

**Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial**

**Desenvolvimento de uma Roseta
Óptica para Medição de Tensões e
Deformações utilizando Holografia
Eletrônica**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para
obtenção do Grau de Mestre em Metrologia

Daniel Pedro Willemann

Florianópolis, 15 de março de 2002.

Desenvolvimento de uma Roseta Óptica para a medição de Tensões e Deformações utilizando a Holografia Eletrônica

Daniel Pedro Willemann

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de
MESTRE EM METROLOGIA
e aprovada na sua forma final pelo
Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.

Orientador



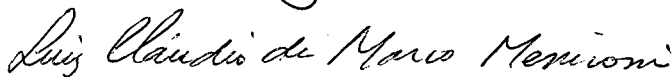
Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.

Coordenador do Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

Banca Examinadora:



Prof. André Roberto de Souza, Dr. Eng.



Eng. Luís Cláudio de Marco Meniconi, Ph. D.



Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.

Resumo

O conhecimento do estado de tensões que se desenvolve localmente em componentes e estruturas mecânicas nas condições de serviço é de grande importância para assegurar níveis satisfatórios de confiabilidade e resistência. A caracterização do estado de tensões em regiões localizadas é tipicamente realizada por rosetas extensométricas, isto é, um conjunto de três extensômetros de resistência previamente alinhados e posicionados. A instalação de uma roseta é trabalhosa: envolve a limpeza e preparação da superfície, o posicionamento e colagem do extensômetro, sua ligação elétrica e a aquisição ou registro do sinal.

O novo tipo de interferômetro, o interferômetro radial, permite a medição de deformações e tensões com holografia eletrônica a partir de uma única condição de iluminação. Esta nova configuração permitiu a construção de um medidor compacto capaz de caracterizar o estado de tensões de um ponto. Citam-se como vantagens do novo dispositivo a sensível redução no tempo de instalação e a simplicidade operacional. Embora existam no mercado outros sistemas compactos para medição de tensões com holografia eletrônica, estes envolvem a combinação de várias condições de iluminação diferentes e, por isto, são mais complexos e caros.

Este trabalho materializa um novo tipo de sistema que usa o interferômetro radial para a medição de um campo de tensões de maneira análoga a uma roseta extensométrica. Nele, são descritos as diretrizes de projeto e os detalhes construtivos do primeiro protótipo da Roseta Óptica. O modelo matemático para a determinação da intensidade e orientação das tensões principais é também apresentado. Por fim, os resultados das primeiras medições realizadas são discutidos, seguidos de algumas sugestões de melhoria para a construção de um segundo protótipo do medidor.

Abstract

The knowledge of stress state that is locally developed in mechanical components and structures in work conditions is of great importance to keep satisfactory levels of reliability and adequate fatigue resistance. Stress state determination in specific places is typically accomplished by Strain Gages, i.e., a group of three resistance gages previously positioned on the structure. Strain gage installation is really hard: it involves cleaning and preparing surface, positioning and gluing strain gage, electrical installation and acquisition and recording signal.

This work shows the application of a new kind of interferometer, a radial interferometer, to measure strains and stresses with electronic holography from a single illumination condition.

There are similar interferometers in the market, but they are more expensive and complex.

This new configuration makes it possible to build a compact measurement unit, capable to characterize a stress state as well as an extensometric rosette. The advantages of this device are the significant installation time reduction, operational simplicity and the possibility to measure the mean in-plane strain and stress.

This work presents the steps for construction, the results obtained and the mathematical model. This first prototype is called Optical Rosette.

Some suggestions for developing the second prototype are also given.

*Dedico este trabalho
ao querido avô **Ataide Manoel Pedro**,
este senhor, que, durante todos os momentos
em que esteve conosco, dedicou-se à nossa família e
nos deixou a honestidade e a sinceridade como heranças.
Obrigado por tudo ...*

Agradecimentos

Expresso meus sinceros agradecimentos:

