de métodos óticos são validas somente nas proximidades da região do objeto atingida pela luz que se propaga no eixo central. No entanto, alguns equipamentos ESPI, tal como o apresentado por Diaz et al. (2000) são adaptados ao uso de iluminação esférica. No trabalho, Martínez se propõe a verificar a precisão desses métodos, bem como suas vantagens e desvantagens, em comparação a métodos que se valem de frente de ondas planas, no caso o método de Moiré. Após a realização dos testes a autora conclui que as sensibilidades de ambos os métodos (sendo aqui a sensibilidade o número de franjas que aparecem quando do deslocamento do objeto é equivalente a uma unidade de medida) são equivalentes. No entanto, o método de Moiré obteve uma resolução menor que a técnica ESPI. A resolução está ligada diretamente à confiabilidade da medição, sendo que ela nos fornece o menor valor de deslocamento que pode ser detectado. Uma vantagem da técnica de Moiré é o maior intervalo de medição possível. O estudo conclui que, apesar de mais preciso e com maior alcance, o método de Moiré é mais difícil de ser implementado, justamente pela necessidade de preparação anterior da superfície da peça, da fabricação dos reticulados de interferência e da fixação desses sobre o objeto, sendo a grande vantagem do ESPI o fato de não ser necessária nenhuma preparação no objeto.

Labbé (2007) faz um experimento utilizando a técnica ESPI na determinação da taxa de deformação de um ensaio de tração uniaxial em uma amostra de alumínio. Para validação dessa técnica o mesmo ensaio foi realizado com uma técnica bem estabelecida de determinação de taxa de deformação conhecida como método da grade, que consiste em pintar um reticulado sobre a superfície da peça, o qual permite a determinação das deformações sofridas durante o carregamento. Essas medições permitiram a obtenção da evolução da deformação em determinados pontos do campo bem como o cálculo da taxa de deformação através da obtenção da derivada temporal de deformação medida. O método ESPI foi utilizado para medir pequenas variações na deformação induzidas em determinados intervalos de tempo. Como esses intervalos eram adequadamente pequenos,

os valores da taxa de deformação no plano foram calculados como a variação da deformação dividida pelo intervalo de tempo entre as medições. Os testes revelaram uma concordância entre os resultados obtidos com o método da grade e com o método ESPI. Os valores das taxas de deformação obtidas por esses métodos mostraram diferenças da ordem de 6%. Embora ambos os métodos tenham obtido resultados similares, o autor destaca as vantagens do ESPI, tais como a possibilidade de obter-se a taxa de deformação em qualquer ponto da área iluminada (uma vez que o ESPI fornece a deformação em toda a superfície iluminada) e a obtenção da taxa de deformação independente do valor instantâneo da deformação (o método da grade não é capaz de fornecer dados confiáveis de taxa de deformação para deformações menores que 0,1). Por fim, ao monitorar a evolução dos campos de deformação em tempo real é possível observar os diferentes estágios (zona elástica, transição, plástica e instável).

A necessidade de medições em duas ou mesmo três dimensões impulsiona o desenvolvimento de equipamentos capazes de realizar essas medições de forma instantânea. Em geral, os equipamentos ESPI possuem dois, três ou mais feixes disponíveis para iluminar o objeto, permitindo assim a medição em diversas direções simultaneamente. Esses feixes são polarizados com defasagem de 90° entre si para evitar que gerem interferências entre as diferentes direções, como explicado por Leendertz (1970). Em se tratando especificamente de ESPI, Martínez et al. (2008) apresentam duas montagens, sendo a primeira delas (montagem A) composta de 3 fontes de luz, cada uma sensível à uma direção de deslocamento além de um feixe de referência. A segunda (montagem B) é composta por 3 feixes cobrindo as direções e um quarto de referência, originários de um mesmo feixe que atravessa uma barreira separadora. Duas medições independentes e idênticas são realizadas com uma mesma amostra utilizando cada um dos arranjos de iluminação. O arranjo A com 3 fontes possui vetores de sensibilidade maiores do que os vetores do arranjo B com feixes originários da mesma fonte. Assim, o trabalho conclui que apesar de ambos arranjos resultarem em medidas corretas, a montagem B possui erros de medição maiores que a montagem A. No entanto, na montagem B há necessidade de uma única fonte de luz, o que torna o dispositivo mais barato e menor, ficando assim a escolha condicionada à relação entre a necessidade de precisão e o custo do equipamento.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme dito no Capítulo 1, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para medir tensão em bielas durante testes estáticos usando a técnica ESPI. Essa metodologia deve ser validada através de comparação dos resultados obtidos nos ensaios com os resultados clássicos da literatura e com simulações efetuadas em softwares de elementos finitos.

Esse trabalho foi desenvolvido em uma cooperação entre a Universidade Estadual de Campinas e a ThyssenKrupp Metalúrgica de Campo Limpo. Em trabalhos anteriores utilizando o método ESPI, o principal problema encontrado foi o ambiente de ensaios utilizado nas medições. Esses testes eram feitos no laboratório do departamento de Garantia da Qualidade, situado dentro da empresa. Nesse laboratório, os ensaios feitos com o ESPI conviviam concomitantemente com outros testes, principalmente testes de fadiga. Esses últimos necessitavam do emprego de grandes *shakers*, que são dispositivos de excitação cíclica para bielas e segmentos de virabrequim. Essas excitações influenciavam negativamente os ensaios realizados com o ESPI, uma vez que o método de interferometria exige uma grande estabilidade do sistema durante o teste. Outro problema era a existência de martelos de forja muito próximo do laboratório, que induziam vibrações de grande amplitude nas medições, causando perda de correlação e impossibilitando por vezes a aplicação do teste.

A solução encontrada para esses problemas foi transferir os ensaios para um ambiente mais controlado, no caso o laboratório de ensaios mecânicos da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp. Nesse novo ambiente não há influências externas significativas que gerem vibrações no equipamento. A variação de luminosidades foi outro fator que passou a ser controlado, uma vez que as janelas foram tampadas fisicamente com papel opaco, evitando a influência da iluminação externa. A Figura 3.1 mostra a sala utilizada para os ensaios.

Outro problema encontrado no laboratório da empresa era a capacidade de aplicação de carga do dispositivo usado para a tração da biela. A carga máxima que podia ser

aplicada era 70 kN, que para ensaios com bielas forjadas, como era o objetivo, por vezes não foi suficiente. A transferência para o novo laboratório também eliminou esse problema, uma vez que a máquina de tração disponível é uma EMIC modelo GR048 com capacidade máxima de carga de 300 kN. Essa máquina está mostrada na Figura 3.2



Figura 3.1 – Laboratório de ensaios mecânicos utilizado para os testes.



Figura 3.2 – Dispositivo de tração/compressão utilizado nos testes.

Devido à portabilidade e modularidade do dispositivo ESPI, foi relativamente fácil fazer a transição entre o laboratório da ThyssenKrupp e o laboratório da Unicamp. O equipamento utilizado é o Q-300 da Dantec Dynamics. Na Figura 3.3a é mostrada a unidade de aquisição de dados, processamento e interface do dispositivo. Essa unidade é composta basicamente de um computador dedicado equipado com todos os *drivers* necessários à alimentação da fonte laser, bem como para a aquisição do sinal de saída da câmera CCD. Além disso, esse computador possui ainda o software ISTRa, fornecido também pela Dantec Dynamics, que é responsável por todo o controle de iluminação e aquisição do sinal, além de processamento e pós-processamento, fornecendo uma interface gráfica muito intuitiva para o usuário. Na Figura 3.3b pode ser vista a fonte laser com os braços padrões (curtos) acoplados. Nessa figura é possível também ver ao centro a câmera CCD responsável pela aquisição das imagens. Já na Figura 3.3c são mostrados os braços extensores, que permitem medições de superfícies maiores, bastando para tanto desacoplar os braços curtos vistos na Figura 3.3b e substituí-los por estes. Por fim, a Figura 3.3d apresenta o dispositivo de fixação da fonte luminosa.

O Q-300 da Dantec faz uso de um software integrado para a realização das aquisições das imagens, bem como possíveis processamentos nessas imagens e para o cálculo dos campos de tensões e deformações. Os arquivos gerados por esse software têm extensão .INI, sendo capazes de armazenar diversos parâmetros tais como a taxa de atualização de imagens em *ms*, o atraso introduzido durante a mudança de fase em *ms*, as intensidades para os lasers de diodo em *mA* (também podem ser alteradas diretamente no software), o método de recuperação de fase (o software permite escolher qualquer dentre os métodos apresentados na seção 2.2.7 e alguns outros não descritos nesse trabalho), o método utilizado no cálculo dos deslocamentos (considerando a divergência da iluminação e sem considerar tal divergência), o atraso entre o obturador e a medição em *ms*, além de diversos outros parâmetros.

Vários outros parâmetros de medição bem como configurações do equipamento podem ser alterados diretamente dentro do software. Como exemplo de parâmetros a serem definidos pelo usuário com uma frequência grande pode-se citar a distância entre o objeto e a lente da câmera, a deformação absoluta de um determinado ponto no objeto, as dimensões

do contorno do objeto para o caso de objetos de superfície não planas. Além desses, algumas outras configurações podem ser ajustadas também através do software, mas essas em geral variam menos frequentemente, bastando fazer seu ajuste uma única vez para uma série muito grande de experimentos. Entre estes pode-se citar o método de mudança de fase a ser utilizado, os filtros, os parâmetros iniciais do transdutor piezo-elétrico, responsável pela variação do caminho ótico e, conseqüentemente, da fase, bem como os ganhos e contrastes da imagem.



Figura 3.3 – Dispositivo ESPI a) CPU, aquisição de dados e interface; b) Fonte laser; c) Braços extensores; d) Fixador.

Uma vez definido o sistema de tração e a biela a ser ensaiada, o passo seguinte é fazer o acoplamento entre ambos. Devido ao tamanho da biela, seu peso e geometria, decidiu-se

realizar ensaios em compressão inicialmente, uma vez que o dispositivo de fixação necessário para o acoplamento era mais simples.

Para fazer o acoplamento da biela com as rótulas de fixação da EMIC GR048 para compressão era necessário que os acopladores tivessem superfícies planas que seriam apoiadas às rótulas da máquina. A partir desses requisitos chegou-se ao dispositivo apresentado na Figura 3.4. Na Figura 3.4a temos a parte do acoplador que se fixa ao olhal menor da biela. Já na Figura 3.4b a parte que se acopla ao olhal maior, com a biela já montada. Por fim, na Figura 3.3c temos a biela com o eixo usado para a fixação ao dispositivo de acoplamento.

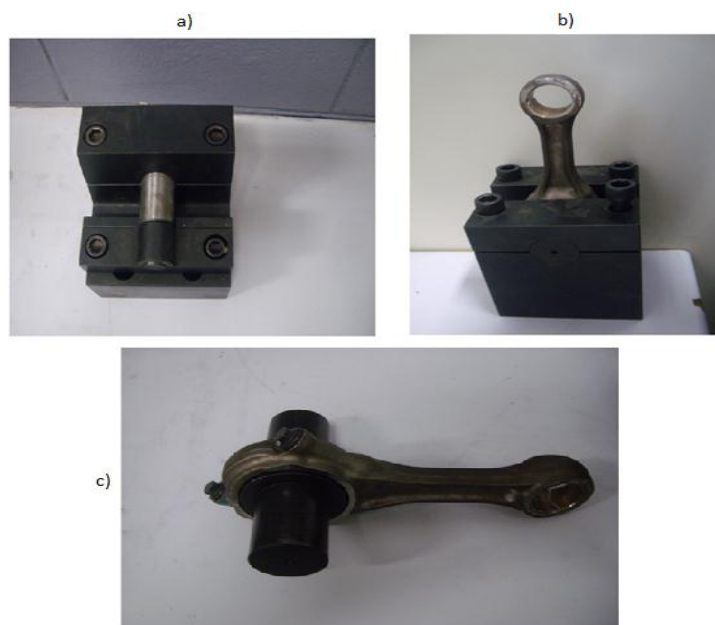


Figura 3.4 – Dispositivo de acoplamento a) Olhal menor; b) Olhal maior; c) Biela.

### 3.1 Materiais

Nesse trabalho concentraremos nossos ensaios em um componente mecânico fornecido pela ThyssenKrupp, que tem suas principais dimensões mostradas na tabela 3.1.



Essa biela é fabricada com um aço de baixo carbono com características mecânicas muito próximas ao aço SAE 1040.

Tabela 3.1 – Dimensões Principais biela.

<b>Parte</b>	<b>Dimensão (mm)</b>
Olhal maior	72
Olhal menor	40
Distância entre olhais	197
Diâmetro externo olhal maior	96
Diâmetro externo olhal menor	62

Por determinação do fabricante da biela, as informações precisas de características mecânicas e composição química não serão divulgadas nesse trabalho. A tabela 3.2 ilustra as principais características desse aço, bem como sua composição química. Essa tabela apresenta os dados relativos ao aço SAE 1040 com algumas pequenas retificações em alguns parâmetros para ficar mais próximo do material utilizado. A não apresentação dos parâmetros exatos do material não compromete em nada o trabalho, uma vez que se deseja verificar uma metodologia, e para efeitos de comparação os dados fornecidos na tabela abaixo fornecem resultados suficientemente próximos da realidade.

Tabela 3.2 - Propriedades físicas e composição química do aço SAE 1040.

<b>Propriedades Mecânicas</b>		<b>Composição Química</b>	
<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>	<b>Elemento</b>	<b>Valor (%)</b>
Densidade	7,85 g/cm <sup>3</sup>	Ferro	98,51-98,98
Módulo de Elasticidade	205 Gpa	Manganês	0,6-0,9
Módulo de Cisalhamento	80 Gpa	Carbono	0,42-0,5
Coefficiente de Poisson	0,29	Enxofre	≤ 0,05
Dureza Brinell	179	Fósforo	≤ 0,04

Além da biela, utilizamos também nesse experimento os fixadores da mesma ao dispositivo de aplicação de carga. Esse dispositivo foi confeccionado na própria

ThyssenKrupp, tendo sido fabricado em aço SAE 1040 com as características citadas acima sendo validas.

### 3.2 Métodos de medição

O equipamento ESPI Q-300 possibilita a medição de campos de tensão e deformação tanto em superfícies planas quanto em superfícies não planas. A forma com que a medição será feita está diretamente relacionada à geometria da superfície do objeto a ser carregado. Para objetos planos, basta fazer a fixação do mesmo no dispositivo de aplicação de carga e dar início às medições com o equipamento. O caso em estudo não é um objeto plano, no entanto define-se que a região de interesse é a alma da biela, que pode ser aproximada por uma superfície plana.

Um fluxograma do processo para a realização das medições é mostrado na Figura 3.5. Inicialmente é necessário fixar a biela ao dispositivo de aplicação de carga com auxílio de seu fixador. Em seguida é necessário aplicar um líquido revelador sobre a superfície do objeto a ser ensaiado. Esse líquido é responsável por criar uma camada branca opaca sobre a superfície do objeto, tornando-a homogênea a não especular. Nos ensaios foi feito uso do revelador D70 da Metal-Check, utilizado comumente na inspeção de peças em busca de trincas. Feito isso, para um objeto de superfície plana basta dar início às medições, utilizando o programa ISTRa para fazer as aquisições, tratamentos e cálculos nas imagens. Se a superfície do objeto for não plana é preciso criar um perfil para a superfície e este será utilizado na geração de dados em função dos deslocamentos obtidos.

Antes da realização dos ensaios propriamente ditos, faz-se um ensaio padrão, com uma peça padrão e resultados esperados conhecidos, para verificar as condições de *setup* estão definidas para o bom funcionamento do equipamento. Em seguida, posicionamos a peça a ser medida no fixador e damos início às nossos ensaios. Inicialmente posiciona-se a peça no dispositivo aplicador de carga e fixamos a distância da mesma para o equipamento ESPI. Em seguida determina-se um contorno específico para o objeto sendo ensaiado. No

software, esse contorno é tratado como uma borda, gerando um arquivo .BER que deve ser usado sempre pelo objeto, tanto durante o processo de aquisição e tratamento dos dados, como no pós-processamento. Além do contorno, deve-se também escolher um ponto de interesse no objeto. Se a deformação desse ponto for conhecida, esse parâmetro é registrado no ISTRÁ, e assim todas as deformações apresentadas serão absolutas. Caso nenhuma deformação seja conhecida, todas as deformações apresentadas serão relativas à um ponto definido, sendo esse ponto considerado como ponto de referência.

O próximo passo é ajustar o foco do sistema de aquisição de imagens. É feito um ajuste manual do ponto focal, bem como da magnificação das lentes utilizadas. Aqui cabe ressaltar que quando se utiliza uma magnificação por meio de uma lente externa à câmara, essa magnificação deve ser usada como um fator de correção. No nosso caso, foi mantida a magnificação das lentes externas em uma vez, sendo assim desnecessária a aplicação de fatores corretivos. Deve-se ainda fornecer ao software a distância do objeto ao sistema de aquisição de imagens, mais especificamente do centro da abertura da lente da câmara ao ponto mais próximo do objeto.

A próxima atividade consiste em ajustar alguns parâmetros que possuem um valor padrão previamente definido, a fim de melhorar, por exemplo, o contraste entre as franjas. Para tal é possível tanto alterar a opção contraste nas configurações de vídeo do ISTRÁ, como a intensidade do laser. Também é possível alterar o ganho da imagem. Nenhuma dessas alterações tem efeito direto sobre os cálculos de tensão/deformação realizados, porém elas podem influenciar diretamente na presença e intensidade dos ruídos, o que por fim acaba influenciando na qualidade dos resultados obtidos. Pode-se também escolher o algoritmo de variação de fase utilizado, bem como as configurações do filtro de fase. Apesar de ser mais lento por fazer mais aquisições, foi utilizado o algoritmo 4+4 (técnica dos quatro passos descrita no capítulo 2) que é mais estável.

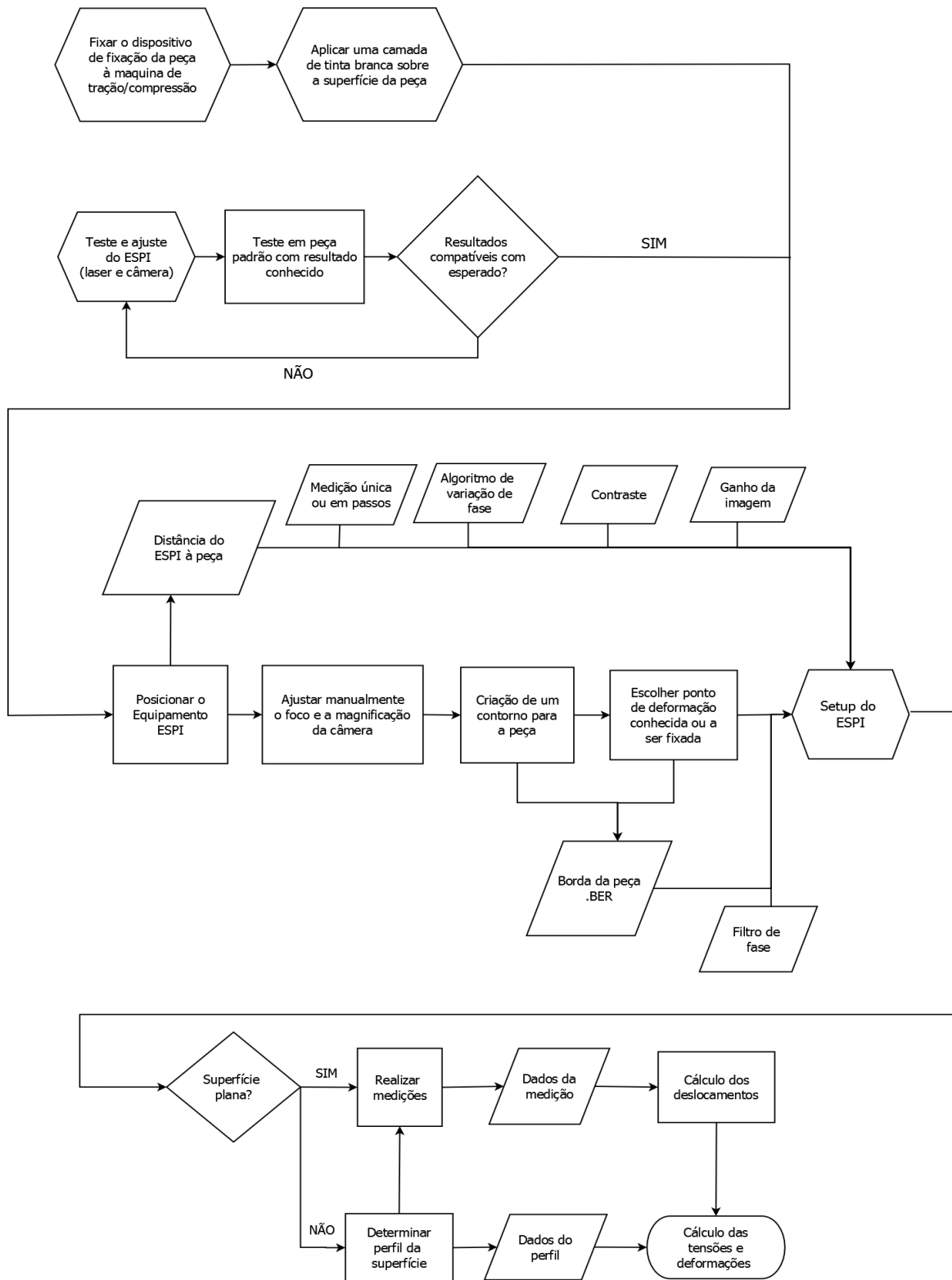


Figura 3.5 – Método de medição.