- aos meus pais, Guilherme e Teresinha, que sempre acreditaram em mim e que muitas vezes renunciaram aos seus sonhos para que os meus se tornassem realidade;
- à minha avó, Maria, pelo carinho e pela energia enviada nas orações;
- à minha noiva, Karina, pelo amor e incentivo nos momentos difíceis;
- em especial, ao Professor Armando Albertazzi, pelo apoio, dedicação, incentivo, amizade e, acima de tudo, pela excelente orientação;
- ao Professor Cavaco, pelo incentivo e aprendizado;
- ao Professor André e ao Engenheiro Luís Meniconi, pela disponibilidade em avaliar este trabalho e pelas importantes contribuições;
- ao Tio Beto e à Tia Graça, pela amizade, pelos auxílios e pelas palavras pronunciadas nos momentos mais difíceis;
- ao Tio Iran, pela grande amizade e incentivo;
- ao meu irmão David e aos amigos Pablo, Marco, Newtinho, Guilherme, Licélio e Bruninho, pelo incentivo, grande amizade e pelos ótimos momentos vividos;
- aos amigos José Ricardo, Miltinho, Kanda, Dal Pont e Danilo, que unidos pelo mesmo objetivo, apoiaram e tornaram possível a realização deste trabalho;
- ao amigo Celso Veiga pelos constantes esclarecimentos;
- ao casal Analucia e Pezzotta, pela amizade, correções, explicações e sugestões para o trabalho;

- à Rosana, pela amizade, companheirismo e dedicação durante todos esses anos;
- aos amigos Fred, Cesare e Max pelo grande auxílio, incentivo e grande amizade;
- aos estagiários do LABMETRO, Rodrigo Prudêncio, Felipe Segatto, Fábio Kato, Poletto, Allan Piercing e Provin, pela amizade, competência e disposição com que desempenharam seus trabalhos;
- à CAPES, pelo financiamento e incentivo ao Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial;
- ao LABMETRO pela excelente infra-estrutura disponibilizada;
- a todas as pessoas que participaram deste processo, mas que a minha memória não recorda neste momento.

Sumário

Resumo	iii
Abstract	iv
Sumário	viii
Lista de Figuras	xi

Capítulo 1

Introdução	14
-------------------	-----------

Capítulo 2

Medição de Tensões	16
2.1 Por que medir tensões?.....	16
2.2 Conceitos de Deslocamento, Deformação e Tensão.....	16
2.2.1 Relações Tensão-Deformação para materiais isotrópicos	20
2.2.2 Principais Métodos de Medição de Tensões	23
2.2.3 Principais sistemas ópticos disponíveis comercialmente para medição de tensões e deformações.....	29

Capítulo 3

Holografia Eletrônica	32
3.1 Princípios da Holografia Eletrônica	32
3.1.1 Formação do <i>speckle</i>	32
3.1.2 Interferência e diferença de fase	33
3.2 Medição de Deslocamentos	35
3.2.1 Deslocamento de Fase (<i>Phase shifting</i>)	39
3.2.2 Remoção do Salto de Fase (<i>Phase Unwrapping</i>)	40
3.3 O Interferômetro Radial	42
3.4 Medição de Tensões Médias com o Interferômetro Radial	44

Capítulo 4

A Roseta Óptica	49
4.1 Subsistemas da Roseta Óptica	51
4.1.1 Subsistema de Iluminação (SI)	52
4.1.2 Subsistema de Visualização de Imagens (SVI)	57
4.1.3 Subsistema de Deslocamento de Fase (SDF)	58
4.1.4 Subsistema de Fixação e Posicionamento (SFP)	59
4.1.5 Alinhamento dos componentes internos	63
4.1.6 Interface de Alimentação e Controle (IAC)	63
4.1.7 A Interface do Software de Medição	66

Capítulo 5

Experimentos Realizados e Resultados Obtidos	74
5.1 Ensaios utilizando-se o Interferômetro de Michelson	74
5.2 Ensaios realizados em uma Máquina de Tração	81
5.3 Ensaio realizado em campo	91