A etapa seguinte do processo é a medição propriamente dita. Nessa etapa deve-se informar como será feita a aplicação da carga. Se a carga completa for aplicada de uma vez, têm-se o método de passo único. Para este é realizada uma aquisição antes do início da aplicação da carga (referência) e uma após toda a carga ter sido aplicada. Se, por outro lado, a carga for aplicada em etapas seleciona-se o método que comporta uma série finita de medições. Para tanto define-se o número de passos a serem feitos, bem como se as aquisições serão feitas manualmente ou automaticamente, sendo que no segundo caso devem-se ainda escolher um intervalo de tempo entre as aquisições. Concluídas as aquisições chega-se, por fim, aos cálculos e geração de mapas de deslocamento, deformação e tensões do objeto.

Para fazer esses cálculos é empregado um aplicativo do próprio ISTRa capaz de fazer todo o processamento necessário na imagem e os cálculos, apresentando os campos de deformações e tensões completos ao final. O software necessita basicamente do módulo de elasticidade do material bem como do coeficiente de Poisson para realizar os cálculos. Como resultado, são apresentadas as tensões principais nas três direções, bem como as tensões tangenciais na superfície do objeto, a tensão normal à superfície e a tensão de cisalhamento. As mesmas opções existem para as deformações.

### **3.3 Planejamento experimental**

Pode-se dizer que, em geral, experimentos são realizados para verificar o funcionamento de um sistema ou processo. Esses por sua vez podem ser representados pelo modelo da Figura 3.6. Cada um desses processos ou sistemas é constituído por entradas e saídas, bem como por fatores de influência. Desses fatores, alguns são controláveis, outros são não controláveis (fonte de incertezas) e há ainda fatores que não se deseja controlar.

Durante o desenvolvimento desse trabalho será utilizada uma metodologia de realização de experimentos conforme exposta por Montgomery (2005). Essa metodologia

se compõe de sete passos dos quais os três primeiros são relativos ao planejamento pré-experimental, enquanto os outros quatro tratam diretamente da fase de testes. A seguir são listadas as sete etapas com uma breve descrição de cada uma:

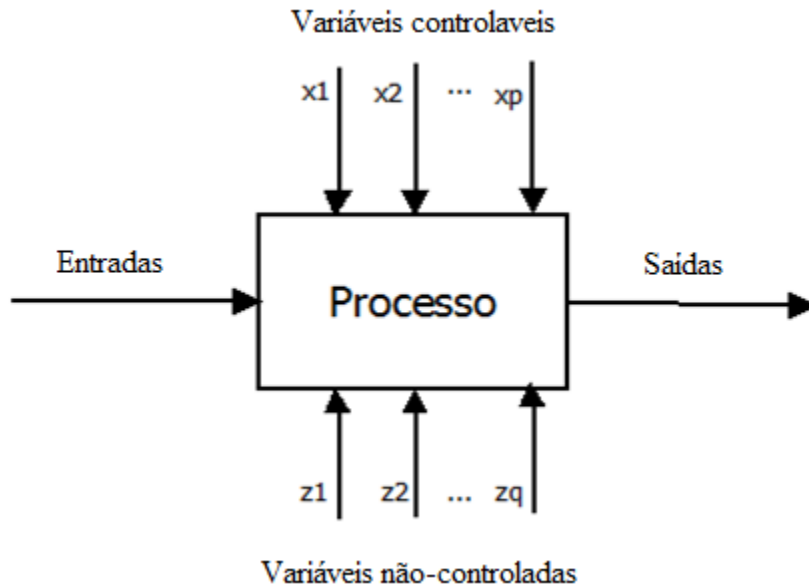


Figura 3.6 – Generalização de um processo ou sistema.

1. Reconhecimento e identificação do problema: Apesar de parecer um ponto óbvio, na prática, nem sempre é tarefa simples reconhecer o problema e desenvolver uma descrição clara e representativa deste. É necessário enumerar todas as ideias acerca dos objetivos do experimento, sendo preciso para isso recorrer a todos os setores envolvidos nele (em uma empresa: departamentos de engenharia, garantia da qualidade, fabricação, marketing, etc). Um claro entendimento do problema contribui para um melhor entendimento do fenômeno físico associado, bem como para a qualidade da solução final encontrada. Um experimento pode ter vários objetivos, tais como caracterização de um novo produto ou processo, otimização de um processo já bem definido, confirmação de simulações. Nessa etapa deve-se também definir claramente qual será o objetivo de nosso experimento.
2. Seleção da variável de resposta: Para selecionar as variáveis de resposta de nosso experimento, é preciso ter certeza que a variável escolhida nos provém informações

úteis na resolução do problema definido no item anterior. Frequentemente o desvio padrão e a média da característica medida serão variáveis de resposta. Os erros de medição e a capacidade do sistema podem também, por vezes, serem considerados como variáveis de resposta. Resultados com grandes desvios indicam um experimento com baixa repetibilidade ou a necessidade de ensaios adicionais. Quando capacidade é pequena, pode-se optar pela realização do experimento para cada unidade do sistema repetidas vezes.

3. Escolha de fatores e limites: Dois tipos básicos de fatores podem ser identificados em um experimento: as variáveis de controle e fatores de ruídos. Devido ao grande número de variáveis de controle potenciais, esses podem ser subdivididos em variáveis de influência - que são as variáveis de interesse no experimento-, variáveis mantidas constantes - variáveis que possuem influência na resposta, mas que devem ser mantidas com seu valor constante durante todo o experimento, e variáveis que podem variar - variáveis que não são controladas durante a realização do evento. Em geral, assume-se que as influências de variáveis mantidas constantes e variáveis são pequenas. Os fatores de ruído, por sua vez, são classificados em controláveis (quando seu nível pode ser escolhido), incontroláveis (quando não pode ter seu nível controlado) e ruído propriamente dito (quando o fator varia naturalmente e incontrolavelmente). Eventualmente, fatores de ruído incontroláveis podem ser medidos, possibilitando a realização de uma análise de variância, para que a existência desse seja levada em consideração quando da análise dos resultados. Uma vez determinados todos os fatores, faz-se necessário a determinação de níveis para os mesmos. A determinação dos níveis deve ser feita levando-se em consideração os objetivos do experimento, bem como as características do processo em estudo. Por vezes, esse passo é realizado em conjunto com o passo anterior.
4. Escolha do planejamento experimental: Se as etapas de pré-planejamento foram realizadas corretamente, essa etapa deve ser relativamente simples. A escolha do planejamento experimental a ser seguido é baseada principalmente no tamanho da amostra a ser experimentada. Deve-se também nessa etapa determinar uma ordem apropriada de execução dos testes e determinar a existência de restrições de

aleatorização dos fatores. Com relação aos tipos existentes de planejamentos, um breve resumo será apresentado mais a frente no texto, descrevendo cada um e comparando-os. Novamente, durante essa etapa, é importante levar em consideração o objetivo do experimento.

5. Realização dos experimentos: É a fase na qual o experimento é propriamente realizado. Aqui, o monitoramento constante do processo deve ser feito a fim de evitar que algo saia em desacordo com o que foi previamente planejado. Um erro nessa fase do processo pode destruir a validade de todo o experimento. Coleman e Montgomery (1993) sugerem a realização de alguns pré-testes ou um teste piloto com o objetivo de verificar o material sendo ensaiado, o sistema de medição, bem como para ter uma ideia dos erros de medição e ganhar experiência na realização dos testes.
6. Análise estatística dos dados: A análise dos dados coletados durante os testes deve ser feita com o apoio de métodos estatísticos, ao invés de simples julgamentos naturais. Se o pré-planejamento foi feito corretamente e os testes foram conduzidos de forma apropriada, os métodos estatísticos necessários não são muito elaborados. Além disso, um grande número de pacotes computacionais está disponível para auxiliar nessa etapa. Vale lembrar que os métodos estatísticos não podem provar que um fator tem um efeito determinado. Eles são utilizados para identificar uma tendência de comportamento associada à variação de um fator dentro dos limites previamente estabelecidos.
7. Conclusões e recomendações: Uma vez concluída a análise dos dados, deve ser elaborado um documento com as conclusões obtidas e com recomendações de um plano de ação. Métodos gráficos são, em geral, úteis nesse estágio, uma vez que facilitam a visualização e compreensão dos resultados. Testes de confirmação devem ser realizados para validar as conclusões.

Determinados os passos a serem seguidos na realização dos experimentos resta segui-los o mais fielmente o possível. As etapas para o problema dessa dissertação estão listadas a seguir.



### 3.3.1 Determinação do problema

Como já mencionado anteriormente nesse trabalho, o objetivo principal dos experimentos é a determinação do campo de tensões em uma biela sendo solicitada por uma carga através da técnica de medição de tensões por ESPI. A motivação para isso é que o método clássico, e adotado na maioria dos experimentos com o mesmo objetivo, emprega strain-gauges. Essa técnica tem como características um grande tempo de preparação das amostras e o uso de vários strain-gauges concomitantemente, tanto para a obtenção dos campos de deformação e tensão em direções diferentes na mesma posição, quanto para obter tais variáveis em regiões distintas do mesmo objeto e com mesma orientação. Além disso, a técnica exige contato direto do sensor com a peça, o que por vezes pode ser prejudicial para o material ensaiado. Em muitos casos é necessária uma preparação da superfície da peça antes da fixação do sensor, tal como em peças com grande rugosidade superficial.

É sabido da literatura que em bielas, as regiões que concentram as maiores tensões são os olhais. Além disso, a região de transição dos olhais para a alma da biela também é de grande interesse, por ser um ponto comum de falhas nesses elementos. Por isso os experimentos serão focados nos pontos próximos aos olhais e que se encontram também na região de transição. Os pontos muito próximos aos olhais não serão tratados, pois para a fixação da biela no dispositivo de aplicação da carga foi necessário a construção de um dispositivo fixador, mostrado no início desse capítulo, que cobre essa região, impossibilitando as medições. As informações serão obtidas da região de transição que está dentro da região da alma. Por se tratar de uma região plana, é mais simples sua análise com o método.

Por fim, deseja-se obter um método confiável de ensaios de bielas utilizando o dispositivo ESPI para a obtenção de campos de tensão e deformação, de forma que esse método possa ser aplicado inicialmente a bielas, e posteriormente outros componentes mecânicos. Em outras palavras, busca-se a compreensão e domínio de um método de medição nesse projeto.

### 3.3.2 Determinação da variável de resposta e dos fatores

Como nesse trabalho avalia-se um método de medição de tensões, a variável de resposta a ser considerada são os próprios resultados de tensões obtidas (tensões equivalentes medidas na alma da biela). O método deverá ser capaz de determinar o campo completo de tensões superficiais, porém uma análise estatística de todo o campo seria muito custosa, devido ao grande número de pontos a serem considerados. Sendo assim, uma análise de apenas alguns pontos considerados como críticos se adapta melhor às necessidades deste trabalho. É necessário também avaliar qualitativamente os campos completos obtidos, comparando-os com campos obtidos por outros métodos, como por exemplo, o método de elementos finitos.

Seguindo as definições feitas na seção anterior para as variáveis, estas serão separadas em variáveis de controle e fontes de variabilidade. Seguindo essa ideia, tentou-se listar inicialmente todas as variáveis que poderiam exercer alguma influência sobre o método de medição em teste. Num primeiro momento não foi feita nenhuma diferenciação, podendo dentre elas existir variáveis de controle ou fontes de variabilidade. Em seguida, foi feita a classificação e separação em ambas as classes. As variáveis de controle estão compiladas na tabela 3.3. Nessa tabela as variáveis se agrupam de acordo com suas origens. Também nessa tabela é apresentada a classificação em fatores de influência (FD), fatores mantidos constantes (MC) e os fatores livres para variar (LV).

Quatro diferentes origens para os fatores levantados são definidas, sendo elas: setup do hardware, setup do software, ambiente e peça. Inicialmente optou-se por tratar dos fatores relacionados ao setup do hardware, ou seja, fatores ligados à montagem do sistema físico de medição. Nesse primeiro momento vale ressaltar que é feito apenas um levantamento dos fatores, sendo a análise de suas influências e interações feitas em seguida.

A montagem do sistema ESPI é feita sobre um apoio localizado em frente à peça a ser medida. Esse apoio já foi mostrado anteriormente na Figura 3.3d. Ele permite a fixação do dispositivo que engloba a fonte emissora de laser e a câmera CCD. Para posicionar o dispositivo é preciso mudar a posição do conjunto todo, uma vez que a fonte e a câmera

estão montadas em um conjunto único impossível de ser separado. É necessário fazer dois ajustes de posição no conjunto. O primeiro se refere ao *ajuste no plano* ( $xy$ ), que nesse caso deve ser paralelo à superfície da peça em estudo. Esse ajuste é feito manualmente, sendo que manter constante esse ajuste seria muito custoso; uma vez que o dispositivo é desmontado é muito difícil garantir que ao montá-lo novamente o ajuste anterior será o mesmo. Dessa forma, é permitido que esse parâmetro varie, porém essa variação é sempre pequena e a sua aleatorização nos ensaios deve ser capaz de diminuir seus efeitos.

O outro fator associado ao posicionamento do ESPI é a *distância do equipamento à superfície da peça*, mais precisamente, a distância da peça à CCD. Esse fator influencia diretamente no tamanho dos speckles formados e, por consequência, na qualidade dos padrões de interferência. Portanto, este será considerado como um fator de influência e interesse.

O diâmetro da abertura do diafragma da CCD é outro fator que influencia os resultados tendo ação sobre o *tamanho dos speckles* formados. A abertura do diafragma da câmera necessita de um técnico especializado no funcionamento para ser variado devido a possibilidade de introdução de desalinhamentos no sistema ótico da mesma. Aqui, portanto, esse parâmetro não será variado devido à dificuldade de realização das variações, mantendo-o constante em todos experimentos.

A *intensidade do feixe de referência* utilizado depende tanto da iluminação recebida pelo objeto, como do ajuste dos espelhos e braços de iluminação. O objetivo é sempre obter uma iluminação correta do objeto, que no caso significa o objeto receber os mesmos níveis de iluminação em todas as direções de medição. O ajuste do feixe de referência e dos espelhos e braços é feito manualmente, sendo que a variação de outros fatores (como por exemplo, a posição ( $xy$ ) dos dispositivos ESPI) pode introduzir pequenas variações na intensidade da iluminação recebida pelo objeto. Dessa forma, esses parâmetros são considerados como livres para variar.

Uma vez definido o posicionamento físico do dispositivo ESPI, faz-se necessário antes do início das medições fazer um ajuste no *foco da lente* usada pela CCD. Esse ajuste também é feito manualmente e é variável em função de outros fatores (distância do ESPI à

superfície da peça, posição (xy) do ESPI). Este fator também será considerado como livre para variar.

Tabela 3.3 – Variáveis de controle agrupadas por origem.

<b>ORIGEM</b>	<b>VARIÁVEL</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO</b>
<b>Setup Hardware</b>	Posição do ESPI no plano (xy)	LV
	Distância do ESPI à superfície da peça	FD
	Diâmetro da abertura da CCD	MC
	Intensidade do feixe de referência	LV
	Ajuste dos espelhos e braços de iluminação	LV
	Distância focal da lente	LV
	Intensidade do laser	MC
	Calibração do transdutor piezoelétrico	MC
<b>Setup do Software</b>	Definição da borda	MC
	Ganho da imagem	FD
	Filtro de Fase	MC
	Suavização	FD
	Definição do ponto de deformação absoluta conhecido	MC
	Contraste	FD
	Atraso entre mudança de fase	MC
	Método de mudança de fase	MC
<b>Ambiente</b>	Iluminação da sala	MC
<b>Peça</b>	Material	LV
	Tolerâncias (geométricas e dimensionais)	LV

A *intensidade do laser*, apesar de considerada como um fator físico, é controlada diretamente através do software. Esse parâmetro é o de principal influência na iluminação do objeto. A variação da iluminação no objeto pode influenciar diretamente na qualidade dos padrões obtidos. Dessa forma esse será um parâmetro mantido constante durante todos os ensaios, em seu valor de referência sugerido pelo fabricante.

Para terminar os ajustes físicos do ensaio resta falar da *calibração do transdutor piezo-elétrico*, responsável pela variação de fase no ESPI. Essa calibração é feita no início do experimento e mantida constante durante todo o decorrer dos ensaios.

Uma vez concluído o setup físico do sistema segue-se o ajuste dos parâmetros de software necessários para a realização das medições. O primeiro fator a ser ajustado nesse caso é *contorno do objeto*. Para a realização das medições o software necessita que uma borda seja definida, sendo que essa deve representar os limites dentro dos quais se deseja informações de tensão e deformação. Para tanto é feita uma foto do objeto, em seguida é traçada uma borda no editor de bordas sobre essa foto, isolando a região de interesse, e então esta é salva para ser utilizada em todas as medições do objeto. A borda só é modificada quando o objeto sendo ensaiado é movido. Como as medições serão feitas sempre com o mesmo objeto (biela), a borda será mantida constante.

Em seguida define-se o *ganho na imagem* que será utilizado. O ganho tem influência direta na aquisição dos speckles pela CCD. Ganhos baixos permitem a obtenção de poucos pontos claros enquanto ganhos maiores permitem a obtenção de pontos mais claros. Essa variação de ganho pode implicar na perda de sensibilidade na detecção dos speckles, o que pode influenciar fortemente nos resultados obtidos. Assim, o ganho será considerado um fator de influência.

Os padrões de speckle irão se combinar via software, dando origem às figuras de franjas. Essas, por sua vez, podem possuir ruídos devidos às instabilidades físicas do equipamento ESPI durante a aquisição das imagens. Para diminuir esses ruídos e conseqüentemente aumentar a resolução das franjas (obtendo resultados mais precisos) pode-se aplicar um *filtro de fase* na figura de franjas. Serão mantidas constantes as configurações do filtro, para que a eficiência do mesmo seja maximizada.

O ISTRÁ tem a capacidade de fazer tratamentos na imagem, além da aplicação de filtros às mesmas. Um processo conhecido como *suavização* consiste na interpolação dos pixels da imagem em uma determinada região. Esse processo é feito com o objetivo de aumentar a resolução da imagem como um todo, diminuindo a influência de ruídos e dados corrompidos. Esse processo, claramente, possui influência sobre os resultados obtidos, uma

vez que ele influencia diretamente sobre os speckles obtidos. Por isso, a suavização será considerada como um fator de influência.

Além da borda é preciso também definir um *ponto de deformação conhecida* na imagem (referência). Isso se deve ao fato de que o software faz os cálculos de deformação relativos a esse determinado ponto. Se nenhuma deformação no objeto é conhecida, deve-se escolher um ponto de interesse no objeto, sendo que todos os resultados obtidos no software serão relativos a esse ponto determinado. Deve-se definir esse ponto no editor de bordas. Este será definido apenas uma vez para cada objeto ensaiado e será mantido o mesmo durante os ensaios.

Quando um objeto é iluminado, a luz incide não somente sobre o este, mas também sobre o meio no qual esse objeto está inserido. Quando uma imagem desse objeto sendo iluminado é capturada, recebe-se informação correspondente não só ao objeto, mas também a tudo que está ao seu redor e recebe iluminação. Cabe então fazer um processamento dessa imagem capturada para determinar qual o limite da informação desejada. Para isso é necessário que haja uma distinção entre a intensidade luminosa do objeto e do meio. Essa diferença de intensidade luminosa entre duas regiões distintas é conhecida como *contraste* e é muito importante para o tratamento das imagens capturadas, em especial para que a biela seja distinguida do meio físico e de seu fixador. O contraste nos experimentos deste trabalho será um fator de influência.

A *mudança de fase* durante a aquisição das imagens, necessária para a obtenção de padrões de interferências, é feita automaticamente pelo dispositivo ESPI. Entretanto, é necessário definir o método de mudança de fase a ser seguido, bem como o atraso entre cada mudança de fase. Da literatura, sabe-se que o método mais estável para a mudança de fase é o método 4+4 (técnica dos quatro passos, seção 2.2.7). Portanto, este será mantido como o método adotado em todos os ensaios.