Capítulo 6

Conclusões 93

Referências Bibliográficas 97

Anexo A

Equacionamento dos espelhos cônicos 103

Anexo B

Exemplo de Relatório de Medição emitido pelo Software 109

Anexo C

Leituras obtidas dos extensômetros no ensaio com a máquina de tração 112

Anexo D

Comparação Técnico-econômica 114

Lista de Figuras

Figura 2.1	a) Deformação específica normal média b) Deformação específica cisalhante (ou tangencial)	17
Figura 2.2	Coefficiente de Poisson	18
Figura 2.3	Tensões no plano inclinado de uma barra tracionada	19
Figura 2.4	Elemento sujeito a tensões planas	21
Figura 2.5	Círculo de Mohr para tensões planas.....	22
Figura 3.1	Luz espalhada de forma difusa ao incidir sobre uma superfície rugosa	33
Figura 3.2	Padrão de <i>speckle</i> de uma superfície rugosa iluminada pelo laser.....	33
Figura 3.3	Possíveis casos de interferência	34
Figura 3.4	Franjas de Interferência.....	35
Figura 3.5	Arranjo holográfico com iluminação simples.....	36
Figura 3.6	Configuração de dupla iluminação.....	37
Figura 3.7	Mapa de fase indicando o início da franja de ordem 0 (zero)	40
Figura 3.8	Fase calculada antes da remoção do salto de fase	41
Figura 3.9	Fase calculada após a remoção dos saltos de fase.....	41
Figura 3.10	Interferômetro Radial.....	42
Figura 3.11	Mapas da diferença de fases típicos do Interferômetro Radial.....	43
Figura 3.12	Relações entre tensões e deformações no estado plano de tensões e interpretação do deslocamento radial.....	45
Figura 4.1	Subsistemas da Roseta Óptica.....	51
Figura 4.2	Subsistema de Iluminação	53
Figura 4.3	Dados de entrada para o cálculo das dimensões dos espelhos cônicos ...	54
Figura 4.4	Dimensões dos espelhos cônicos	55

Figura 4.5	Caminho óptico do feixe de laser	55
Figura 4.6	Subsistema de Iluminação 3D	56
Figura 4.7	Subsistema de Visualização.....	58
Figura 4.8	Subsistema de deslocamento de fase.....	58
Figura 4.9	Subsistema de deslocamento de fase sendo integrado ao soquete.....	59
Figura 4.10	Subsistema de fixação e posicionamento	60
Figura 4.11	Unhas de Fixação e Porcas de Travamento.....	61
Figura 4.12	Câmera CCD, anel suporte e parafusos de ajuste.....	62
Figura 4.13	Carcaça do laser diodo.....	62
Figura 4.14	Espelho plano furado e suporte 45°.....	63
Figura 4.15	Relações da interface de alimentação e controle	64
Figura 4.16	Laptop e caixa da Interface de Alimentação e Controle	66
Figura 4.17	Funções do software de medição.....	67
Figura 4.18	Tela de configuração das propriedades do material em estudo	68
Figura 4.19	Tela de configuração da região de amostragem	68
Figura 4.20	Tela de processamento	72
Figura 4.21	Imagem do ensaio de tração sem franjas de corpo rígido.....	73
Figura 5.1	Interferômetro de Michelson.....	75
Figura 5.2	Interferômetro de Michelson Modificado	77
Figura 5.3	Detalhe do interferômetro de Michelson modificado, mostrando os espelhos inclinados, o atuador piezoelétrico e a plataforma branca de medição	79
Figura 5.4	Roseta Óptica posicionada sobre a plataforma de cor branca do interferômetro de Michelson modificado.....	79
Figura 5.5	Franjas de corpo rígido originadas no interferômetro de Michelson.....	80
Figura 5.6	Corpo de prova de tração e disposição dos extensômetros	81
Figura 5.7	Roseta Óptica preparada para o ensaio de tração.....	82
Figura 5.8	Seqüência de imagens adquiridas no decorrer do carregamento.....	84
Figura 5.9	Passo 05 da Figura 5.8 sem a remoção das franjas de corpo rígido.....	85
Figura 5.10	Gráfico de correlação entre os resultados obtidos no ensaio n. 1.....	87
Figura 5.11	Gráfico comparativo dos resultados da máquina de tração	88

Figura 5.12 Gráfico de correlação para a correção dos resultados obtidos pela Roseta Óptica	89
Figura 5.13 Roseta Óptica instalada sobre o feixe de molas da pick-up.....	92
Figura 5.14 Laptop e driver de controle ao lado da pick-up	92
Figura 5.15 Resultado do ensaio na pick-up	92
Figura D.1 Comparação entre os custos com Extensometria e os custos com a Roseta Óptica ao longo do tempo.....	117

Capítulo 1

Introdução

A medição de tensões e deformações tem sido objeto de grande atenção há muito tempo, tanto no meio científico como no meio industrial. Neste último, a importância da análise de tensões vem crescendo bastante, principalmente, no que diz respeito ao desenvolvimento de métodos de utilização facilitada e com menor custo. Estes fatores, associados à necessidade de resultados mais exatos, têm impulsionado as pesquisas nesta área.

Não há, dentre os métodos de análise de tensões hoje comercialmente disponíveis, aquele que seja perfeito. Os que apresentam níveis de incerteza mais baixos, são, em sua grande maioria, muito trabalhosos e/ou pouco adequados para medições em campo.

O método mais comum e utilizado atualmente é a extensometria por resistência elétrica. Este método, apesar de poder ser aplicado em campo com certa facilidade, apresenta tempos de medição relativamente altos por conta da necessidade de preparação das superfícies para a colagem dos extensômetros e de algumas ligações que devem ser feitas entre o sensor e a ponte amplificadora do sinal de deformação.

Desta forma, o desenvolvimento de técnicas, que sejam mais rápidas e eficientes para a quantificação dos campos de tensões e deformações, tem sido o objeto de desejo de muitos pesquisadores.

Com este entusiasmo, o Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial e a empresa PETROBRAS/CENPES, disponibilizaram, através de um projeto CTPETRO, a oportunidade de se desenvolver um novo tipo de medidor de tensões e deformações. Baseado no método óptico da Holografia Eletrônica, este medidor, único no mundo a utilizar o princípio do interferômetro radial, está sendo desenvolvido com o intuito de proporcionar menores tempos de medição e resultados mais confiáveis na medição de tensões.

Este projeto foi desenvolvido por uma equipe de engenheiros e estagiários do LABMETRO – Laboratório de Metrologia e Automatização da UFSC, ficando o autor responsável pelo projeto mecânico do medidor e pela interface do software de medição. O medidor desenvolvido foi batizado de Roseta Óptica.

Este trabalho apresenta todas as fases do projeto do primeiro protótipo da Roseta Óptica, dando maior ênfase ao projeto mecânico e funcional.

Esta dissertação se inicia com o embasamento teórico sobre tensões e deformações no segundo capítulo. São também destacados, ainda no capítulo 2, os métodos ópticos mais comuns para a medição de tensões e alguns dos medidores ópticos comercialmente disponíveis.

Os princípios básicos de Holografia Eletrônica e o equacionamento básico para a medição de tensões com o interferômetro radial, utilizados no desenvolvimento do dispositivo de medição, são abordados no terceiro capítulo.

No capítulo 4 é apresentada brevemente a metodologia de desenvolvimento aplicada ao projeto, são detalhadas as soluções implementadas e as funções de cada subsistema do dispositivo.

No quinto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados com a Roseta Óptica em laboratório e em campo.

No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões finais sobre o desenvolvimento do primeiro protótipo da Roseta Óptica. É realizada uma comparação entre os objetivos propostos no início do trabalho de dissertação e os resultados alcançados, seguidos de sugestões para o desenvolvimento do segundo protótipo do medidor.

Capítulo 2

Medição de Tensões

2.1 Por que medir tensões?

Na maioria das vezes, ao se medir tensões e deformações, têm-se como principal objetivo conhecer o nível de carregamento que atua sobre determinados elementos estruturais para verificar sua segurança nas condições de operação. Isto torna a atividade de medição de tensões e deformações imprescindível, tanto na realização de manutenções, quanto nas atividades de projeto e desenvolvimento de novos produtos. Determinadas propriedades de materiais podem também ser conhecidas através destas medições.

2.2 Conceitos de Deslocamento, Deformação e Tensão

Quando uma carga é aplicada a um componente de máquina ou um elemento estrutural, este se deforma com maior intensidade na direção do carregamento. Como consequência, pontos individuais do componente se deslocam acompanhando os esforços aplicados à estrutura. Este movimento de cada ponto, descrito em termos de um sistema de referência conveniente de eixos, é um vetor conhecido como **deslocamento**.

Em alguns casos, os deslocamentos podem existir sem que exista deformação. Nestes casos, são associados a translações e/ou rotações do corpo como um todo. Uma

vez que o tamanho ou forma do corpo não é alterado por este tipo de deslocamento, eles não têm significado na análise de tensões e deformações. Esses deslocamentos, que não alteram a forma ou o tamanho do corpo, são conhecidos como **deslocamentos de corpo rígido** [21].