Os *fatores de ambiente* estão ligados ao ambiente no qual as medições são realizadas. O laboratório possui janelas que se comunicam com o exterior do prédio. Essas janelas estão sujeitas as variações de luminosidade exterior, causando variações na iluminação interna da sala. Essa variação poderia comprometer uma aquisição caso ocorresse durante a aquisição de imagem. Decidiu-se então impedir a entrada de luminosidade colocando

laminas de papel preto opaco em todas as janelas. A única iluminação da sala é fornecida pelas lâmpadas, que serão mantidas acesas durante os ensaios. Dessa forma a *iluminação da sala* é um fator que será mantido constante.

O último passo é avaliar as variáveis de controle associadas à peça sendo ensaiada (no nosso caso a biela fornecida pela ThyssenKrupp). Podem-se enumerar fatores relacionados ao material da peça, tais como a homogeneidade do material, presença de defeitos relacionados à fabricação, entre outros. No entanto, será utilizado como fator apenas o *material*, englobando todas as possibilidades associadas dentro desse fator. Outra classe de fatores que se relaciona com a peça são os ligados à geometria da mesma. Nesse caso, os fatores são muito mais associados às tolerâncias que a geometria em si. Sendo assim, o segundo fator relacionado à peça será *tolerância* (nesse caso tanto geométrica quanto dimensional).

Concluído o levantamento dos fatores de design é necessário avaliar às fontes de variabilidade no sistema. A tabela 3.4 compila as fontes de variabilidade agrupando-as segundo a origem.

As fontes de variabilidades podem ter origens *ambientais*, no *equipamento de aplicação de carga* ou no *ajuste físico do sistema*. A existência de *correntes de ar* na sala de medições pode influenciar nos resultados obtidos. De acordo com a literatura, correntes de ar carregam partículas minúsculas em suspensão, as quais, quando entre o equipamento ESPI e a peça, podem causar espalhamentos nos feixes, gerando imprecisões nas imagens obtidas. A principal fonte de correntes de ar no laboratório é o ar condicionado. Ao desligarmos esse equipamento as correntes de ar praticamente se extinguem. Assim, as correntes de ar serão consideradas como fatores controláveis de variabilidade (FC).

Outra fonte de variabilidade do ambiente são as *vibrações do solo*. O fixador do dispositivo ESPI está apoiado diretamente sobre o solo, sendo que qualquer vibração no solo é transmitida diretamente ao dispositivo, bem como serão transmitidas ao dispositivo aplicador de carga e à peça, indiretamente. Essas vibrações podem ser oriundas de diversas fontes (passagem de carros no estacionamento ao lado do laboratório, funcionamento do maquinário de uma construção também ao lado do laboratório), não podendo ser

controladas em intensidade ou em momento de ocorrência. Dessa forma as vibrações no solo serão classificadas como fatores incontroláveis (FI).

Tabela 3.4 – Fontes de variabilidade no sistema.

ORIGEM	FATOR	CLASSIFICAÇÃO
Ambiente	Correntes de ar	FC
	Vibrações solo	FI
	Temperatura	FI
Equipamento de aplicação de carga	Vibrações do equipamento durante a aplicação da carga	FR
Ajuste Físico do sistema	Localização da peça em relação ao dispositivo ESPI	FR

As medições são realizadas no laboratório de ensaios de materiais e estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp. Outro fator relacionado ao ambiente é a temperatura da sala. Variações de temperatura podem induzir deformações na peça, o que acabaria por comprometer os resultados. Neste trabalho, a temperatura do laboratório pode ser mantida com a ajuda de um sistema de ar condicionado, que permite o ajuste desta em um nível determinado. No entanto, em diferentes dias pode-se ter temperaturas diferentes do laboratório, devido a outros fatores, tais como a temperatura externa e a intensidade do ar condicionado. Dessa forma considera-se que a *temperatura* é um fator incontrolável (FI).

Uma segunda fonte para as variabilidades é o dispositivo aplicador de carga. Durante os ensaios é usado o modelo GR048 da EMIC que possui um sistema hidráulico de aplicação da carga. Esse dispositivo é controlado por válvulas proporcionais, que regulam o fluxo de fluido enviado ao pistão hidráulico, ajustando assim a aplicação da carga. Para manter a carga aplicada, a válvula precisa mandar certa quantidade de fluido ao pistão, sendo que pequenas correções são feitas a cada momento na abertura da válvula, o que gera pequenas vibrações do sistema. Por isso, as *vibrações durante a aplicação da carga* serão consideradas como fator de ruído (FR).

A biela possui dois fixadores para que ela seja ligada máquina de tração/compressão. Devido às tolerâncias dos fixadores, bem como aos encaixes das bielas aos mesmos e dos mesmos na máquina de tração/compressão, cada vez que o sistema for montado ele terá



pequenas variações de posição, de forma que a *posição da peça em relação ao ESPI* será uma fonte de ruído (FR).

A tabela 3.5 apresenta todas as variáveis de controle que serão consideradas como fatores de influência, bem como todas as fontes de variabilidade que serão fatores controláveis de variação. Para cada um dos fatores apresentados na tabela 3.4 serão admitidos dois níveis. Um primeiro nível, representado pelo símbolo (-) correspondente ao nível inferior do fator, e um segundo nível superior representado por (+).

Tabela 3.5 – Fatores de projeto e de variabilidade e seus níveis.

<i>FATOR</i>	<i>NÍVEL</i>		<i>ÍNDICE</i>
<b>DESIGN</b>	-	+	
Distância do ESPI à superfície da peça	250 mm	300 mm	A
Ganho da Imagem	100	250	B
Suavização	2 vezes	10 vezes	C
Contraste	5	15	D
<b>VARIABILIDADE</b>			
Corrente de ar	Ar condicionado desligado	Ar condicionado ligado	E

### 3.3.3 Arranjo experimental

Definidos os fatores de influência e as fontes de variabilidade consideradas nos experimentos, passa-se à definição do arranjo a ser utilizado para a análise desses fatores. Segundo Fowlkes e Creveling (1995), três tipos básicos de arranjos podem ser adotados.

O primeiro tipo de arranjo de experimentos é conhecido como um fator por vez, que, como o próprio nome sugere, consiste na análise de cada fator separado de todos os outros. Nesse tipo de arranjo, definem-se os fatores a serem considerados, seleciona-se um a ser analisado, mantendo todos os outros fatores constantes. Em seguida varia-se o fator em análise por todos os níveis que esse deve assumir. Uma vez que esse primeiro fator está bem caracterizado, passa-se ao fator seguinte, repetindo o processo. As desvantagens desse método são o grande tempo necessário à realização dos experimentos, o fato de que pode não ser efetivo para fatores que possuam interdependência, além de ser difícil, por vezes, manter todos os fatores que não estão em análise constantes, em especial quando há interdependência de fatores.

O segundo tipo de arranjo proposto consiste numa combinação completa dos elementos em análise (fatorial completo). Nesse arranjo, todas as combinações de todos os fatores em seus diferentes níveis são testadas. O número de experimentos necessários para a realização desse arranjo é dado pela Equação (3.1), onde  $y$  é o número de níveis e  $x$  o número de fatores considerados.

$$\text{N}^\circ \text{ combinação} = y^x \quad (3.1)$$

Esse tipo de arranjo permite a identificação da influência de cada parâmetro independentemente dos outros, já que analisa todas as possíveis combinações de fatores e níveis. No entanto, fica fácil perceber pela Equação (3.1) que esse arranjo pode resultar em um número grande de testes. No caso desse trabalho tem-se 4 fatores com 2 níveis, o que resultaria num total de 16 experimentos, isso sem contar repetições de um mesmo experimento para a confirmação dos resultados.

Por fim temos os arranjos ortogonais, ou fracionários. Esses arranjos consistem na escolha de combinações que sejam capazes de fornecer informações suficientes na determinação dos efeitos de um fator no ensaio. Os efeitos dos fatores, nesse tipo de arranjo, são determinados por uma técnica conhecida como análise da média (ANOM). A convenção para a determinação do tipo de arranjo fatorial ortogonal utilizado é mostrada a seguir:

$$L = a(b^c)$$

Onde,

a = número de testes a serem realizados

b = número de níveis de cada fator

c = número de fatores considerados.

Durante a realização dos experimentos será adotado o planejamento fatorial completo. Apesar de ser um arranjo que em geral leva a muitas combinações, neste trabalho não resultará em um número inviável de ensaios. Além disso, o tratamento dos dados estatísticos obtidos em ensaios fatoriais completos é mais simples e menos sujeito a incertezas que os métodos fatoriais.

Conforme já apresentado, o experimento desejado possui quatro fatores de influência, sendo que cada um pode assumir dois níveis, ou seja, um arranjo fatorial  $2^4$ . O arranjo adotado segue os padrões para arranjos  $2^k$  apresentados em Montgomery (2005). Esse arranjo é mostrado na tabela 3.6.

Como há apenas uma fonte de variabilidade, serão realizados todos os testes previstos para ambos os níveis definidos de variabilidade. Isso resultará em um total de 32 experimentos. Dessa forma, será desenvolvido um planejamento fatorial completo de 4 fatores de influência e 1 fonte da variabilidade. Esses 32 experimentos serão realizados em ordem aleatória, a fim de evitar que os resultados obtidos sejam influenciados por pequenas variações involuntárias dos parâmetros.

Tabela 3.6 – Arranjos experimentais para um ensaio 2<sup>4</sup>.

Teste	A	B	C	D	Tratamento
1	-	-	-	-	*
2	+	-	-	-	[A]
3	-	+	-	-	[B]
4	+	+	-	-	[AB]
5	-	-	+	-	[C]
6	+	-	+	-	[AC]
7	-	+	+	-	[BC]
8	+	+	+	-	[ABC]
9	-	-	-	+	D
10	+	-	-	+	[AD]
11	-	+	-	+	[BD]
12	+	+	-	+	[ABD]
13	-	-	+	+	[CD]
14	+	-	+	+	[ACD]
15	-	+	+	+	[BCD]
16	+	+	+	+	[ABCD]

O objetivo com essa metodologia é reduzir a variabilidade dos resultados em torno de um valor nominal, ou seja, minimizar a influência dos fatores de variação nos resultados das medições. A tabela 3.7 mostra a aleatorização e a condução a ser realizada nos ensaios. Por fim, a série de ensaios será repetida para aprimorar os resultados e verificá-los.

Tabela 3.7 – Aleatorização dos experimentos.

Teste	Aleatorização	Fator				
		A	B	C	D	E
1	8	-	-	-	-	-
2	15	+	-	-	-	-
3	3	-	+	-	-	-
4	22	+	+	-	-	-
5	29	-	-	+	-	-
6	11	+	-	+	-	-
7	31	-	+	+	-	-
8	1	+	+	+	-	-
9	18	-	-	-	+	-
10	28	+	-	-	+	-
11	30	-	+	-	+	-
12	24	+	+	-	+	-
13	27	-	-	+	+	-
14	4	+	-	+	+	-
15	19	-	+	+	+	-
16	10	+	+	+	+	-

Teste	Aleatorização	Fator				
		A	B	C	D	E
17	6	-	-	-	-	+
18	21	+	-	-	-	+
19	16	-	+	-	-	+
20	32	+	+	-	-	+
21	7	-	-	+	-	+
22	17	+	-	+	-	+
23	23	-	+	+	-	+
24	9	+	+	+	-	+
25	25	-	-	-	+	+
26	12	+	-	-	+	+
27	20	-	+	-	+	+
28	5	+	+	-	+	+
29	26	-	-	+	+	+
30	13	+	-	+	+	+
31	2	-	+	+	+	+
32	14	+	+	+	+	+

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Este capítulo inicia-se com a apresentação dos resultados baseada em métodos estatísticos a partir do arranjo dos experimentos proposto no capítulo 3. Será feita a análise dos efeitos de cada fator sobre os resultados, seguida de um tratamento por análise de variância usado para confirmar a influência de cada fator. Em seguida, será feita a análise do planejamento proposto que servirá para determinar qual a combinação das variáveis de controle produz as melhores respostas. Por fim, aproveitando a configuração determinada na análise do planejamento, serão realizados ensaios com três níveis de carregamento diferentes que serão usados para comparação com valores esperados de tensão a fim de verificar a correlação dos valores obtidos experimentalmente com os valores esperados obtidos com métodos numéricos.

### **4.1 Análise estatística**

A tabela 4.1 apresenta as tensões medidas para todas as combinações dos fatores de interesse (A, B, C e D). Essas tensões são medidas na alma da biela, apenas na região central da mesma. Essa escolha é baseada na característica de distribuição de tensões na superfície da biela e ficará mais clara quando da apresentação dos modelos de elementos finitos. Como a resposta é um mapa de fase, para cada medição será retirado um perfil de tensões da região mais central da biela (perfil semelhante ao das Figuras 4.18 a 4.20) a partir do qual é calculada uma média das tensões mostradas na tabela 4.1. Nesse ponto da análise será desconsiderada a influência do ruído (variável E, presença de correntes de ar), para dar foco apenas aos fatores de interesse do experimento. Os efeitos do ruído serão tratados na sequência do capítulo, separadamente.

No capítulo 3 foi escolhido o planejamento fatorial completo como base para a realização dos experimentos. A partir da tabela 3.7 pode-se observar que para cada combinação das variáveis de interesse têm-se duas possíveis configurações da fonte de variabilidade controlável E. Além disso, cada ensaio foi realizado duas vezes. Com isso haverá quatro valores de tensão para cada uma das combinações das variáveis de interesse, como mostrado na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Tensões equivalentes em cada sequência de medição para os diferentes níveis das variáveis.

Testes	Aleatorização	Variáveis de Interesse				1ª Repetição		2ª Repetição	
		A	B	C	D	E			
						-	+	-	+
1 e 17	8 e 6	-	-	-	-	48,43	57,57	53,63	60,47
2 e 18	15 e 21	+	-	-	-	37,67	46,44	54,37	57,90
3 e 19	3 e 16	-	+	-	-	73,40	87,15	49,53	62,75
4 e 20	22 e 32	+	+	-	-	55,81	55,77	59,13	63,37
5 e 21	29 e 7	-	-	+	-	64,57	56,42	57,61	55,68
6 e 22	11 e 17	+	-	+	-	57,76	37,64	38,57	54,47
7 e 23	31 e 23	-	+	+	-	63,28	77,07	52,49	44,22
8 e 24	1 e 9	+	+	+	-	57,57	53,09	55,45	44,67
9 e 25	18 e 25	-	-	-	+	60,56	56,32	64,94	48,32
10 e 26	28 e 12	+	-	-	+	49,76	32,88	53,54	52,38
11 e 27	30 e 20	-	+	-	+	59,68	83,08	68,17	64,93
12 e 28	24 e 5	+	+	-	+	53,58	56,98	53,45	52,37
13 e 29	27 e 26	-	-	+	+	74,49	70,52	48,66	49,73
14 e 30	4 e 13	+	-	+	+	47,65	40,22	46,86	41,54
15 e 31	19 e 2	-	+	+	+	68,36	53,25	68,20	70,65
16 e 32	10 e 14	+	+	+	+	54,31	45,70	42,80	55,40

Inicialmente iremos utilizar os dados da tabela 4.1 para fazer cartas de controle do experimento. Essas cartas são utilizadas para verificar a qualidade dos dados produzidos, bem como procurar dados que eventualmente estejam muito destoantes e que devam ser

removidos para melhorar a qualidade da análise. A Figura 4.1 mostra a carta de controle referente aos dados da tabela 4.1.

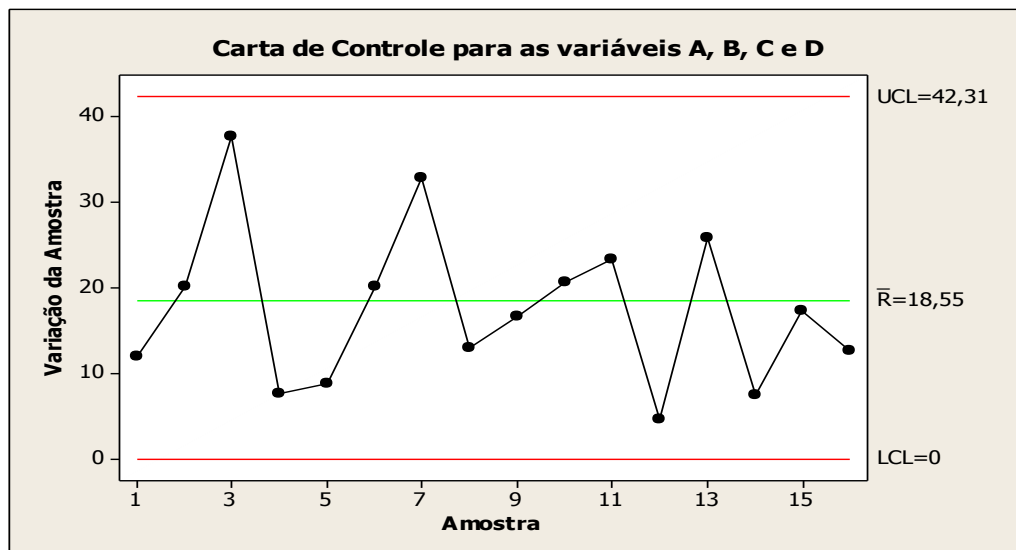


Figura 4.1 – Carta de controle para as variáveis de controle do planejamento.

Pela Figura 4.1 notamos que as amostras 3 e 7, referentes aos testes de mesmo índice, possuem uma variabilidade muito grande. Ao verificar os dados do teste três verificamos que a tensão 49,53 MPa destoa das outras medições da mesma configuração, enquanto para o teste sete a tensão de 44,22 MPa é a que está fora do esperado. Essas tensões podem ser produto de problemas durante as medições e serão desconsideradas para as análises daqui em diante, deixando os testes três e sete com três amostras cada. A tabela 4.2 mostra os elementos retirados dos ensaios bem como as médias e desvios padrão para cada teste.

Uma vantagem da abordagem fatorial completa utilizada nesse trabalho é a possibilidade de identificar o efeito de cada variável de interesse sobre os resultados, bem como de suas combinações, de maneira mais independente do que quando se utiliza um planejamento fatorial fracionado. Isso ocorre porque em um planejamento fatorial completo são realizados todos os ensaios correspondentes a todas as combinações possíveis das variáveis de interesse, o que acaba tornando mais fácil isolar o efeito de cada variável. A desvantagem é a grande quantidade de experimentos necessários, porém este não foi um fator de impedimento para este trabalho.



Tabela 4.2 – Resumo dos valores medidos com as respectivas médias e desvio padrão.

Teste	Medições				Média	Desvio Padrão
1 e 17	48,43	57,57	53,63	60,47	55,03	5,21
2 e 18	37,67	46,44	54,37	57,9	49,10	9,00
3 e 19	73,4	87,15	*	62,75	74,43	12,23
4 e 20	55,81	55,77	59,13	63,37	58,52	3,60
5 e 21	64,57	56,42	57,61	55,68	58,57	4,08
6 e 22	57,76	37,64	38,57	54,47	47,11	10,49
7 e 23	63,28	77,07	52,49	*	64,28	12,32
8 e 24	57,57	53,09	55,45	44,67	52,70	5,65
9 e 25	60,56	56,32	64,94	48,32	57,54	7,08
10 e 26	49,76	32,88	53,54	52,38	47,14	9,64
11 e 27	59,68	83,08	68,17	64,93	68,97	10,04
12 e 28	53,58	56,98	53,45	52,37	54,10	2,00
13 e 29	74,49	70,52	48,66	49,73	60,85	13,56
14 e 30	47,65	40,22	46,86	41,54	44,07	3,73
15 e 31	68,36	53,25	68,2	70,65	65,12	7,99
16 e 32	54,31	45,7	42,8	55,4	49,55	6,25

A partir dos valores da média das tensões obtidas na tabela 4.2, juntamente com os respectivos desvios padrão, pode-se fazer a análise do efeito variável e suas combinações utilizando para tanto o software Minitab®. Considera-se tanto a média quanto o desvio padrão como resposta para aumentar a quantidade de dados para nossas análises. Além disso, o objetivo é obter um método que forneça respostas o mais próximo possível dos valores esperados (seção 4.2), porém com a variabilidade mais baixa possível. Assim o desvio padrão será um parâmetro importante para a obtenção desses objetivos. A tabela 4.3 mostra os valores para o efeito bem como seus coeficientes para todos os fatores de interesse e suas combinações, para ambas variáveis de resposta.

Primeiramente, analisam-se os efeitos ligados à média das tensões. Observando a tabela 4.3 nota-se facilmente que o efeito associado à variável A se destaca dentre os demais efeitos apresentados. Isso significa dizer que a *distância do equipamento de medição à superfície da peça* é o fator que mais exerce influência nos resultados. Esse comportamento de certa forma era esperado já que quando alteramos a distância do

equipamento ao objeto estamos variando também o tamanho dos speckles obtidos na medição, o que interfere diretamente na resolução obtida e por consequência na qualidade da imagem.

Tabela 4.3 – Efeito de cada fator de interesse e suas interações para média e desvio padrão.