Quando os deslocamentos são induzidos por uma carga aplicada (ou uma mudança de temperatura), pontos individuais do corpo movimentam-se uns em relação aos outros de tal forma que ocorre alteração da forma e/ou tamanho do corpo. A mudança em qualquer dimensão associada a uma carga aplicada (ou variação de temperatura), que induz a deslocamentos, é conhecida como uma **deformação total** (δ).

Deformação específica (ϵ), ou simplesmente deformação, é a quantidade usada para representar a intensidade da deformação de forma relativa (deformação total por unidade de comprimento).

Por exemplo, uma barra prismática sob uma carga axial (Figura 2.1a) pode ser utilizada para ilustrar a idéia de **deformação específica normal média** ϵ_{med} , conforme a Equação 2.1. Esta equação exprime a taxa de crescimento média de um segmento inicialmente unitário na direção considerada.

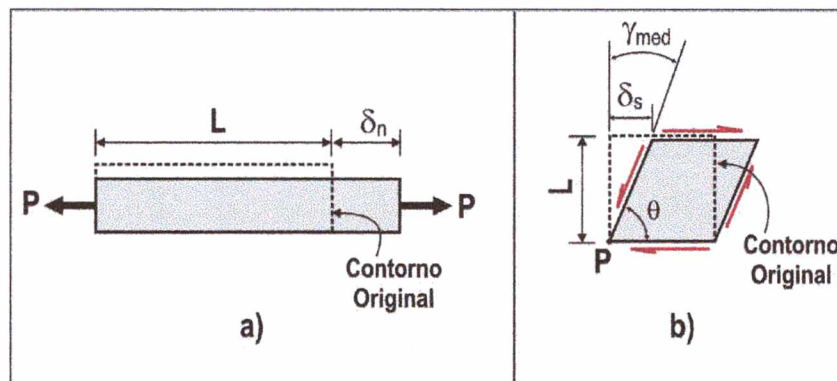


Figura 2.1 a) Deformação específica normal média b) Deformação específica cisalhante (ou tangencial)

$$\epsilon_{med} = \frac{\delta_n}{L} \tag{2.1}$$

De modo similar, a deformação envolvendo distorções nos ângulos do componente (Figura 2.1b) pode ser utilizada para ilustrar a **deformação**

específica cisalhante (ou tangencial). Para pequenas deformações, onde $\tan \gamma \approx \gamma$, tem-se:

$$\gamma_{méd.} = \frac{\delta_s}{L} \quad (2.2)$$

que corresponde à variação angular de um ângulo originariamente reto antes da deformação ser aplicada.

Ao se tracionar a barra (Figura 2.2), o alongamento axial (na direção da carga) é acompanhado por uma contração lateral, isto é, a largura da barra torna-se menor enquanto seu comprimento aumenta. Para estas condições, a relação entre as deformações lateral e axial é constante dentro da região elástica e é uma propriedade do material. Esta relação é conhecida como **Coefficiente de Poisson** ν (Equação 2.3) [22].

$$\nu = \frac{|\text{Deformação lateral}|}{|\text{Deformação axial}|} \quad (2.3)$$

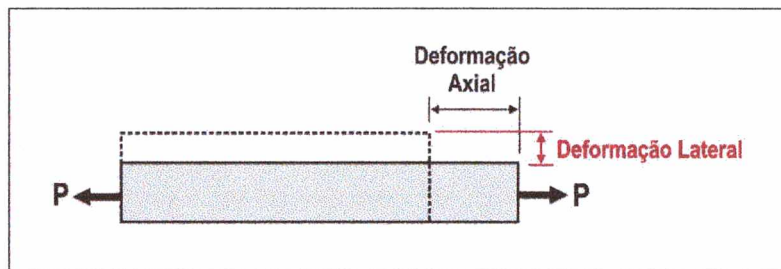


Figura 2.2 Coeficiente de Poisson

Da mesma forma que a deformação específica (deformação por unidade de comprimento), a **tensão** σ é empregada para fornecer uma medida relativa da intensidade da força interna no material (força por unidade de área).