Termo Constante	Média		Desvio Padrão	
	Efeito	Coefficiente	Efeito	Coefficiente
A	-12,81	-6,41	-2,77	-1,385
B	8,53	4,27	-0,33	-0,165
C	-2,82	-1,41	0,66	0,33
D	-1,55	-0,78	-0,29	-0,145
A*B	-1,67	-0,84	-3,501	-1,7505
A*C	-1,04	-0,52	-0,185	-0,0925
A*D	-1,59	-0,8	-1,493	-0,7465
B*C	-3,27	-1,64	0,427	0,2135
B*D	-1,49	-0,75	-1,595	-0,7975
C*D	0,79	0,39	0,035	0,0175
A*B*C	1,94	0,97	2,254	1,127
A*B*D	0,86	0,428	2,874	1,437
A*C*D	-0,74	-0,37	-1,335	-0,6675
B*C*D	1,11	0,56	-0,021	-0,0105
A*B*C*D	-0,52	-0,26	2,419	1,2095

Em seguida, como variável isolada, observa-se que outro efeito importante está ligado à variável B, que nos experimentos está relacionada ao *ganho* utilizado na imagem. Um aumento do ganho significa multiplicar o sinal por um valor fixo, sendo que todo o sinal fica com sua amplitude aumentada. Uma característica interessante do ganho é que a diferença entre dois valores de sinal é também multiplicada pelo valor do ganho, sendo assim mais fácil identificar pequenas variações de sinal quando subtraímos as imagens de speckle para gerar o mapa de fase. Esse efeito explica a importância relativa associada a esse fator.

A variável C aparece já com um efeito bem menor que os apresentados pelas variáveis A e B. A *suavização* é uma interpolação dos pixels com seus vizinhos que auxilia algumas vezes no aumento da resolução de uma imagem, diminuindo a influência de ruídos. Essa suavização é apenas uma interpolação realizada pelo software visando tornar a imagem mais homogênea, não introduzindo grandes mudanças nos valores obtidos, tendo assim sua influência relativizada. Já a variável D retrata a influência do *contraste* na imagem, e também não tem grande influência nas medições.

A combinação de variáveis tem como principais efeitos a combinação de AB, AD, BC e ABC. A interpretação desses resultados é mais complexa e não trivial de forma que não é possível, nesse ponto, determinar uma causa para esse comportamento. No entanto, tais observações serão guardadas para novas análises ao longo do texto.

Já para os efeitos no desvio padrão (variabilidade) temos como principais fontes de influência a variável A e as interações AB, ABC e ABD. A variável A aparece mais uma vez como a principal influência, reforçando sua importância nos experimentos. As combinações têm efeitos também difíceis de serem analisados para o desvio padrão, porém serão também consideradas no restante da análise.

#### **4.1.1 Análise de Variância (ANOVA)**

Após esse primeiro levantamento dos efeitos de cada variável na realização dos experimentos, será feita uma análise estatística mais poderosa através do uso da análise de variância (ANOVA). A análise de variância é um método estatístico usado para investigar e modelar a relação existente entre uma variável de resposta e uma ou mais variáveis que possam afetá-la. No caso, cada uma dos fatores de interesse selecionados pode assumir dois níveis, designados como ‘-’ e ‘+’. O propósito da aplicação da ANOVA é verificar a influência dos diferentes níveis de cada variável nas respostas do ensaio. Considere-se a hipótese denominada nula do teste como sendo: “cada nível produz respostas médias iguais na população”, ou seja, a variável não exerce influência nos resultados, contra a hipótese de

que pelo menos um nível produz médias diferentes, significando que os diferentes níveis produzem respostas diferentes, influenciando no ensaio.

O procedimento de teste dessas hipóteses se inicia com o cálculo das somas dos quadrados de todos os efeitos para cada fator. O sinal de cada efeito na soma dos quadrados depende da participação ou não do fator sendo testado na composição de cada efeito.

Uma vez obtidas as somas dos quadrados, deve-se estimar os graus de liberdade de cada fator, bem como das combinações de fatores e o total. Como foi adotado o planejamento fatorial completo é necessário abrir mão de uma das combinações para calcular graus de liberdade suficientes para continuar a análise. O procedimento mais comum é ignorar a parcela de combinação de todas variáveis de design, sendo também a estratégia adotada nesse trabalho. O grau de liberdade de cada fator independente é dado pela Equação 4.1, na qual  $x$  é o número de níveis do fator  $X$ , que é  $A$ ,  $B$ ,  $C$  ou  $D$  no caso em análise. Para as combinações de dois e três fatores o grau de liberdade é dado pelas equações 4.2 e 4.3 respectivamente, nas quais  $x$ ,  $y$ ,  $z$  são os números de níveis dos fatores generalizados  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Da observação dessas três equações observa-se que o grau de liberdade para os fatores isolados e suas combinações é sempre igual a um. Já o grau de liberdade total é calculado pela Equação 4.4. Além disso, é necessário também obter o valor do grau de liberdade associado ao erro, dado pela Equação 4.5.

$$DOF_X = (x - 1) = 1 \quad (4.1)$$

$$DOF_{XY} = (x - 1)(y - 1) = 1 \quad (4.2)$$

$$DOF_{XYZ} = (x - 1)(y - 1)(z - 1) = 1 \quad (4.3)$$

$$DOF_{TOTAL} = (xyzt - 1) = 15 \quad (4.4)$$

$$DOF_{erro} = DOF_{TOTAL} - \sum_{i=X,Y,Z,T} DOF_i - \sum_{i,j=X,Y,Z,T} DOF_{ij} - \sum_{i,j,k=X,Y,Z,T} DOF_{ijk} = 1 \quad (4.5)$$

A partir da obtenção de todos os graus de liberdade, calcula-se a média quadrática para cada fator e suas combinações. A média quadrática é obtida facilmente dividindo-se a soma do quadrado do fator pelo grau de liberdade associado. As equações 4.6 a 4.8

mostram as médias quadráticas generalizadas para os fatores e suas associações. A média quadrática total e do erro são dadas pelas equações 4.9 e 4.10 respectivamente.

$$MS_X = \frac{SS_X}{DOF_X} \quad (4.6)$$

$$MS_{XY} = \frac{SS_{XY}}{DOF_{XY}} \quad (4.7)$$

$$MS_{XYZ} = \frac{SS_{XYZ}}{DOF_{XYZ}} \quad (4.8)$$

$$MS_{TOTAL} = \frac{SS_{TOTAL}}{DOF_{TOTAL}} \quad (4.9)$$

$$MS_{erro} = \frac{SS_{erro}}{DOF_{erro}} \quad (4.10)$$

Finalmente, com os valores das médias quadráticas os estimadores F são calculados. O estimador F é uma razão da variabilidade entre grupos sobre a variabilidade interna do grupo. Se a média das respostas obtidas nas diferentes amostragens e associada ao nível ‘-’ de um fator for igual a media da resposta associada ao nível ‘+’ do mesmo fator é de se esperar que a variação entre níveis em nossas amostras seja equivalente à variação dentro do mesmo nível fazendo, assim, que F fique próximo da unidade para esse fator. Já quando se obtém valores grandes de F, há poucas chances das médias das respostas obtidas para esse fator serem equivalentes. O fator F é obtido como mostrado nas equações 4.11 a 4.13

$$F_X = \frac{MS_X}{MS_{erro}} \quad (4.11)$$

$$F_{XY} = \frac{MS_{XY}}{MS_{erro}} \quad (4.12)$$

$$F_{XYZ} = \frac{MS_{XYZ}}{MS_{erro}} \quad (4.13)$$

A partir de todos esses valores obtidos do cálculo da soma dos quadrados, bem como das equações 4.1 até a 4.13, é possível completar a tabela 4.4 utilizando as médias das tensões mostradas na tabela 4.2.

Nessa tabela tem-se também uma coluna correspondente ao p-value, que é extraído de uma tabela F (no caso o p-value foi obtido diretamente da aplicação do caso no software

Minitab®), e representa a probabilidade de observar um estimador F pelo menos tão grande quanto dado na tabela 4.4, assumindo que o fator em questão tem médias iguais para seus dois níveis. Assim, quando o p-value for pequeno (menor que 0.05) conclui-se que o efeito causado por aquele fator é significativo.

Da tabela 4.4 fica claro que o efeito principal está relacionado à distância do equipamento ESPI ao objeto, representado pelo fator A, reforçando o resultado obtido na tabela 4.3. O efeito B também é destacado por apresentar um estimador F alto e um p-value menor que 0,05. As combinações AD e BC mais uma vez apresentaram grandes estimadores F e pequenos p-values, porém maiores que 0,05, o que torna a hipótese nula verdadeira pra esse caso. A variável C cai no mesmo caso anterior, com grande estimador e pequeno p-value, porém não pequeno o suficiente. Em seguida, inicia-se uma busca dos melhores níveis a serem adotados para cada fator de interesse.

Tabela 4.4 – Soma dos quadrados, média quadrática, estimadores e p-value para o experimento, para média das tensões.

<b>Efeito</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Soma dos Quadrados (SS)</b>	<b>Média dos Quadrados (MS)</b>	<b>Estimador (F)</b>	<b>p-value</b>
<b>A</b>	1	656,62	656,62	606,11	0,03
<b>B</b>	1	291,24	291,24	268,84	0,04
<b>C</b>	1	31,83	31,83	29,38	0,12
<b>D</b>	1	9,62	9,62	8,88	0,21
<b>A*B</b>	1	11,16	11,16	10,30	0,19
<b>A*C</b>	1	4,29	4,29	3,96	0,30
<b>A*D</b>	1	10,12	10,12	9,34	0,20
<b>B*C</b>	1	42,82	42,82	39,52	0,10
<b>B*D</b>	1	8,99	8,99	8,30	0,21
<b>C*D</b>	1	2,46	2,46	2,27	0,37
<b>A*B*C</b>	1	15,12	15,12	13,96	0,17
<b>A*B*D</b>	1	2,94	2,94	2,71	0,35
<b>A*C*D</b>	1	2,16	2,16	1,99	0,39
<b>B*C*D</b>	1	4,95	4,95	4,57	0,28
<b>Erro</b>	1	1,08	1,08		
<b>Total</b>	15	1095,39			

#### 4.1.2 Análise do planejamento proposto (Taguchi)

Uma vez terminado o processo de análise de variância sabe-se quais as principais influências nos resultados, porém, não é possível dizer quais níveis de cada fator proporcionam os melhores resultados. Para resolver esse problema, busca-se a combinação de níveis dos fatores que produzem as menores variabilidades.

Essa análise dos experimentos será feita pela metodologia de Taguchi, que propõe o cálculo das médias ( $\bar{u}$ ) e desvio padrões ( $\sigma$ ) para uma determinada combinação dos fatores de interesse variando-se apenas o fator de ruído. A partir disso, calcula-se uma grandeza que irá orientar a escolha dos níveis ótimos, chamada de relação sinal-ruído, mostrada na Equação 4.14. O objetivo é diminuir a variabilidade dos resultados, e para tanto deve-se escolher a combinação de níveis que proporcione a maior relação sinal-ruído.

$$SN_T = 10 \log \left( \frac{\bar{u}^2}{\sigma^2} \right) \quad (4.14)$$

Observando a Equação 4.14 nota-se que os maiores valores da relação sinal ruído são obtidos para os níveis que apresentarem tanto um valor grande para a média (sinal) quanto um valor pequeno para os desvios padrões (ruídos). No entanto, não estamos interessados na maior média possível, mas sim na média que mais se aproxima do valor esperado de tensão para a biela. Nos ensaios foi aplicado uma carga de três toneladas na biela, o que como será visto mais a frente nesse mesmo capítulo (Figura 4.13), a qual resulta em níveis de tensão da ordem de 54 MPa. Assim, busca-se o menor nível de ruído, com as médias mais próximas de 54 MPa.

Será feita uma análise do planejamento de Taguchi buscando um valor nominal da média das tensões o mais próximo do valor esperado juntamente com a maior relação sinal-ruído. A Figura 4.2 mostra os efeitos dos níveis nas médias bem como na relação sinal-ruído.

Na Figura 4.2 são feitas duas análises distintas dos gráficos. A primeira indica quais as melhores escolhas dos níveis das variáveis de controle para a obtenção das médias mais próximas dos valores esperados. Observando o gráfico “Efeitos principais para média” vê-se que para obter valores próximos do esperado, os níveis devem ser ajustados em 300 mm para a distância do ESPI à peça, 100 vezes o ganho, 10 vezes de suavização (aqui tratada como filtro) e 15 para o contraste. Em segunda análise, observa-se o gráfico “Efeitos principais para a razão sinal-ruído” em busca das maiores relações sinal-ruído. Para tanto, seriam mantidas as escolhas da distância do ESPI à peça e do contraste em 300 mm e 15 respectivamente. No entanto, o ganho da imagem passaria a ser 250 vezes e a suavização de 2 vezes. Essas escolhas podem ser verificadas pela tabela 4.5 que resume os dados apresentados na Figura 4.2 além de classificar as variáveis em ordem de importância para a média e para a relação sinal-ruído.

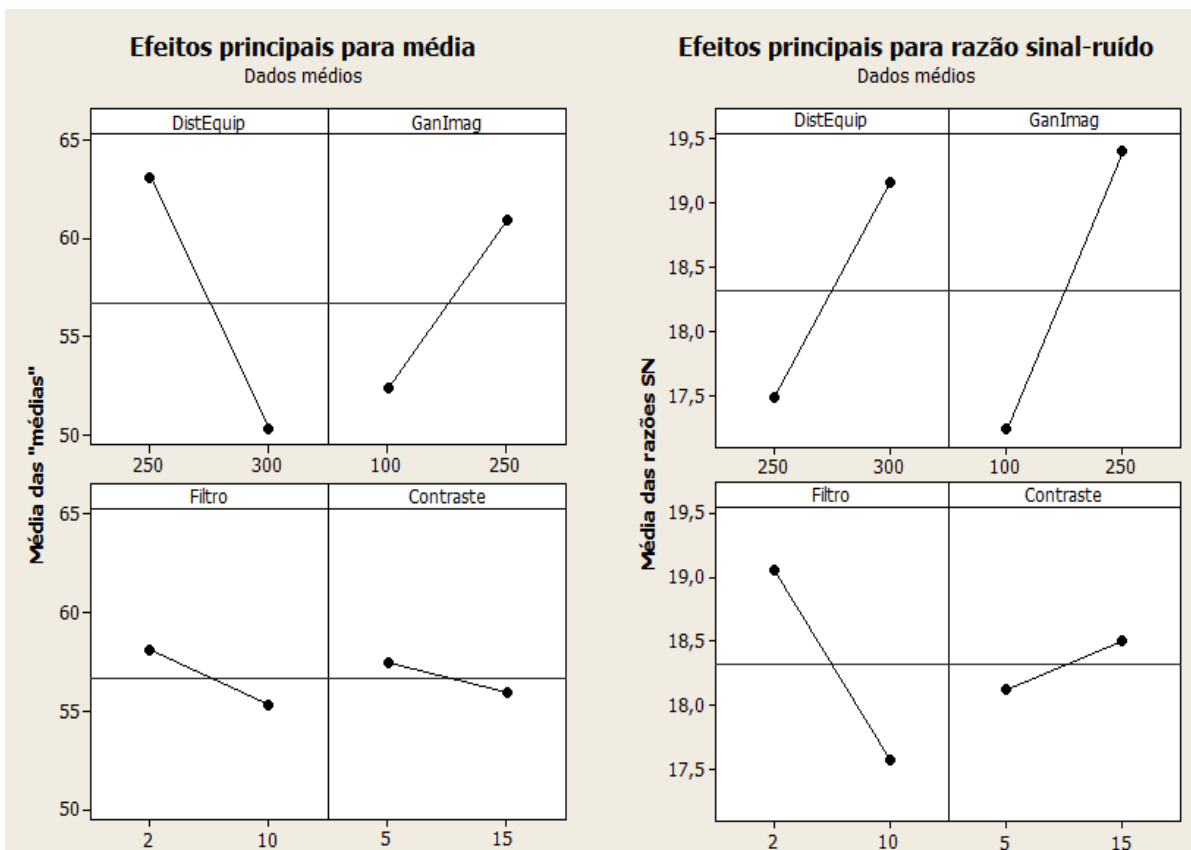


Figura 4.2 – Efeito dos níveis na média e na relação sinal-ruído.



A observação da tabela 4.5 confirma o que já havia sido levantado pela análise da Figura 4.2, mostrando a concordância dos níveis ótimos das variáveis de distância do ESPI e do contraste, e uma discordância para as outras variáveis. Em geral, nesses casos, é dada prioridade aos níveis que fornecem a maior relação sinal-ruído e diminuem a variabilidade das respostas obtidas nos experimentos. Nesse trabalho, ao invés de adotar-se esse procedimento de maneira direta será feita mais uma análise, no intuito de obter um maior embasamento na escolha final dos níveis ótimos das variáveis. Essa análise é conhecida como análise de *desirability*, e será detalhada a seguir na seção 4.1.3.

Tabela 4.5 – Análise do Planejamento de Taguchi.

Nível	Média				Sinal-Ruído			
	Distância ESPI	Ganho	Suavização	Contraste	Distância ESPI	Ganho	Suavização	Contraste
1	63,1	52,42	58,1	57,47	17,48	17,23	19,06	18,13
2	50,28	60,96	55,28	55,91	19,16	19,41	17,58	18,51
Delta	12,81	8,53	2,82	1,55	1,68	2,17	1,49	0,38
Posição	1	2	3	4	2	1	3	4

#### 4.1.3 Análise da função utilidade e otimização

Nessa etapa do trabalho, o que se deseja é confirmar os níveis ótimos de cada variável para o experimento proposto no capítulo 3. Para tanto será proposto um método de otimização multi objetivos das respostas com base em um algoritmo idealizado por Derringer e Suich (1980), no qual é possível otimizar a resposta para diversas variáveis simultaneamente.

Por esta abordagem, a transformação é realizada para cada uma das  $n$  respostas, o que acaba por resultar em uma função utilidade (*desirability*) individual  $d_i$ , onde  $0 \leq d_i \leq 1$ . Por este método, o modelo estatístico é obtido, primeiramente, utilizando-se mínimos

quadrados ordinários (*ordinary least square*). Os valores individuais obtidos através da transformação são então combinados utilizando média geométrica, compondo o índice de *desirability* global (GD) como na Equação 4.2.

$$GD = \left[ \prod_{i=1}^n d_i^{w_i}(\hat{Y}_i) \right]^{\frac{1}{W}} \quad (4.2)$$

Na Equação 4.2  $w_i$  é o peso individual de cada resposta, aqui tratada como  $\hat{Y}_i$  e  $W$  é o termo que carrega a média geométrica. O peso define a forma da função de utilidade para cada resposta. É possível, ainda, selecionar um peso de 0,1 a 10 para diminuir ou aumentar a ênfase em cada alvo. A tabela 4.6 ilustra a atuação dos pesos sobre os alvos, e o atendimento das metas

Tabela 4.6 – Pesos e metas da função *desirability*.

Peso	Impacto	Função <i>Desirability</i>	Meta	Atendimento Meta
<b>0,1</b>	Pesos menores que 1 enfatizam menos o alvo, ajustando mais por meio dos limites. Respostas longe do alvo e dentro dos limites podem ter alto <i>desirability</i>		Minimizar resposta	
<b>1</b>	Peso igual a 1 enfatiza de maneira idêntica os limites e o alvo		Acertar um Valor	
<b>10</b>	Pesos maiores que 1 enfatizam mais o alvo. A resposta deverá estar muito próxima do alvo para ter um <i>desirability</i> alto		Maximizar resposta	

. O valor de GD leva a uma solução de compromisso para os níveis das variáveis de controle e está restrito ao intervalo [0,1]. Quando esse valor é próximo de um, as respostas estão perto das especificações. Quanto mais distante de um, mais longe das especificações as respostas estarão. O índice GD é global, e leva em conta o atendimento simultâneo de todas as metas propostas, juntamente com seus respectivos pesos.

Nesse trabalho, escolheu-se duas variáveis de resposta para compor a otimização do planejamento experimental, sendo elas a média das tensões e o desvio padrão das medidas, mostrados na tabela 4.2. É importante observar que busca-se um valor alvo para a média, enquanto que para o desvio padrão o desejado é a minimização. Para a média o alvo será 54 MPa, com limites [52,56] e para o desvio padrão a minimização será feita com limite superior de 3 MPa de variação. A tabela 4.7 resume essas escolhas.

Tabela 4.7 – Resumo das entradas da função *desirability*.

<b>Resposta</b>	<b>Meta</b>	<b>Inferior</b>	<b>Alvo</b>	<b>Superior</b>	<b>Peso</b>	<b>Importância</b>
<b>Média</b>	Alvo	52	54	56	0,8	1
<b>Desvio Padrão</b>	Minimizar	X	0	3	1	1

Como já dito na seção anterior durante a análise do planejamento de Taguchi, a diminuição da variabilidade das respostas é mais crítica do que a média das respostas. Dessa forma, foi tomado um peso pouco menor que um para a média enquanto o peso do desvio padrão foi mantido na unidade, justamente para diferenciar essa importância relativa de cada resposta. Por fim, realiza-se a análise da função de utilidade mostrada na Figura 4.3.