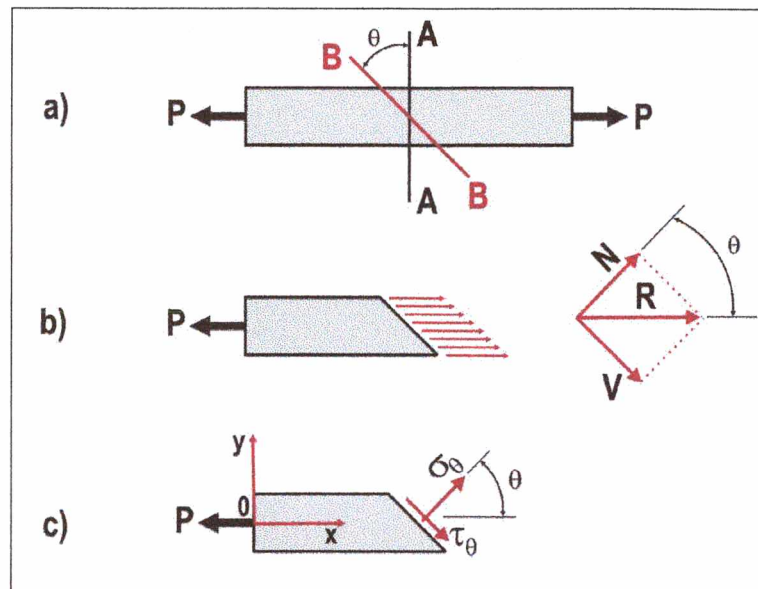


Figura 2.3 Tensões no plano inclinado de uma barra tracionada

Na Figura 2.3a, supõe-se a barra carregada nas extremidades por forças axiais P , que produzem **tração** na barra. Fazendo-se um corte imaginário (Seção AA) na barra, normal ao seu eixo, é possível isolar parte dela como corpo livre, onde as forças estão naturalmente em equilíbrio. A força P é aplicada na extremidade esquerda, aparecendo à direita as forças que traduzem a ação da parte removida sobre a parte que ficou. A força P , dividida pela área da seção reta AA , é denominada **tensão** σ [21] [23]. Supondo que a tensão seja uniformemente distribuída sobre toda a seção transversal da barra, pode-se ver facilmente que a resultante P é dada pelo produto da intensidade de σ pela área A da seção transversal da barra.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.4)$$

A Equação 2.4 é a equação para a tensão uniforme numa barra prismática. Quando a barra está sendo alongada pela força P , como na Figura 2.3a, a tensão resultante é uma tensão de **tração**. Se as forças tiverem sentido oposto, comprimindo a barra, a tensão é de **compressão**.

Considere agora as tensões agindo no plano BB , que corta a barra formando um ângulo θ com a seção transversal AA (Figura 2.3a). As forças que representam a ação do lado direito sobre o esquerdo da barra são uniformemente distribuídas sobre

a seção inclinada BB. A resultante R das forças distribuídas sobre a seção inclinada é igual a P e pode ser decomposta em duas componentes, normal (N) e tangente (V) ao plano inclinado (Figura 2.3c). Estas componentes são:

$$N = P \cdot \cos \theta \quad (2.5)$$

$$V = P \cdot \sin \theta \quad (2.6)$$

Como a área A' da seção inclinada é $A / \cos \theta$ as tensões correspondentes a N e V são:

$$\sigma_{\theta} = \frac{N}{A'} = \frac{P}{A} \cdot \cos^2 \theta = \sigma_x \cdot \cos^2 \theta \quad (2.7)$$

$$\tau_{\theta} = \frac{V}{A'} = \frac{P}{A} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta = \sigma_x \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (2.8)$$

onde $\sigma_x = P/A$ é a tensão na seção transversal normal ao eixo da barra (tensão na direção x). As tensões σ_{θ} e τ_{θ} são a tensão **normal** e de **cisalhamento**, respectivamente. O valor máximo da tensão normal σ_{θ} ocorre quando $\theta = 0$.

$$\sigma_{máx.} = \sigma_x \quad (2.9)$$

A Equação 2.8 mostra que a tensão de cisalhamento τ_{θ} é nula quando $\theta = 0$ e $\theta = \pi/2$, atingindo o valor máximo quando $\theta = \pi/4$. Este máximo é:

$$\tau_{máx.} = \frac{\sigma_x}{2} \quad (2.10)$$

2.2.1 Relações Tensão-Deformação para materiais isotrópicos

Materiais Isotrópicos são aqueles que têm as mesmas propriedades elásticas em todas as direções.

Os diagramas tensão-deformação [21] da maioria dos materiais apresentam uma região inicial de comportamento elástico e linear. Quando um material se

comporta elasticamente e apresenta também uma relação linear entre tensão e deformação, diz-se que o material é linearmente elástico.

A relação linear entre a tensão e a deformação uniaxial, como é o caso de uma barra em tração (Figura 2.3a), pode ser expressa pela Equação 2.11.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{2.11}$$

A equação acima é conhecida como **Lei de Hooke** [21] [24], onde E é uma constante de proporcionalidade conhecida como **Módulo de Elasticidade** ou **Módulo de Young**.

A Lei de Hooke pode ser estendida para o estado de tensões biaxial e triaxial. O estado biaxial de tensões é frequentemente adotado nas aplicações em engenharia, especialmente quando se analisa a superfície livre de um corpo.

Um elemento imerso em um estado biaxial de tensões pode ter tensões normais e de cisalhamento em relação aos eixos x e y (Figura 2.4). Não existe tensões em relação ao eixo z.

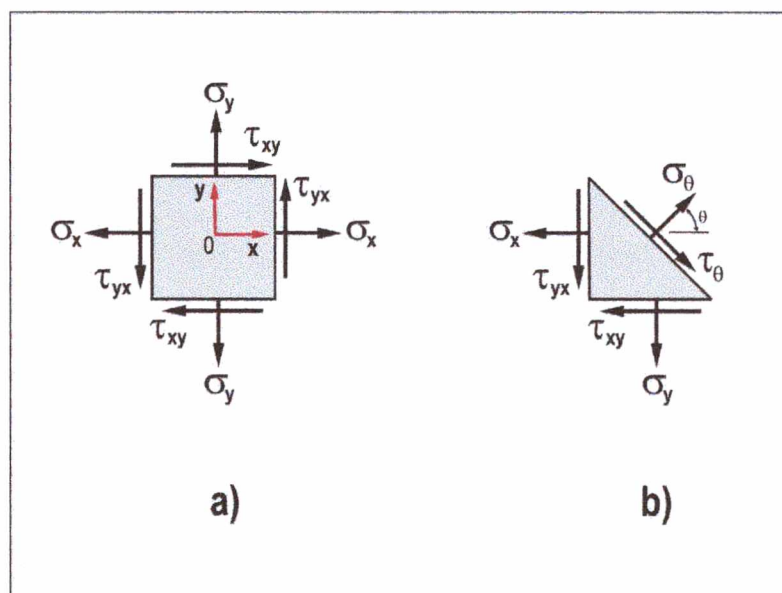


Figura 2.4 Elemento sujeito a tensões planas

Com relações trigonométricas apropriadas, chega-se a:

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta + \tau_{yx} \cdot \text{sen}2\theta \tag{2.12}$$

$$\tau_{\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\text{sen}2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (2.13)$$

Quando o ângulo θ (Figura 2.4) varia de 0 a 360°, as tensões σ_{θ} e τ_{θ} também variam. Os valores máximo e mínimo de σ_{θ} são as **tensões principais**, que podem ser calculadas através da Equação 2.14.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{yx}^2} \quad (2.14)$$

As tensões σ_1 e σ_2 indicam, respectivamente, as tensões principais máxima e mínima.

Com o intuito de facilitar o entendimento, as equações de σ_{θ} e τ_{θ} , Equações 2.12 e 2.13, também podem ser representadas graficamente por meio do Círculo de Mohr.