Da Figura 4.3 podemos notar que os valores das variáveis de controle propostos por essa otimização (dados na linha “Atual” dos níveis, destacado em vermelho) concordam com os valores obtidos para a análise do planejamento de Taguchi buscando a maximização da relação sinal-ruído. Essa já seria a escolha natural apenas pela análise de Taguchi, passa a ser nossa escolha para os níveis dos fatores de interesse. Dessa forma ficamos com a distância do ESPI à peça fixada em 300 mm, o ganho da imagem ajustado em 250 vezes, a

suavização de 2 vezes e o contraste de 15. A partir dessa configuração procederemos à realização de um ensaio propriamente dito para verificar os mapas de tensão obtidos pelo ESPI com os vindos de simulações numéricas.

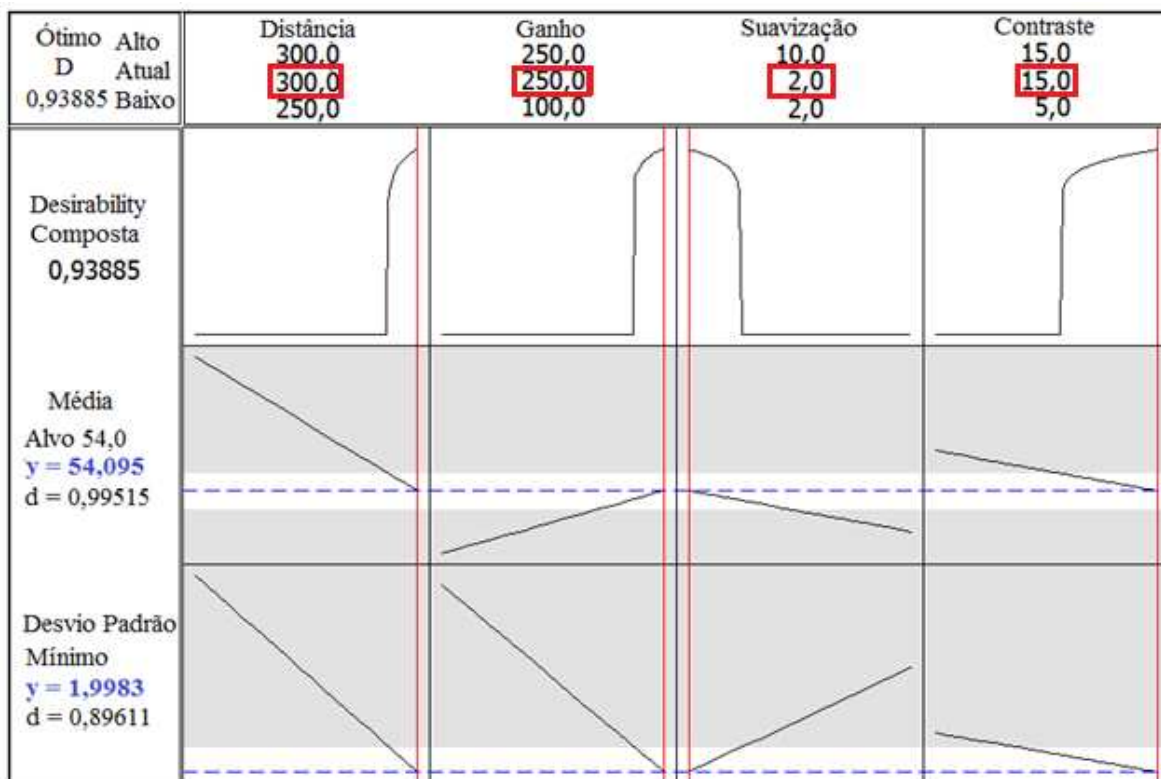


Figura 4.3 – Função utilidade para a média e o desvio padrão.

## 4.2 Ensaio da biela

Uma vez feito o levantamento das influências sobre os ensaios e escolhidos os níveis a serem usados será realizada uma série de testes visando verificar o método para a medição de tensão em bielas por interferometria de speckles. O termo “validar” poderia ser usado, mas como as verificações serão feitas pela comparação entre um método experimental em desenvolvimento e um método numérico, não é adequado usá-lo. A única

forma de validar um método experimental é através de sua comparação com um método experimental confiável. Pode haver controvérsias quanto ao fato de que o método numérico é usado para a comparação, mesmo considerando que o Método dos Elementos Finitos é reconhecido como válido para aplicações como o cálculo de tensões em elementos mecânicos. Ainda assim, o método tem um erro de convergência inerente, além de possíveis erros de modelo geométrico, idealizações e hipóteses.

Nos ensaios a seguir serão aplicadas cargas de compressão axial ao eixo longitudinal da biela e serão medidos os esforços induzidos na superfície da mesma. A biela a ser utilizada é fornecida pela ThyssenKrupp Metalúrgica de Campo Limpo e uma imagem de uma peça semelhante à utilizada pode ser vista na Figura 4.4.



Figura 4.4 – Biela forjada modelo Cummins utilizada nos experimentos.

Essa biela é forjada em aço com propriedades muito próximas às apresentadas na tabela 3.2 e que, por motivo de sigilo industrial, como já dito no capítulo 3, não serão fornecidas em sua integridade. As principais dimensões dessa biela foram apresentadas na tabela 3.1, restando a essa seção apresentar uma representação da seção transversal da alma da mesma, que será de grande interesse para efeitos de cálculo de valores esperados de tensão. Essa seção transversal está mostrada a seguir na Figura 4.5.

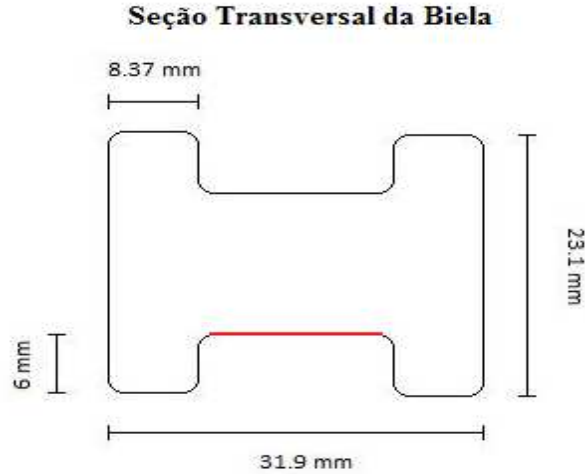


Figura 4.5 – Seção transversal da alma da biela.

As medições serão focadas na área da alma da biela, pois essa possui uma superfície plana em seu centro, destacada em vermelho na Figura 4.5. O fato de a região de medição ser plana facilita as medições, uma vez que é necessária uma estabilidade do experimento ainda maior para a realização de medições na direção fora do plano da superfície, ficando a medição tridimensional das tensões como uma recomendação para trabalhos futuros.

Por se tratar de um método não convencional de medição de tensão e deformação e por fazer uso de equipamentos que não são comumente utilizados em laboratórios de ensaios mecânicos para esse fim, foi necessário no início do trabalho realizar uma série de ensaios com o intuito de permitir ao autor desta dissertação a familiarização com o equipamento e com o método. Esses experimentos foram realizados já com a biela que seria mais tarde utilizada para realizar as medições finais do trabalho aplicando cargas axiais de compressão. A não realização de ensaios com um componente mais simples é baseada no fato de anteriormente já terem sido realizados experimentos com placas planas com um furo para a validação do equipamento na medição de tensões por outros membros do mesmo laboratório sob a mesma orientação. Esses resultados foram repassados gentilmente pelo autor, estudados e compreendidos, dando continuidade ao presente trabalho. Esses resultados podem ser encontrados em Matsusaki, 2009.

Além de integração com o equipamento, esses ensaios iniciais serviram também para aperfeiçoar o uso e integração dos equipamentos necessários à medição, tais como os fixadores da biela, que podem ser vistos na Figura 3.4, bem como o próprio dispositivo de aplicação de carga, apresentado na Figura 3.2. Foi necessária a criação de uma rotina para o controle de aplicação da carga, que foi elaborada pelo laboratório de ensaios mecânicos da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp.

Outro papel fundamental desses testes iniciais foi a verificação das sensibilidades do equipamento tanto a distúrbios externo, tais como variação na iluminação ambiente, vibrações não controláveis do ambiente, quanto aos fatores relacionados à montagem do experimento. O levantamento desses fatores foi fundamental para auxiliar no desenvolvimento da fase de planejamento e preparação dos experimentos. Os dados obtidos nesta fase serviram de base para a elaboração do design de experimento realizado no capítulo 3.

Uma vez feito o levantamento dos parâmetros e a análise de variância (ANOVA) das amostras, bem como aplicando Taguchi e a função utilidade, chega-se à melhor configuração das variáveis para a realização dos experimentos. Essa combinação é a que resulta em uma minimização da variabilidade dos resultados. Os níveis escolhidos foram discutidos na seção 4.1.2 e estão compilados na tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Níveis dos fatores de interesse escolhidos.

<b>FATOR</b>	<b>NÍVEL</b>	<b>ÍNDICE</b>
Distância do ESPI à superfície da peça	300 mm	A
Ganho da Imagem	250	B
Suavização	2 vezes	C
Contraste	15	D

O ensaio de verificação será realizado com os níveis descritos para os fatores e usando três cargas axiais de compressão. Os resultados serão, então, comparados com os obtidos por meio de simulações em elementos finitos. Será feito também uma estimativa das variações obtidas entre o simulado e o medido. As cargas axiais de compressão utilizadas serão de 10 kN, 20 kN e 30 kN. Essas cargas foram escolhidas por estarem dentro do intervalo de cargas que resultam em níveis baixos de tensão e deformação, assegurando assim que os ensaios serão feitos com cargas menores do que as capazes de causar escoamento ou flambagem na biela. Além disso, é preciso garantir que os deslocamentos não excedam o limite de correlação do equipamento ESPI durante as medições, fenômeno esse descrito no apêndice B. A perda de correlação implica na perda da medição, uma vez que os resultados gerados não serão condizentes com a realidade.

Em trabalhos futuros pode-se estudar a introdução de medições com cargas maiores fazendo uso de técnicas de aplicação de cargas em etapas. Para tanto, a uma parte da carga deve ser aplicada e uma aquisição feita, em seguida introduz-se outra parte da carga e faz-se uma nova aquisição, repetindo esse procedimento até que toda a carga desejada tenha sido aplicada. O Q-300 possui um módulo que disponibiliza esse tipo de medição, porém um problema dessa operação é garantir a estabilidade da carga aplicada no momento das aquisições intermediárias. Isso significa que para realizar uma aquisição é necessário que o conjunto esteja sujeito a uma carga estática que não varie durante a captura da imagem pelo sistema. Esse processo costuma levar aproximadamente três segundos para se completar, mas o tipo de aplicação feita, com cilindros hidráulicos controlados por servoválvula, não permitiu que esse controle fosse feito de maneira satisfatória.

#### **4.2.1 Cálculo analítico das tensões na alma**

Como já citado nesse capítulo anteriormente, o interesse está nas tensões que surgem na alma da biela após a aplicação da carga. Não há interesse nas tensões que aparecem próximas aos olhais que se comportam como concentradores de tensão. Tanto na literatura



básica de bielas quanto em resultados utilizados e bem conhecidos dos fabricantes, quando se aplica uma carga uniaxial de compressão numa direção paralela ao eixo transversal da biela, a alma dessa irá experimentar tensões superficiais constantes ao longo do seu comprimento.

Tendo isso em vista, o primeiro passo é fazer uma modelagem simplificada da peça. Essa primeira modelagem visa encontrar um valor inicial teórico esperado. Considera-se apenas a região da alma da biela, que será modelada como uma viga (ou coluna), apresentada na Figura 4.5. A modelagem como elemento de viga da alma da biela é possível uma vez que o carregamento é apenas axial com tensões constantes ao longo do comprimento. O único cuidado nesse ponto é a utilização de elementos de viga que contemplem pelo menos 3 graus de liberdade por nó (deslocamento axial, transversal e uma rotação), para que os efeitos axiais sejam considerados nos cálculos, uma vez que aqui eles são importantes.

Antes de apresentar os resultados para essa modelagem, uma abordagem analítica do problema é também desenvolvida. Será aproveitado o fato de que as tensões são constantes ao longo da alma da biela. A partir da teoria clássica de elasticidade é possível obter as tensões esperadas para cada carregamento a partir da relação  $\sigma = F_a/A$ , onde  $F_a$  é a força aplicada e  $A$  é a área da seção transversal, que no caso tem valor igual a 555 mm<sup>2</sup>. Na tabela 4.9 são apresentados os valores calculados de tensão para os diferentes valores de cargas aplicadas. Esses valores servem como uma primeira aproximação das tensões presentes na peça. Para obter esses valores é suposto que toda a carga aplicada é transmitida para a biela, desprezando assim os efeitos da acomodação do conjunto de fixação durante o ensaio. Esses cálculos servirão para futuras comparações com os resultados obtidos por simulações.

Tabela 4.9 – Nível de tensão esperado para as diferentes cargas aplicadas.

<i>Carga (kN)</i>	<i>Tensão (MPa)</i>
10	18,02
20	36,04
30	54,06

## 4.2.2 Simulação numérica simplificada das tensões na alma

Na primeira modelagem por elementos finitos são definidos quatro elementos ao longo do comprimento da alma. Para executar a simulação fez-se uso do software Nastran for Windows® realizando uma análise estática do modelo. As respostas obtidas a partir dessas simulações estão mostradas na Figura 4.6 para uma carga de 10 kN, Figura 4.7 para 20 kN e Figura 4.8 para 30 kN.

Aqui a tensão principal tem valor das tensões equivalentes apresentadas nas figuras 4.6 a 4.8. Isso ocorre pois a tensão na direção perpendicular à direção do carregamento é nula (carga aplicada sobre o eixo vertical e não há flambagem).

Como podemos facilmente notar da comparação dos níveis de tensão obtidos pela análise em elementos finitos com os valores obtidos analiticamente a correspondência é praticamente total, como era de se esperar, uma vez que ambas abordam o problema de forma semelhante.

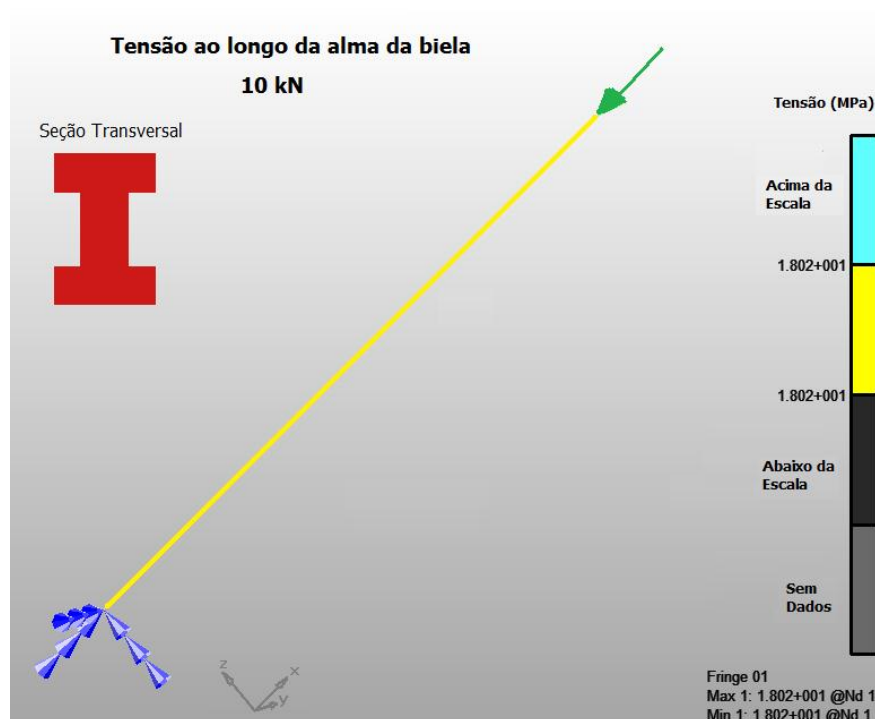


Figura 4.6 – Tensão equivalente ao longo da alma da biela para 10 kN.

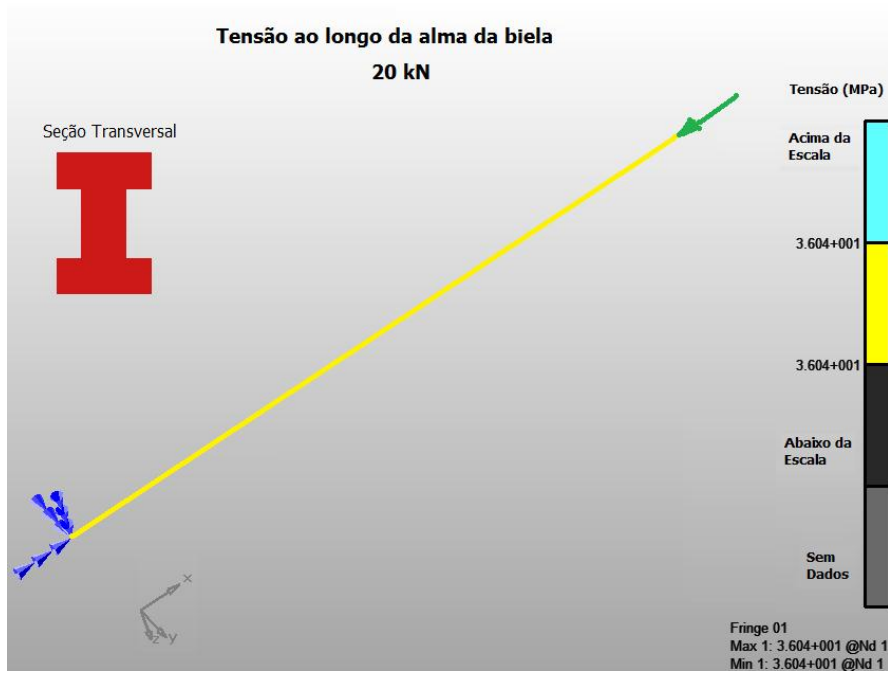


Figura 4.7 – Tensão equivalente ao longo da alma da biela para 20 kN.

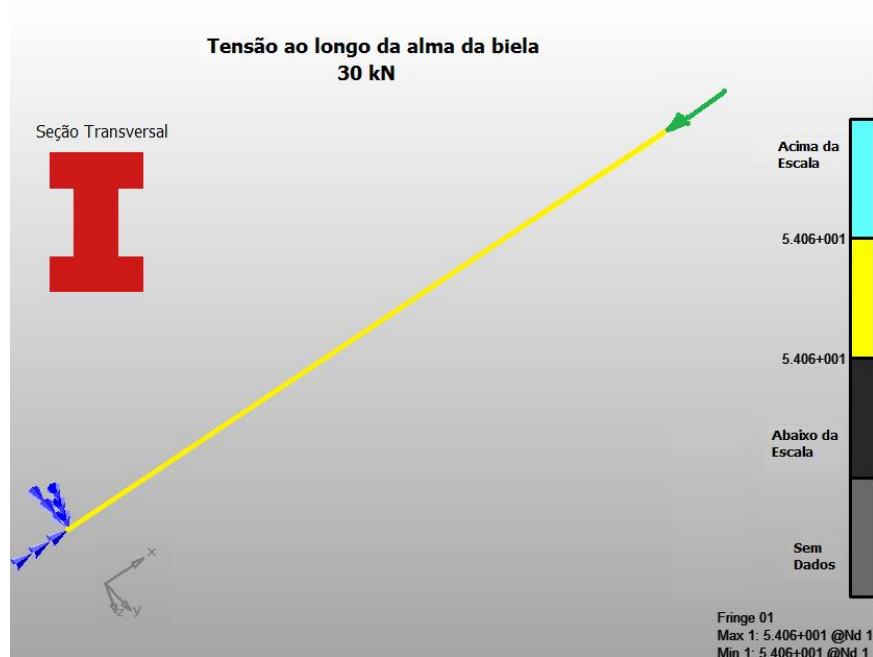


Figura 4.8 – Tensão equivalente ao longo da alma da biela para 30 kN.

### 4.2.3 Simulação numérica tridimensional das tensões na alma

O próximo passo é uma simulação mais elaborada, modelando a biela inteira, bem como seu fixador e aplicando o carregamento ao conjunto como um todo. O modelo da biela foi feito com base nas dimensões principais apresentadas na tabela 3.1 e Figura 4.5. O fixador não foi apresentado aqui por não ser de interesse nesse trabalho, porém ele foi desenvolvido em conjunto com a ThyssenKrupp, de maneira a garantir uma rigidez muito maior que a da própria biela, tentando assim reduzir ao máximo a influência do fixador nos experimentos.

O modelo do conjunto foi desenvolvido no ProEngineering® e simulado no ProMecanica®. A Figura 4.9 mostra uma ilustração da biela sozinha em perspectiva, enquanto na Figura 4.10 pode ser visto o conjunto biela-fixador montado, da forma com que o conjunto foi simulado.

Para reproduzir as condições do experimento, o conjunto foi engastado em uma de suas extremidades planas de apoio, representando a condição de apoio da base do fixador com a base da máquina de tração. Na outra extremidade do conjunto foi aplicada a carga distribuída por toda a superfície plana dessa extremidade. Foi gerada uma malha com elementos tridimensionais sobre todo o conjunto, com maior refinamento nas regiões de interesse na biela bem como em regiões de contorno.

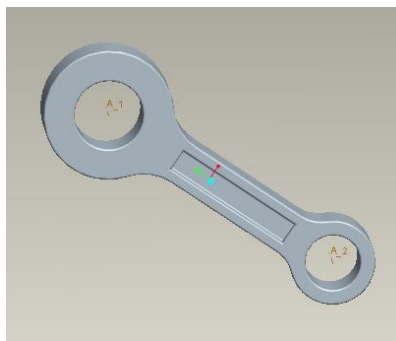


Figura 4.9 – Modelo simplificado da biela em perspectiva.

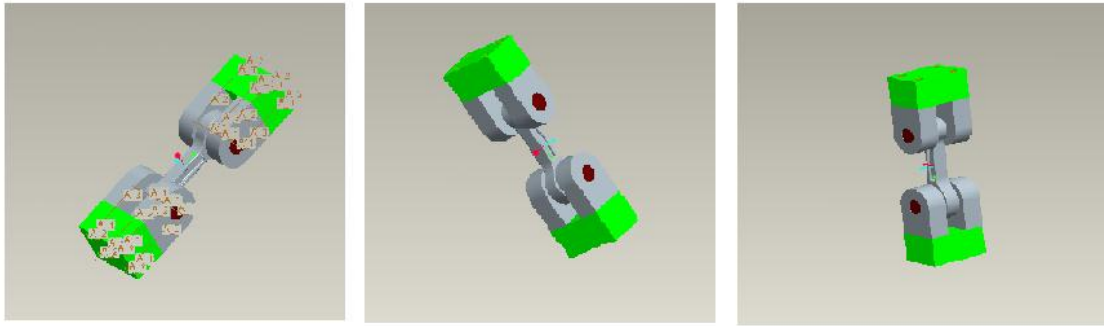


Figura 4.10 – Modelo do conjunto biela mais fixador usado nas simulações.

O fato de modelar o conjunto biela e fixador ajuda a simular uma condição mais próxima da ensaiada. Porém, como não há interesse no comportamento do fixador, serão apresentados os resultados obtidos apenas para as regiões de interesse, ou seja, alma e regiões de transição alma-olhal. Aqui, mais uma vez, os resultados são para simulações obtidas para os carregamentos de 10 kN, 20 kN e 30 kN. Estes estão mostrados nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 respectivamente.

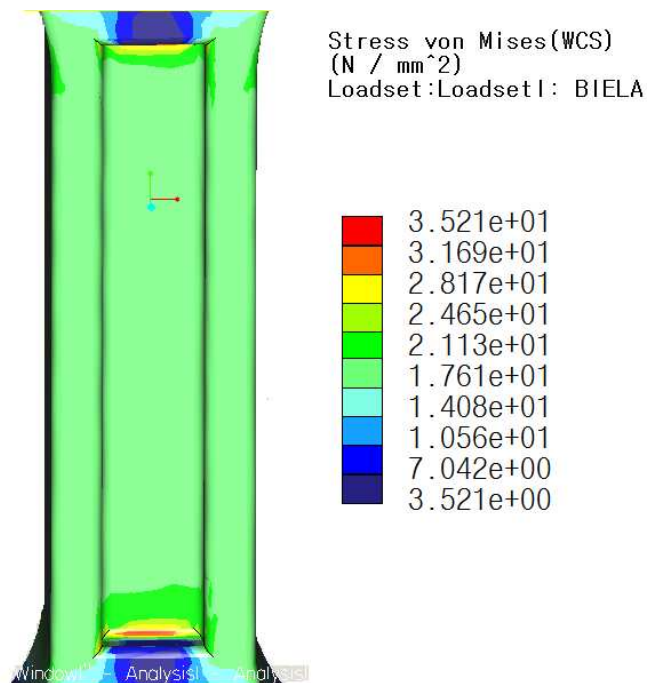


Figura 4.11 – Tensões equivalentes obtidas de para carregamento de 10 kN.

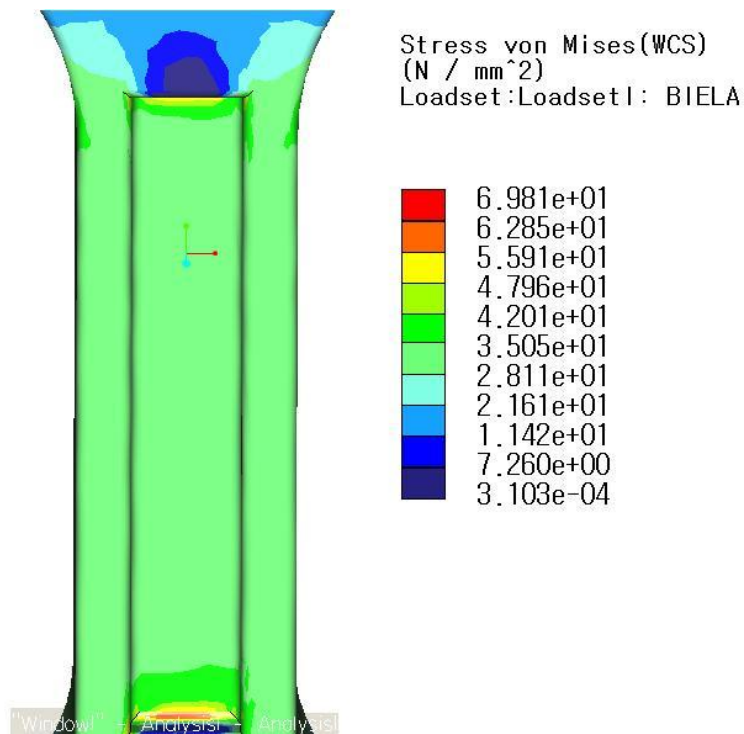


Figura 4.12 – Tensões equivalentes obtidas de para carregamento de 20 kN.

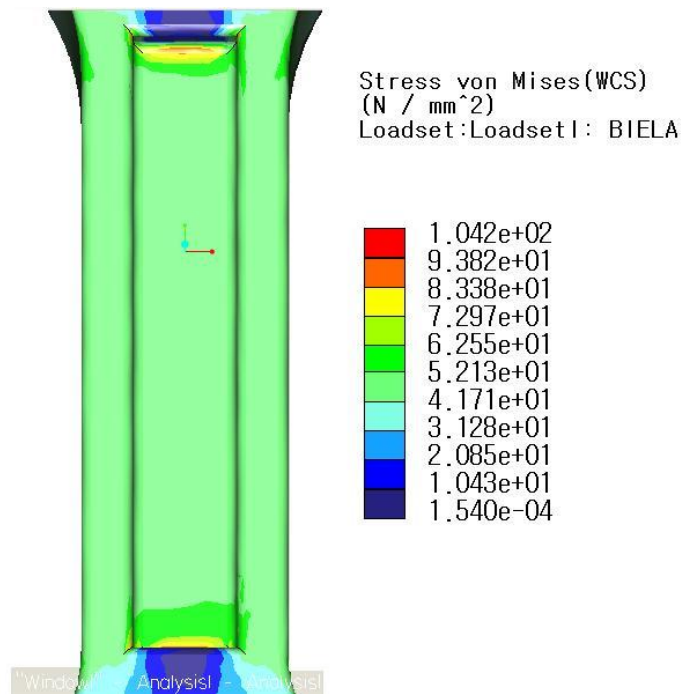


Figura 4.13 – Tensões equivalentes obtidas de para carregamento de 30 kN.

É fácil observar pelas simulações do conjunto completo que a tensão equivalente ao longo da alma da biela se mantém constante, enquanto que as regiões de transição da alma para os olhais (extremos superior e inferior nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13) são as regiões nas quais as tensões se concentram nos cantos dos rebaixos. Esse comportamento homogêneo das tensões nessa simulação dá suporte às hipóteses e simplificações feitas tanto para os cálculos mostrados na tabela 4.9 quanto para as simulações apresentadas nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8.

Uma vez feito o levantamento dos resultados esperados, pode ser feita a comparação entre os valores obtidos por cálculo direto iguais aos valores obtidos pela simulação simplificada da alma modelada como uma viga em Nastran®, com os valores obtidos pela simulação do modelo completo da biela. Essa comparação está mostrada na tabela 4.10. As tensões apresentadas nessa tabela são as tensões nodais obtidas a meio comprimento da alma.

Tabela 4.10 – Diferença entre os resultados obtidos das simulações do modelo completo e simplificado

<i>Carga</i>	<i>Modelo Simplificado (MPa)</i>	<i>Modelo Completo (MPa)</i>	<i>Variação (%)</i>
10 kN	18,02	17,61	2,28
20 kN	36,04	35,05	2,75
30 kN	54,06	52,13	3,57

#### 4.2.4 Medição das tensões na alma com ESPI

A etapa seguinte é a realização dos experimentos, levando em consideração sempre os resultados da análise do planejamento dos experimentos realizada anteriormente nesse mesmo capítulo.

Inicialmente são feitas as aquisições no estado não deformado e, em seguida, após a deformação, o ISTRÁ fornece automaticamente o mapa de fase, resultante da soma das imagens de speckle, mostrando as franjas resultantes do fenômeno de interferência descrito no capítulo 2. Esse mapa de fase provê uma resposta qualitativa da deformação sofrida pelo objeto resultante da aplicação da carga entre as duas aquisições. A Figura 4.14 mostra o mapa de fase obtido para os ensaios correspondentes às simulações e cálculos apresentados, sendo a carga de 10 kN apresentada na parte (a) da Figura 4.14, enquanto os mapas correspondentes às cargas de 20 kN e 30 kN são mostrados nas partes (b) e (c), respectivamente. Os contornos mostrados em amarelo correspondem ao contorno físico da biela, enquanto o contorno apresentado em vermelho mostra a região da alma para a qual serão traçados os mapas de tensão. As franjas que aparecem na parte inferior e, principalmente, superior da Figura 4.14, fora dos contornos, se referem ao deslocamento sofrido pelo fixador, e não irão exercer influência sobre os resultados, sendo desconsideradas automaticamente pelo software.

É fácil observar pelos mapas da Figura 4.14 também que o efeito do desalinhamento da aplicação de carga em relação ao eixo vertical da biela está presente. As franjas têm uma leve inclinação ao invés de perfeitamente horizontais. No entanto, como já anteriormente dito, esse desalinhamento não será prejudicial aos propósitos desses experimentos de verificar a equivalência das tensões medidas com as obtidas por cálculo e simulações. Dada a grande dificuldade associada ao perfeito alinhamento do eixo de aplicação do carregamento com o eixo vertical da peça, a análise será feita sem medidas de correção desse desvio.



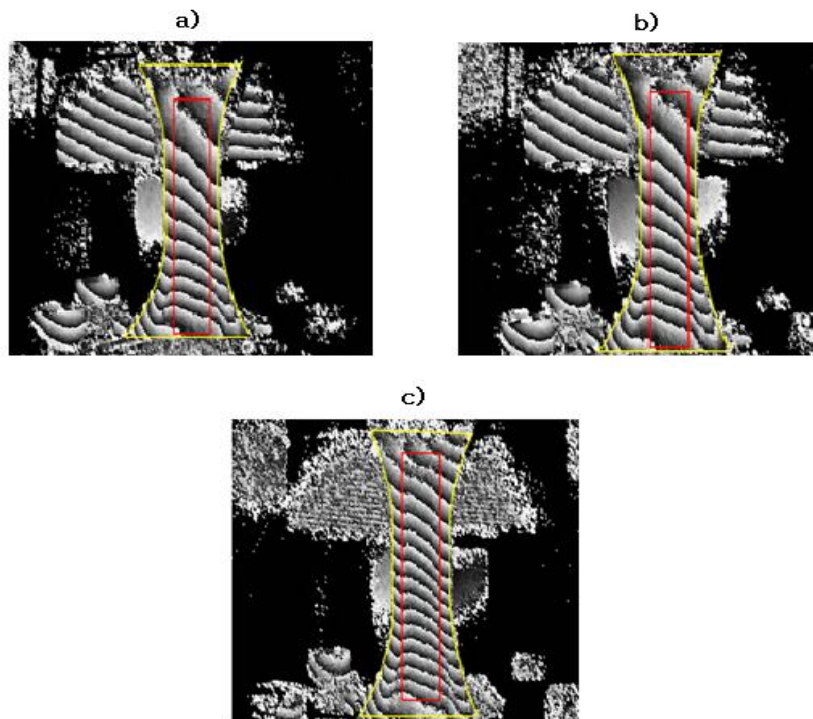


Figura 4.14 – Mapas de fase para cargas de a) 10 kN, b) 20 e c) 30 kN.

Devido à inclinação do carregamento, espera-se que as direções principais de tensão não sejam perfeitamente alinhadas com a os eixos vertical e horizontal. As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 mostram o mapa das tensões principais de maior módulo para 10 kN, 20 kN e 30 kN de carga respectivamente. Dessas Figuras é possível observar que a tensão mostrada aumenta na parte de inferior da biela com relação à parte superior da mesma, conforme a posição na figura. Esse aumento apresenta uma inclinação compatível com a inclinação apresentada pelos mapas de fase da Figura 4.14, como era de se esperar.

Da observação das Figuras 4.15 a 4.17 fica claro que as tensões aumentam linearmente com o aumento da carga, o que é o resultado esperado. Também indica que a peça ainda encontra-se na zona elástica mantendo assim a característica não destrutiva do teste. Podemos ainda comparar qualitativamente os resultados das tensões obtidos analiticamente e apresentados na tabela 4.9 que representam uma aproximação das tensões na direção  $y$ .

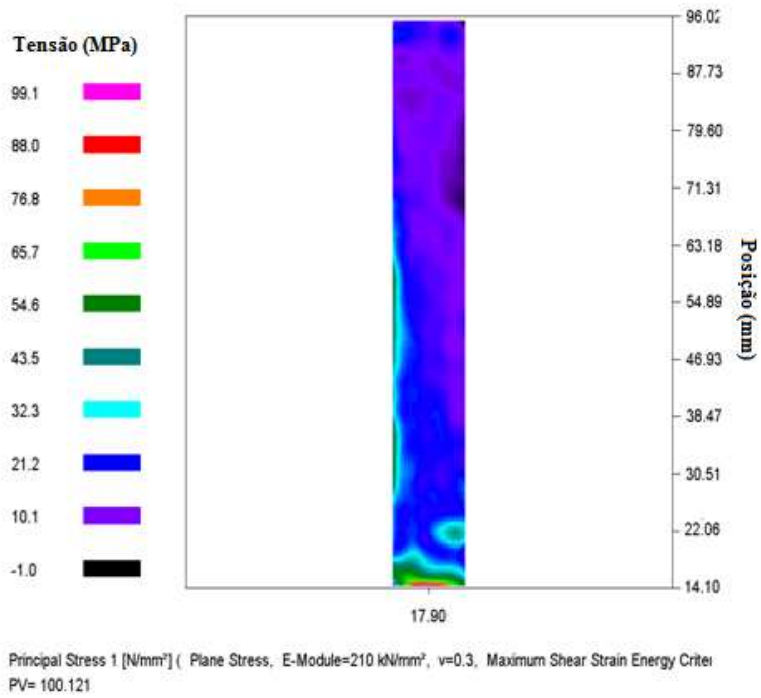


Figura 4.15 – Tensão principal ( $\sigma_1$ ) para carga de 10 kN.

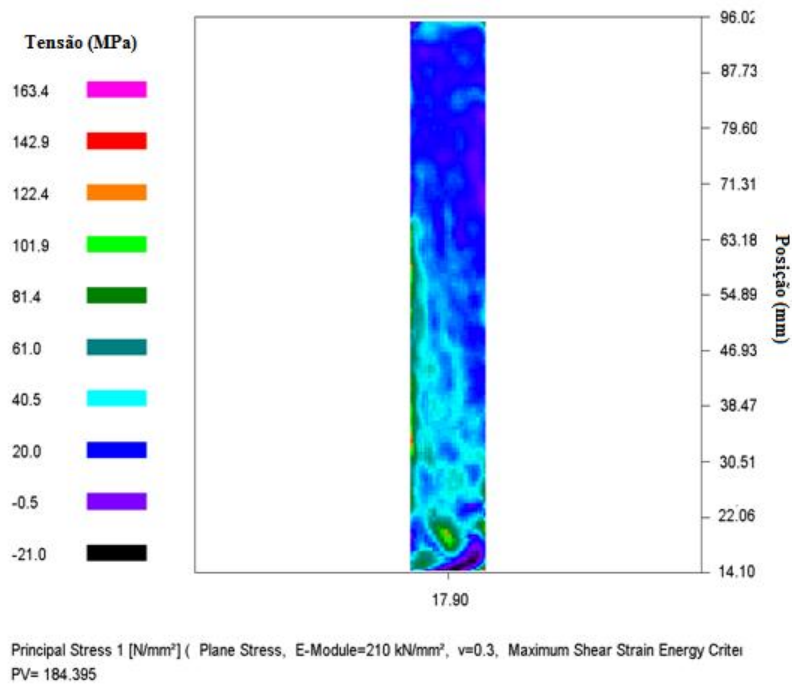


Figura 4.16 – Tensão principal ( $\sigma_1$ ) para carga de 20 kN.

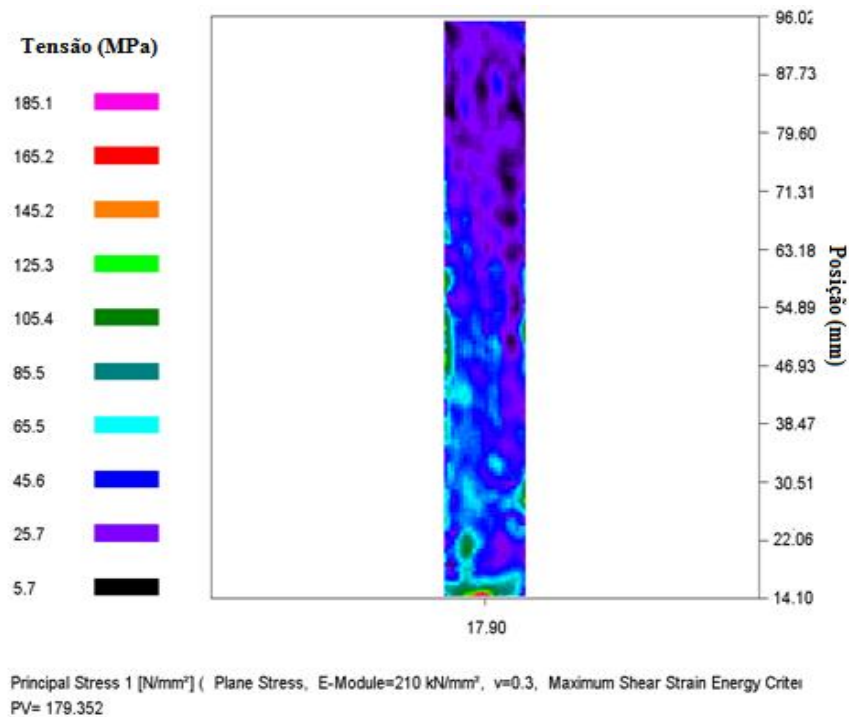
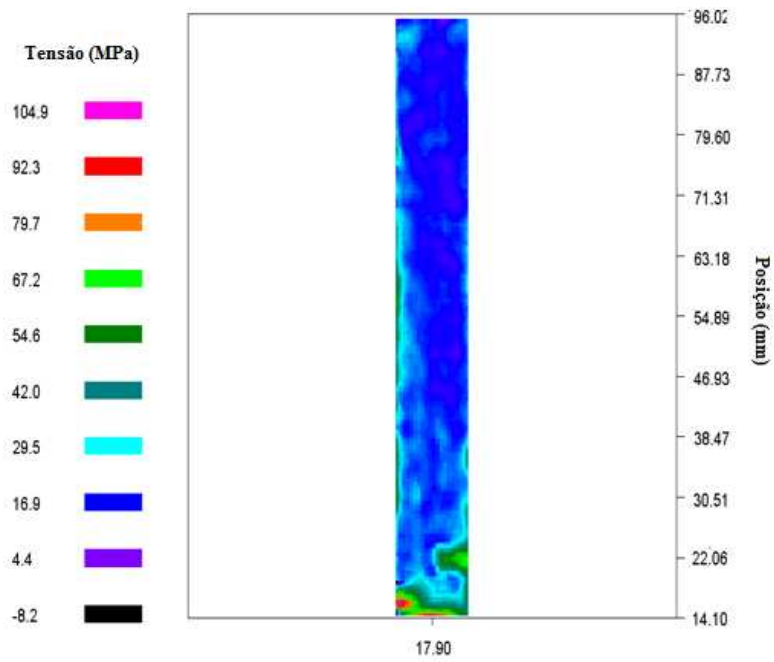


Figura 4.17 – Tensão principal ( $\sigma_1$ ) para carga de 30 kN.

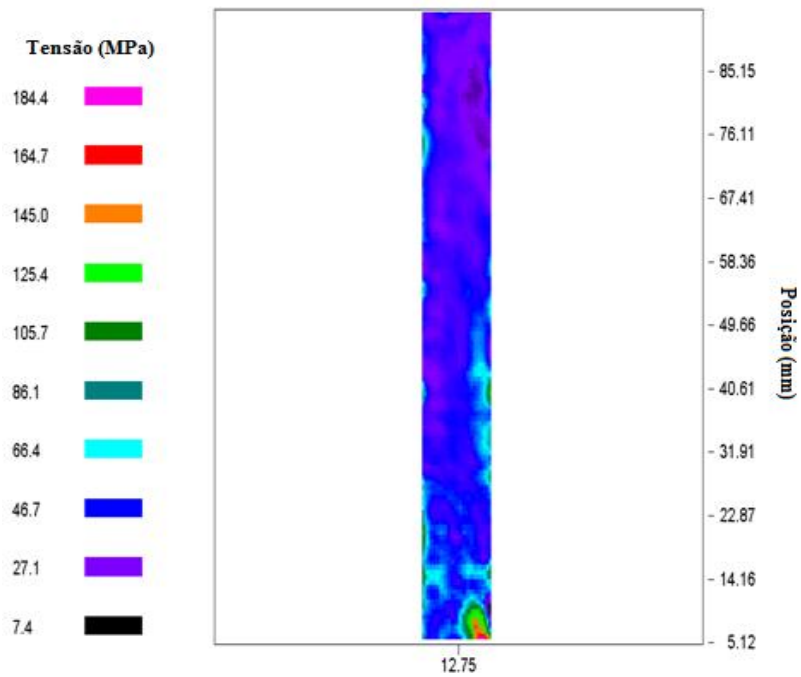
#### 4.2.5 Análise dos resultados de tensões equivalentes na alma

Após a avaliação das tensões principais será feita uma análise quantitativa das tensões equivalentes obtidas no ensaio com ESPI. As tensões equivalentes são apresentadas nas Figuras 4.18 a 4.20, referentes aos carregamentos de 10 kN, 20 kN e 30 kN, respectivamente. É possível observar a presença de tensões muito altas concentradas nas fronteiras dos mapas de tensão, tanto para os mapas de tensões principais (Figura 4.15 a 4.17) quanto para os mapas de tensões equivalentes (Figuras 4.18 a 4.20).



Equivalent Stress [N/mm<sup>2</sup>] ( Plane Stress, E-Module=210 kN/mm<sup>2</sup>,  $\nu=0.3$ , Maximum Shear Strain Energy Criter

Figura 4.18 – Tensão equivalente para carga de 10 kN.



Equivalent Stress [N/mm<sup>2</sup>] ( Plane Stress, E-Module=210 kN/mm<sup>2</sup>,  $\nu=0.3$ , Maximum Shear Strain Energy Criter

Figura 4.19 – Tensão equivalente para carga de 20 kN.

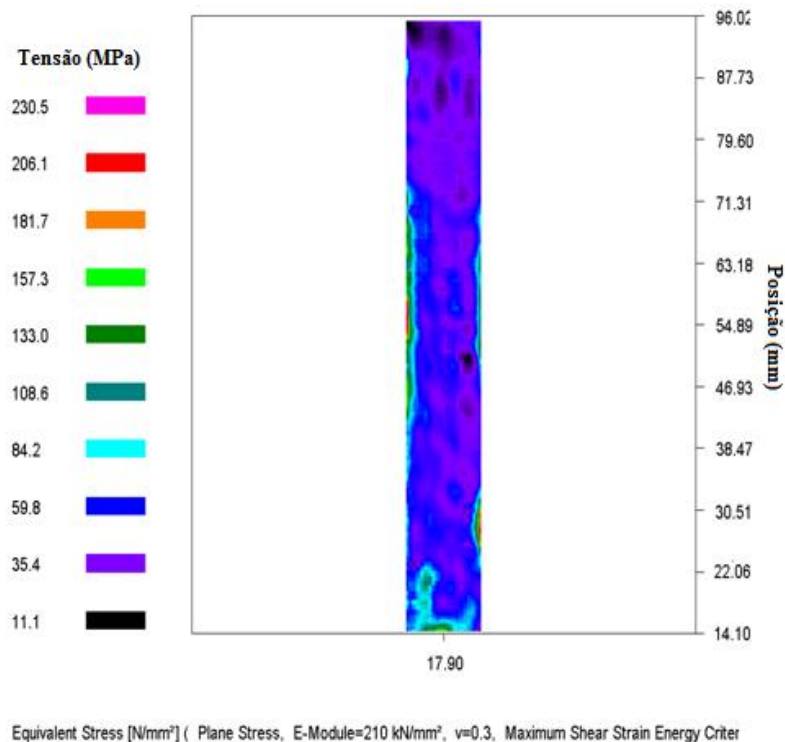


Figura 4.20 – Tensão equivalente para carga de 30 kN.

Essas tensões surgem devido à dificuldade de cálculo com software em regiões de contorno, principalmente em regiões com vizinhança em um plano diferente do plano de medição. Este é o caso da alma da biela, que tem um rebaixo central grande, no qual são feitas as medições, e uma borda de maior espessura, em um plano diferente do rebaixo. Essas tensões altas, portanto, não representam a realidade local.

Observando as Figuras 4.18 a 4.20 com as tensões equivalentes, verifica-se mais uma vez que as tensões predominantes ao longo da alma variam linearmente com a variação de carga. Porém, é necessário um olhar mais criterioso na verificação das tensões na alma da biela para compará-los com os valores esperados. Para isso será utilizada uma ferramenta do ISTRÁ que permite o traçado do perfil das tensões ao longo de um caminho na figura. Esse perfil será levantado traçando-se uma linha vertical sobre o mapa de tensões equivalentes, sendo que horizontalmente essa linha será mantida sobre a marca de 17.9 mm destacada nos mapas de tensão. Esses perfis são apresentados nas Figuras 4.21 a 4.23.

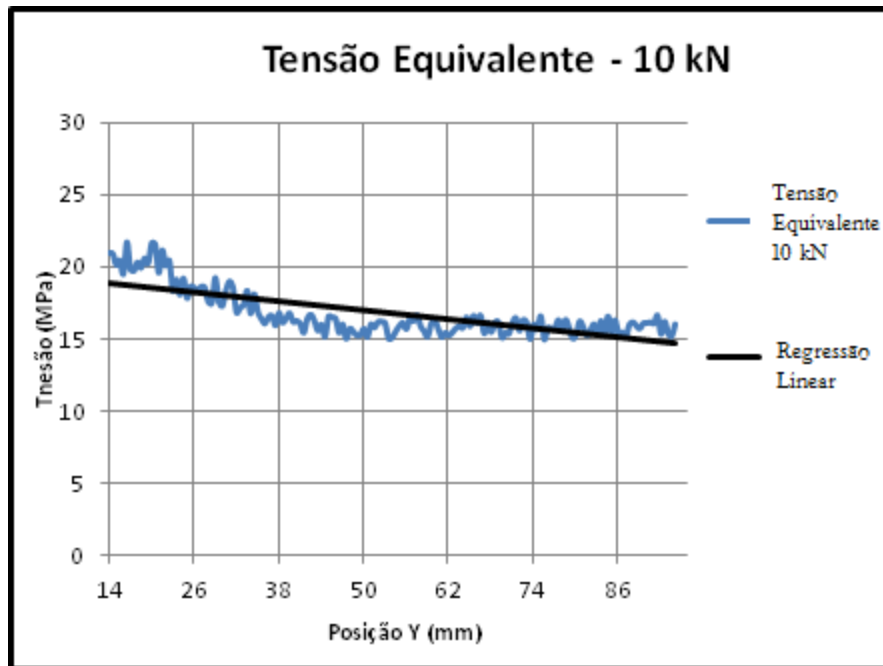


Figura 4.21 – Perfil de tensões equivalentes para um carregamento de 10 kN.

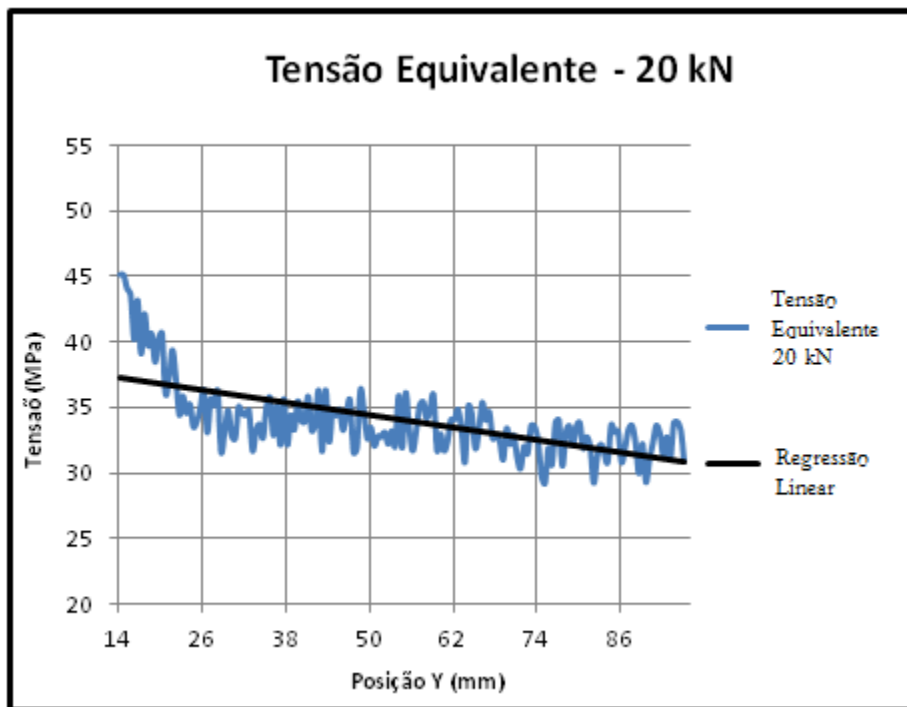


Figura 4.22 – Perfil de tensões equivalentes para um carregamento de 20 kN.

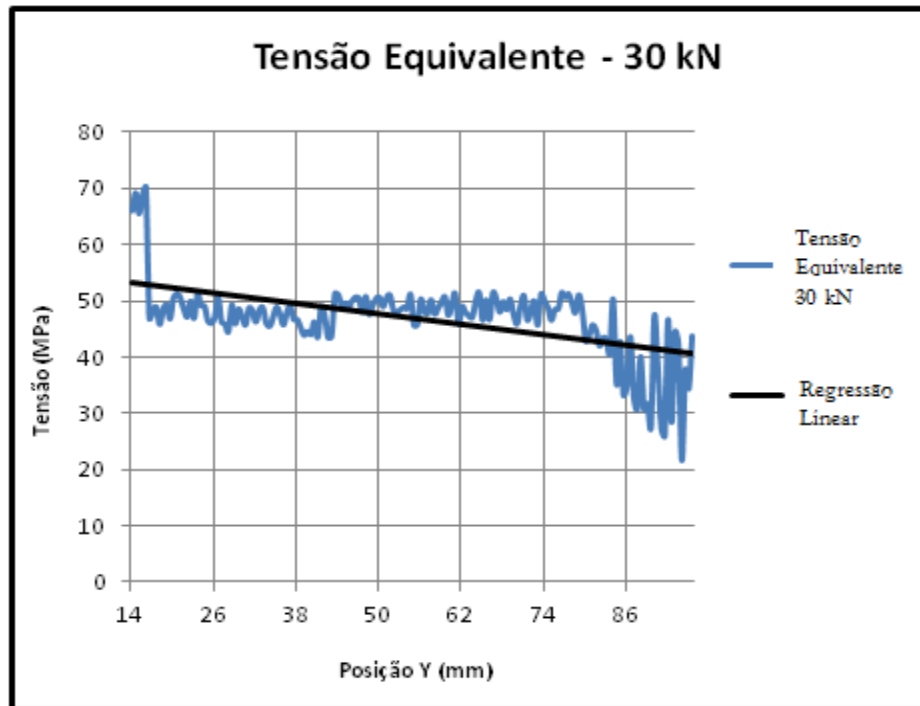


Figura 4.23 – Perfil de tensões equivalentes para um carregamento de 30 kN.

A análise dos perfis de distribuição de tensão proporciona muitas informações importantes para as comparações. Uma rápida análise global indica que os valores de tensão de fato aumentam proporcionalmente ao aumento dos carregamentos, como já constatado nos mapas de tensão. Outro ponto facilmente identificável dos perfis traçados é a diminuição rápida de tensões para valores pequenos de  $y$  (direção axial da biela) e uma estabilização das tensões no restante da alma. Esse fenômeno é explicado observando-se as Figuras 4.18 a 4.20, nas quais, como já foi ressaltado, nota-se pontos de concentração de tensões principalmente junto à fronteira inferior do mapa de tensão correspondente a valores pequenos de  $y$ .

O mesmo comportamento de diminuição de valores de tensão na fronteira para valores grandes de  $y$  maiores pode ser notado na Figura 4.23, sendo explicado pelo mesmo fenômeno descrito para pequenos valores de  $y$ . A partir dos dados utilizados para traçar os perfis de tensão, é possível construir a tabela 4.11, na qual são mostrados os valores médios

de tensão e desvio padrão associados a cada carregamento, ao longo do seguimento mostrado nas Figuras 4.21 a 4.23.

Tabela 4.11 – Média das tensões equivalentes medidas e desvios padrões para todos os carregamentos.

<b><i>Carga</i></b>	<b><math>\sigma_m</math> (MPa)</b>	<b><i>Desvio Padrão (MPa)</i></b>
10 kN	16.75	1.64
20 kN	34.03	2.88
30 kN	49.24	5.36

Por fim, é possível utilizar a tabela 4.10 e a tabela 4.11 para fazer a comparação dos valores obtidos de tensão com os valores esperados. Essa combinação está resumida na tabela 4.12, onde pode-se ver que a correlação no geral ficou dentro de níveis adequados, mantendo a diferença entre os valores obtidos e esperados sempre menor que 10%.

Nota-se também que as melhores correlações foram obtidas para a carga de 20 kN, enquanto o carregamento de 30 kN apresentou os piores resultados. Observa-se ainda que a correlação entre o valor medido e o modelo tridimensional foi melhor para todos os casos, sendo que para essa comparação as diferenças ficaram entre 3% e 6%.

Tabela 4.12 – Comparação entre os valores medidos e esperados das tensões equivalentes.

<b><i>Carga</i></b>	<b><i>Medida</i></b> <b>(MPa)</b>	<b><i>Modelo</i></b> <b><i>Simplificado</i></b> <b>(MPa)</b>	<b><i>Varição</i></b> <b>(Medido vs</b> <b><i>simplificado</i></b> <b>(%)</b>	<b><i>Modelo</i></b> <b><i>Completo</i></b> <b>(MPa)</b>	<b><i>Varição</i></b> <b>(Medido vs</b> <b><i>completo</i></b> <b>(%)</b>
10 kN	16,75	18,02	7,05	17,61	4,88
20 kN	34,03	36,04	5,58	35,05	2,91
30 kN	49,24	54,06	8,92	52,13	5,54



#### **4.4 Comentários e observações**

A correlação entre os valores obtidos nas simulações e os valores obtidos das medições ficou dentro de um patamar considerado muito bom para um método não destrutivo de medição de tensões. Apesar de os mapas de tensão obtidos nas medições não reproduzirem perfeitamente os mapas de tensão obtidos nas análises em elementos finitos, o comportamento global e os valores de tensão predominantes são bastante representativos.

Esse trabalho é inovador uma vez que não há na literatura aplicações de métodos óticos no levantamento de campos de tensão de bielas. Na verdade, a maior aplicação apresentada pela literatura para esses métodos está relacionada à medição de campos de tensões de pequenos objetos, bem como medição de tensão residual induzida por furação e outros processos industriais. O método ESPI esbarra principalmente no alto custo da aquisição do equipamento, bem como na necessidade de ambientes relativamente controlados de ensaio. A obtenção do equipamento de ensaio ESPI para este trabalho foi através de um empréstimo da empresa ThyssenKrupp Metalúrgica Campo Limpo, que também concedeu uma bolsa de estudos para a realização da dissertação, possibilitando assim a realização desse trabalho.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O primeiro objetivo desse trabalho foi verificar o emprego da técnica ESPI para o levantamento de campos de tensão para bielas. Para atingir esse objetivo o primeiro passo foi uma revisão dos conceitos básicos associados aos princípios óticos. Esta iniciou-se pela descrição da natureza da luz, chegando a métodos interferométricos empregados na medição de tensões, dando destaque a métodos holográficos e principalmente aos métodos associados à interferometria de speckle, os quais servem de base para a metodologia ESPI empregada para a realização das medições. A escolha da metodologia ESPI se deu tanto por ser uma técnica não destrutiva que permite o levantamento de mapas de tensões e deformações para a superfície inteira, de aplicação rápida e simples, quanto por ser um método ainda muito pouco explorado em aplicações industriais.

Após a revisão da literatura foi feito um levantamento de possíveis parâmetros de influência na realização dos experimentos. Por se tratar de um trabalho em que a aplicação do método ESPI se dá em um objeto e condição de ensaio ainda não contemplado pela literatura, essa etapa do projeto tem importância ainda maior. Dessa forma, as variáveis julgadas importantes para a realização desse trabalho foram encontradas através de uma extensa pesquisa na literatura das mais variadas aplicações de medições de tensão via ESPI, combinada com problemas específicos de medições convencionais de tensão em bielas e com alguns testes realizados com o equipamento. No fim chegou-se a um universo grande de parâmetros que poderiam ter influência sobre os ensaios. Após análise, os fatores principais foram usados na realização de um planejamento de experimentos.

Para a realização do planejamento experimental, após algumas considerações sobre a importância das variáveis levantadas e peculiaridades das mesmas restaram quatro variáveis de controle além de uma fonte de ruído para formar o planejamento experimental. Após uma breve revisão sobre os planejamentos possíveis para o caso sob análise, decidiu-se utilizar um planejamento fatorial completo. A grande vantagem do planejamento completo

é a maior facilidade de identificação dos efeitos de cada variável sobre o experimento (em relação à um planejamento fatorial parcial), acompanhada da desvantagem de demandar um número grande de experimentos. O planejamento gerou um conjunto de 32 ensaios (cinco fatores com dois níveis cada), sendo que essa rotina foi repetida duas vezes. No total foram realizados 64 ensaios, o que a princípio parece ser um número grande de experimentos. No entanto, uma das grandes vantagens da técnica ESPI é a rapidez e facilidade de realização dos experimentos uma vez que o equipamento foi corretamente configurado. Assim, a realização de 64 ensaios não foi um parâmetro impeditivo e levou à confirmação do planejamento fatorial completo como a escolha correta .

Após a realização dos experimentos sugeridos pelo DoE, foi feito um tratamento dos dados para a verificação tanto da influência de cada uma das variáveis levantadas nos resultados obtidos, quanto do próprio planejamento. Inicialmente foram estudados os efeitos associados a cada uma das variáveis de controle, verificando quais delas exerciam maior influência nos resultados. Em seguida foi feita uma análise mais robusta dos dados utilizando ANOVA. Em seguida foi feita uma análise do planejamento de Taguchi visando encontrar a configuração dos níveis das variáveis de controle que levariam à melhor configuração que minimizaria a variabilidade dos resultados. Como essa análise produziu resultados que davam margem a diferentes escolhas (uma buscando a menor variabilidade dos experimentos e outra visando obter valores mais próximos da média esperada), decidiu-se realizar um segundo estudo, dessa vez utilizando-se de uma otimização de níveis através de um método conhecido como *desirability*. A aplicação dessa metodologia deixou claro que a melhor escolha seria a mesma que a sugerida por Taguchi para a menor variabilidade das amostras, como era de se esperar.

Escolhida essa configuração, foi realizado um ensaio para a obtenção dos mapas de tensão para a superfície da biela, que foram comparados com mapas de tensão obtidos por meio de simulações em elementos finitos. Essa comparação dos mapas de tensão mostrou pequenas variações entre o que foi medido e o resultado da simulação.

Para fazer uma determinação mais criteriosa da correlação dos resultados, traçou-se um perfil de tensão sobre o mapa ao longo do comprimento da biela, o que permitiu chegar a um valor médio de tensão para a alma da biela. Esse valor foi então comparado com os

esperados e mostrou um erro menor que 10 % em todos os casos de carregamento. Quando comparado com modelo mais completo do conjunto biela fixador a correlação foi ainda maior, mostrando discrepâncias menores que 6 %.

Considerando correlação dos mapas de tensão, i.e. as pequenas diferenças entre as tensões medidas e simuladas, conclui-se que o objetivo desta dissertação foi atingido, que é “desenvolver uma metodologia de medição de tensão em bielas em ensaios estáticos utilizando a técnica ESPI”. Os resultados obtidos comprovam que a metodologia é adequada e pode ser utilizada.

## 5.1 Trabalhos futuros

Como já citado no capítulo 4, para um trabalho futuro fica a possibilidade da medição de tensões aplicando níveis maiores de carga. Nesse trabalho as baixas cargas aplicadas (entre 10 kN e 30 kN) resultaram em níveis baixos de tensão. Durante a vida útil de uma biela, essa é submetida a carregamentos maiores que geram campos de tensão de maior intensidade, o que justifica o interesse em níveis maiores de carregamento. Para tanto é importante fazer um estudo mais detalhado da técnica de aquisição dos padrões de speckles em etapas, o que seria o próximo passo natural do trabalho.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORNE, M.; WOLF, E. **Principles of Optics**, 5th Ed. Oxford: Pergamon Press, 1975.

BIEDERMANN K.; EK L. A recording and display system for hologram interferometry with low resolution imaging devices. **Journal of Physics. Sci. Instrum.** 8. 571p., 1975.

BURCH, J. M. Interferometry with scattered light. In **Optical Instruments and Techniques**, Ed. J. H. Dickson, pp. 213-29. Newcastle-Upon-Tyne: Oriel Press, 1970.

BUTTERS, J. N.; 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 utilization du comparateur photoelectrique et interferential du Bureau International des Poids et Mesures. **Metrologia**, v.2, (1), pp.13-23, 1966.

CHA, S.; VEST, C. M. Interferometry and reconstruction of strongly refracting asymmetric refractive index fields. **Optics Letters**, Vol. 4, pp. 311-313, 1979.

CLOUD, G. **Optical Methods of Engineering Analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, 503p.

COLEMAN, D. E.; MONTGOMERY, D. C. A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment. **Technometrics**, Vol. 35, pp 1-27, 1993.

CREATH, K. *Phase measurement techniques for nondestructive testing*. In Proceedings: Hologram Interferometry and Speckle Metrology. Bethel, CT: Society for Experimental Mechanics, 1990.

DÍAZ, F. V.; KAUFMANN, G. H.; GALIZZI, G. E. Determination of residual stresses using hole drilling and digital speckle pattern interferometry with automated data analysis. **Laser in Engineering**, 33(1), 39–48, 2000.

DERRINGER, G. AND SUICH, R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. **Journal of Quality Technology**, v. 12, n. 4, out. 1980.

ENNOS, A. E. Speckle Interferometry. In *Laser Speckle and Related Phenomena*, **Topics in Applied Physics**, Vol. 9, Ed. J. C. Dainty, Ch. 2. Berlin and New York: Springer-Verlag, 1975.

FAN, H.; WANG, J.; TAN, Y. Simultaneous Measurement of Whole In-plane Displacement Using Phase-shifting ESPI. **Optics and Laser in Engineering**, vol.28, pp. 249-257, 1997.

GARBOR, D. **Proc. Roy. Soc.**, A197, 454-87, 1949

GARBUNY, E. G.; AND FILON, M. A. **Optical Physics**. New York: Academic Press, 1965.

GOODMAN, J. W. Some Fundamental Properties os Speckle. **Journal Optical Society of America**, 66, 11: 1145-50, 1976.

GOODMAN, J. W. Statistical Properties of Laser Speckle Patterns. In *Laser Speckle and Related Phenomena*, **Topics in Applied Physics**, Vol. 9, Ed. J. C. Dainty, Ch. 2. Berlin and New York: Springer-Verlag, 1975.

HANSEN, R. S. A compact ESPI system for displacement measurements of specular reflecting or optical rough surfaces. **Optics and Lasers in Engineering**, 41, 73–80, 2004.

HARIHARAN, P. **Optical Holography** – Principles, Techniques and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 1991, 319p.

JONES, R., WYKES, C. **Holographic and Speckle Interferometry**. Cambridge: Cambridge University Press, 1989, 353p.

KENNEDY, D. M.; SCHAUPERL, Z.; GREENE, S.; MIHAYLOVA, E. Application of ESPI-method for strain analysis in thin wall cylinders, **Optics and Lasers in Engineering**, 41, p. 927, 585-594, 2004.

LABBÉ, F. Strain-rate measurements by electronic speckle-pattern interferometry (ESPI). **Optics and Lasers in Engineering**, 45, 827–833, 2007.

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.

MARTINÉZ, A.; RODRÍGUEZ-VERA, R.; RAYAS, J. A.; PUGA, H. J. Fracture detection by grating moiré and in-plane ESPI techniques. **Optics and Lasers in Engineering**, 39, 525-536, 2003.

MARTINÉZ, A.; RAYAS, J. A.; CORDERO, R.; GENOVESE, K. Analysis of optical configurations for ESPI. **Optics and Lasers in Engineering**, 46, 48-54, 2008.



MATSUSAKI, E. H. **Metodologia para medição de tensões em virabrequins utilizando ESPI**. 2009. 132p. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 6ed. New York: J. Wiley, 2005, 643p.

MOORE, A. J.; TYRER, J. R. Two-dimensional Strain Measurement with ESPI, **Optics and Lasers in Engineering**, v.24, (5), pp.381-402, 1995.

MOORE, A. J.; TYRER, J. R. An electronic speckle pattern interferometer for complete in-plane displacement measurement. **Meas. Sci. Technol.** **1** (1990) 1024-1030.

SWEENEY, D. W.; VEST, C. M. Reconstruction of three-dimensional refractive index fields from multidirectional interferometric data. **Applied Optics**, v.12, pp. 2694-2764, 1973

VEST, C. M. **Holographic Interferometry**. New York: John Wiley and Sons, 1979.

VIAL-EDWARDS, C.; LIRA, I.; MARTINEZ, A.; MUNZENMAYER, M. Electronic Speckle Pattern Interferometry Analysis of Tensile Tests of Semihard Copper Sheets. **Experimental Mechanics**, v.41, (1), pp. 58-62, 2001.

STETSON, K. A. Holographic strain analysis by fringe localization planes. **Journal of the Optical Society of America**, vol. 66, pp. 627, 1976.

WYANT, J. C. Interferometric optical metrology, basic systems and principles. **Laser Focus**, pp.65-71, May 1982.

## Apêndice

### A.1 – Descrição do deslocamento de pequenas superfícies.

Nessa sessão é feito um resumo da utilização da notação tensorial na análise matemática dos deslocamentos de uma superfície. Essa notação é usada para descrever mudanças de orientação e forma que possam ocorrer como resultado de uma aplicação de força. Essa descrição adotada é baseada nas abordagens utilizadas comumente em textos que tratam de elasticidade e análises de tensores, tais como Sokolnikoff (1956) e Nye (1957).

A abordagem utilizando tensores e a descrição por notação indicial traz dois benefícios básicos às abordagens de interferometria, tanto holográfica quanto de speckles. A primeira vantagem é a possibilidade de descrever deslocamentos complexos com expressões mais resumidas e a segunda razão é que a mesma notação pode ser utilizada para descrever os parâmetros associados ao espaçamento e localização de franjas.

Inicialmente considera-se um elemento RS linear na superfície de um objeto, como se vê na Figura A.1. Após o objeto sofrer uma determinada deformação o elemento RS assume agora a posição R'S', sofrendo um deslocamento de posição, orientação e comprimento.

A posição do ponto R é dada pelo vetor  $\mathbf{r}$ , enquanto o ponto S tem sua posição descrita por  $\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}$ . O ponto R' por sua vez tem é descrito por  $\mathbf{r} + \mathbf{d}$  e por fim o ponto S' é dado por  $\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r} + \mathbf{d} + \Delta\mathbf{d}$ . Sendo assim o deslocamento de S pode ser descrito pela Equação A.1.

$$L = \mathbf{d} + \Delta\mathbf{d} \tag{A.1}$$

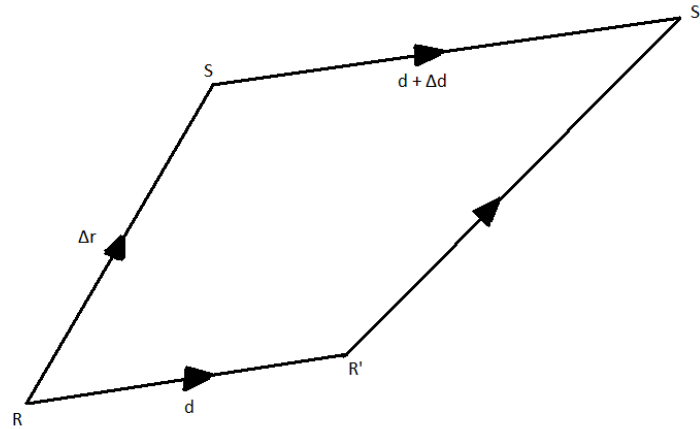


Figura A.1 – Elemento linear RS deslocado par R'S'.

Quando se trata de uma translação de corpo rígido todos os pontos no corpo terão seu deslocamento descrito por  $\mathbf{L} = \mathbf{d}$ , ou seja, em todos os pontos  $\Delta \mathbf{d} = \mathbf{0}$ . No entanto, quando se tem rotação e/ou deformação  $\Delta \mathbf{d}$  passa a ser diferente de zero. Quando isso ocorre, o termo  $\mathbf{L}$  na Equação A.1 mostra o deslocamento como sendo a soma de uma translação de corpo rígido mais um termo descrevendo a rotação e a deformação do corpo. Utilizando uma expansão de Taylor, o termo  $\Delta \mathbf{d}$  é descrito pela Equação A.2.

$$\Delta \mathbf{d} = \mathbf{d}(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}) - \mathbf{d}(\mathbf{r}) = \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial x_3} \Delta x_3 + \dots \quad (\text{A.2})$$

Na Equação A.2,  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  representam os eixos ortogonais do sistema de coordenadas utilizado, e  $\Delta x_1$ ,  $\Delta x_2$  e  $\Delta x_3$  são componentes de  $\Delta \mathbf{d}$  nas respectivas direções. Se o elemento linear é pequeno, os componentes de ordem maiores podem ser desprezados. As equações A.3, A.4 e A.5 fornecem as componentes de  $\Delta d$  nas três direções.

$$\Delta d_1 = \frac{\partial d_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial d_1}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial d_1}{\partial x_3} \Delta x_3 \quad (\text{A.3})$$

$$\Delta d_2 = \frac{\partial d_2}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial d_2}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial d_2}{\partial x_3} \Delta x_3 \quad (A.4)$$

$$\Delta d_3 = \frac{\partial d_3}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial d_3}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial d_3}{\partial x_3} \Delta x_3 \quad (A.5)$$

Nas equações A.3, A.4 e A.5, os termos  $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$  são componentes do vetor  $\mathbf{d}$ . Pode-se simplificar essas três equações em uma única utilizando-nos de notação indicial, como mostrado na Equação A.6.

$$\Delta d_i = \sum_j \frac{\partial d_i}{\partial x_j} \Delta x_j \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (A.6)$$

Os termos  $\partial d_i / \partial x_j$  representam componentes de um tensor de rank 2. Nesse contexto o uso de tensores ajuda na representação dos gradientes de deslocamento que surgem a partir da deformação do objeto. Para melhor entender o significado físico de cada componente do tensor, pode se observar a Figura A.2, na qual temos um elemento linear em uma superfície bidimensional, onde o elemento é inicialmente paralelo ao eixo  $x_1$ . O vetor  $\Delta \mathbf{r}$  nesse caso possui componentes apenas na direção  $x_1$ , o que torna  $\Delta x_2$  e  $\Delta x_3$  iguais a zero. As componentes de  $\Delta \mathbf{d}$  são dadas pelas equações A.7 e A.8.

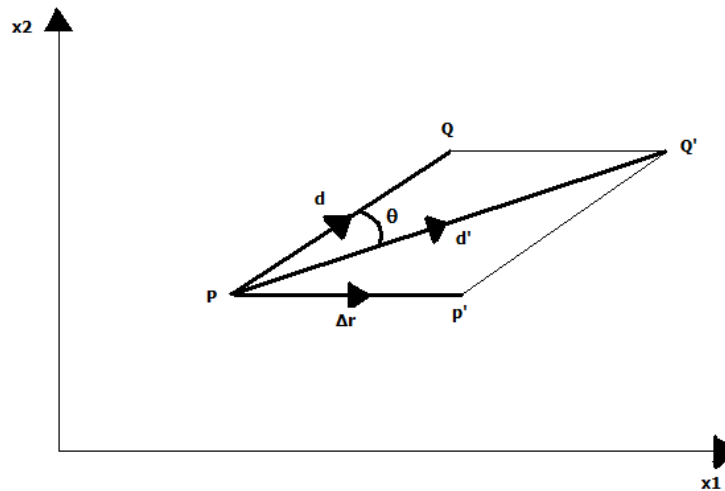


Figura A.2 – Elemento bidimensional PQ e seu deslocamento

$$\Delta d_1 = \frac{\partial d_1}{\partial x_1} \Delta x_1 \quad (A.7)$$

$$\Delta d_2 = \frac{\partial d_2}{\partial x_1} \Delta x_1 \quad (A.8)$$

Pela Figura A.2 se vê também que além de ter aumentado de comprimento, o elemento PQ sofreu uma rotação de um ângulo  $\theta$ . Esse ângulo pode ser determinado com o auxílio da Equação A.9.

$$\tan \theta = \frac{\Delta d_2}{\Delta x_1 + \Delta d_1} \cong \frac{\Delta d_2}{\Delta x_1} \quad (A.9)$$

Essa aproximação é válida sempre que  $\Delta d_1 \ll \Delta x_1$ , o que ocorre no caso de deformações sendo observadas por métodos holográficos e de speckles. Têm-se então:

$$\lim_{\Delta x_1 \rightarrow 0} \frac{\Delta d_2}{\Delta x_1} = \frac{\partial d_2}{\partial x_1} = \theta \quad (A.10)$$

Da mesma forma, se o elemento PQ situado sobre o eixo  $x_1$  é deformado de forma que ele tenha componentes não nulas nas direções  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , os elementos  $\partial d_2/\partial x_1$  e  $\partial d_3/\partial x_1$  representam os ângulos entre os componentes da linha de deslocamento e os eixos  $x_2$  e  $x_3$  respectivamente.

Por fim, mostra-se que o tensor do gradiente de deformação pode ser separado em dois tensores que separam a rotação da deformação. Para tanto considera-se a forma que um tensor gradiente de deformação assume quando o objeto sofre uma pequena rotação. Dois elementos lineares  $PQ_1$  e  $PQ_2$  que tem o mesmo comprimento são utilizados, sendo  $PQ_1$  paralelo ao eixo  $x_1$  e  $PQ_2$  paralelo ao eixo  $x_2$ . Ambos os elementos são então rotacionados de um ângulo pequeno  $\theta$ . As componentes de deformação do elemento  $PQ_1$  são dadas pelas equações A.11 e A.12.

$$\Delta d_1^{x_1} = \frac{\partial d_1}{\partial x_1} \Delta x_1 \quad (\text{A. 11})$$

$$\Delta d_2^{x_1} = \frac{\partial d_2}{\partial x_1} \Delta x_1 = \theta \Delta x_1 \quad (\text{A. 12})$$

Quando o ângulo de rotação  $\theta$  é muito pequeno, mostra-se que  $\Delta d_1^{x_1} \ll \Delta d_2^{x_1}$ , o que implica que  $\partial d_1 / \partial x_1 \cong 0$ . Para a deformação induzida no elemento PQ<sub>2</sub>:

$$\Delta d_1^{x_2} = \frac{\partial d_1}{\partial x_2} \Delta x_2 = \theta \Delta x_2 \quad (\text{A. 13})$$

$$\Delta d_2^{x_2} = \frac{\partial d_2}{\partial x_2} \Delta x_2 \approx 0 \quad (\text{A. 14})$$

Ainda  $\Delta d_1^{x_2} = -\Delta d_2^{x_1}$ , de onde:

$$\frac{\partial d_1}{\partial x_2} = \frac{-\partial d_2}{\partial x_1} \quad (\text{A. 15})$$

Além disso, como os ângulos de rotação são pequenos, os componentes do tensor de gradiente de deformação respeitam a condição mostrada na Equação A.16.

$$\frac{\partial d_i}{\partial x_j} = \frac{-\partial d_j}{\partial x_i} \quad i, j = 1, 2 \quad (\text{A. 15})$$

Por fim, o gradiente de deformação dado pela Equação A.6 representa tanto rotação quanto deformação do corpo. Os termos dessa Equação podem ser escritos como visto na Equação A.16.

$$\frac{\partial d_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial d_1}{\partial x_j} + \frac{\partial d_j}{\partial x_1} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial d_i}{\partial x_j} - \frac{\partial d_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{A. 16})$$

## Apêndice B

### B.1 – Perda de correlação em padrões de speckle

O grande interesse no estudo da perda de correlação em padrões de speckle reside na verificação da validade de uma medição. Quando um padrão passa de determinados limites óticos ele acaba por perder correlação, o que o torna uma informação errada sobre o que se está medindo.

Um padrão de speckles é basicamente uma assinatura de um elemento de superfície microscópico de uma determinada região do objeto sendo iluminado. Quando o objeto se move, os speckles não se modificam individualmente. Na realidade, os speckles dentro do padrão se movimentam acompanhando o movimento da superfície para uma nova posição correspondente à nova posição da superfície. Os métodos de medição que envolvem o uso de speckles consistem basicamente da gravação de dois padrões em momentos diferentes de um objeto para em seguida ser feita uma combinação dessas imagens gerando informações a cerca dos deslocamentos sofridos por essa superfície entre ambos os momentos. Para tanto, é necessário que os padrões correspondentes aos diferentes momentos mantenham uma correspondência entre si, ou seja, eles devem ser capazes de se sobrepor com um pequeno deslocamento. A perda de correlação ocorre quando os speckles se movem tanto que os padrões não mais podem ser sobrepostos.

A implicação prática disso é que os métodos de speckle possuem um limite de deslocamento do objeto entre medições para os quais eles se mantêm confiáveis. Se o objeto se desloca mais do que o limite do interferômetro em uso, a informação recuperada não será correspondente ao deslocamento real sofrido. Além disso, movimentos indesejáveis do objeto durante a medição podem levar o padrão a ultrapassar seus limites e fazer com que a informação do deslocamento intencionalmente induzido seja perdida.

A perda de correlação pode acontecer por dois diferentes motivos: perda de correlação de fase, ou perda de memória. Para o primeiro deles, toma-se como exemplo um interferômetro com sensibilidade para medições bidimensionais apenas (medições no plano da superfície do objeto), e que vai ser utilizado para medir deformações na superfície de um corpo que sofre um carregamento que gera tanto deslocamentos no plano da superfície do mesmo quanto uma pequena rotação em torno de um dos eixos do plano da superfície. Essa rotação não é possível de ser medida pelo interferômetro pois esse não possui sensibilidade fora do plano paralelo a seu captor. Essa rotação pode causar mudanças de fase nos speckles suficientes para reduzir o contraste das franjas que indicam deformação no plano da superfície. Dependendo da intensidade da redução de contraste (nesse caso associada à variação de fase imposta pela rotação) há uma perda de correlação devido à rotação nesse caso. Em geral, uma variação de fase da ordem de  $2\pi$  de borda a borda de um determinado speckle é suficiente para causar a perda de correlação no padrão obtido.

Já a perda de memória é um fenômeno associado à impossibilidade de sobreposição de dois padrões de speckles. Em geral, o máximo deslocamento possível para um único speckle é da ordem de uma fração do diâmetro do mesmo. Quando detectores eletrônicos são utilizados têm-se como o máximo deslocamento permitido uma fração do tamanho de cada unidade de detecção. Se o deslocamento for grande o suficiente para deslocar um speckle completamente para outra unidade de detecção diferente, então o detector perdeu a memória do speckle que contém as informações do deslocamento sofrido. A perda de memória do detector está associada à perda de correlação no elemento de detecção correspondente.

Resumimos, então, um critério para a verificação da existência da perda de correlação:

- Quando a fase ao longo de um elemento de resolução varia de  $2\pi$  ou mais, o speckle correspondente irá perder totalmente sua correlação em fase.
- Quando o elemento de resolução se move aproximadamente um diâmetro de speckle, tem-se uma perda de correlação por perda de memória. Para detectores eletrônicos, quando o speckle se move para fora do elemento de detecção, o detector irá perder sua memória da informação carregada pelos speckles.



- Como uma regra pratica pode-se dizer que se a mudança de fase e a perda de memória são menores que um décimo dos correspondentes valores críticos calculados pelos passos acima, o speckle não tem perda de correlação em fase nem em perda de memória.