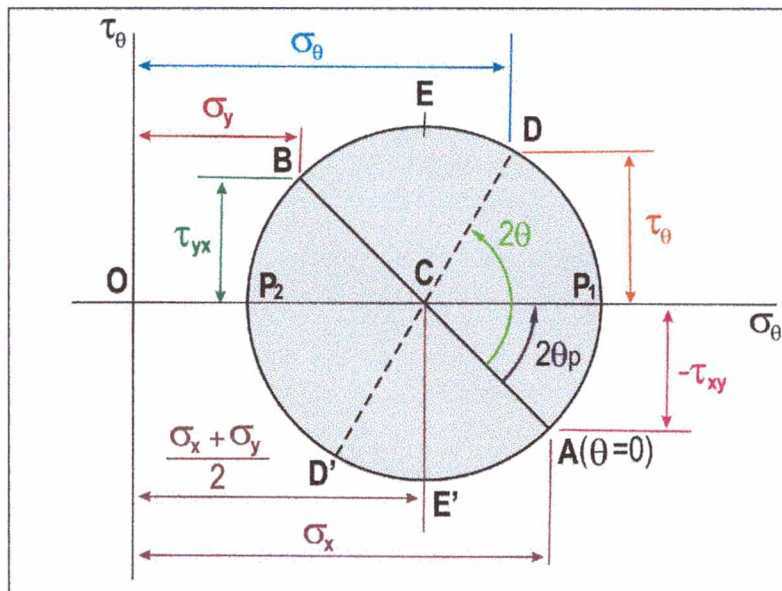


Figura 2.5 Círculo de Mohr para tensões planas

O círculo de Mohr, para qualquer ponto sujeito a tensões biaxiais, pode ser desenhado quando as tensões normais do elemento (σ_x e σ_y) e a respectiva tensão de cisalhamento τ_{xy} são conhecidas [17] [21] [24]. Uma importante aplicação do

círculo de Mohr é a determinação das tensões principais (intensidade e direção). O círculo de Mohr pode ser também construído para as deformações [4] [21].

As tensões para o estado biaxial também podem ser reescritas em termos de deformação (Equações 2.15, 2.16 e 2.17) [22].

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad (2.15)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad (2.16)$$

$$\tau_{yx} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{yx} \quad (2.17)$$

2.2.2 Principais Métodos de Medição de Tensões

Para os casos em que a análise matemática não oferece nenhuma solução simples e confiável, métodos experimentais foram aprimorados visando a determinação da distribuição de tensões e deformações. Os métodos experimentais para a medição de tensões e deformações podem ser divididos em mecânicos, elétricos e ópticos.

Os métodos ópticos têm se tornado uma alternativa interessante para testes não destrutivos quando comparados aos métodos convencionais. As principais características e vantagens dos métodos ópticos são [28]:

- a. Medição sem contato: medições sem contato são muito importantes, pois têm maiores velocidades de medição, ausência de retroação do sistema de medição sobre o mesurando e a possibilidade de medir em superfícies quentes, moles, etc.
- b. Medição em campo completo: dependendo da técnica utilizada, áreas que vão de alguns milímetros quadrados, até alguns metros quadrados, podem ser inspecionadas ou observadas simultaneamente. Esta característica implica numa grande redução de tempo devido à grande quantidade de informações que se obtém em relação às medições pontuais.

- c. Sem marcações: em alguns casos as inspeções podem ser iniciadas quase instantaneamente sem a necessidade da preparação da superfície do componente em estudo.
- d. Sem consumíveis: alguns métodos necessitam apenas da iluminação adequada da superfície para a realização da medição, dispensando a instalação de sensores ou outros materiais consumíveis.

A seguir, alguns dos métodos experimentais mais utilizados para a medição de tensões e deformações são brevemente analisados, evidenciando-se o princípio de medição de cada método. Uma tabela será utilizada para a análise comparativa entre os métodos.

1. Métodos Mecânicos

- Extensômetro Mecânico (Clip Gage): este tipo de medidor é utilizado em ensaios de tração normalmente onde se deseja conhecer o diagrama tensão-deformação do material ou propriedades mecânicas do material ensaiado. O alongamento ou encurtamento do corpo de prova provoca movimentos nos braços do medidor. Esses movimentos são registrados internamente por extensômetros de resistência elétrica que emitem sinais proporcionais à extensão ou contração do componente [4].
- Revestimento Quebradiço: Uma camada de verniz frágil é aplicada sobre a superfície do componente em estudo. A camada aplicada é fina e tende a trincar quando o componente em estudo é tensionado. Finas rachaduras formam-se perpendicularmente à direção das tensões máximas [22].

2. Métodos Elétricos

- Extensometria por Resistência Elétrica: O medidor é colado na superfície do componente em estudo. As deformações do objeto são transferidas ao medidor e provocam variações na resistência do

extensômetro. As variações são medidas por um circuito específico (por exemplo uma Ponte de Wheatstone) e são transformadas em deformação [6].

3. Métodos Ópticos

- Fotoelasticidade por transmissão: A fotoelasticidade por transmissão consiste no exame de um modelo similar à estrutura de interesse, fabricado em polímero transparente. Os polímeros têm propriedades ópticas especiais (birrefringência) que se modificam com o estado de tensões. Um padrão de franjas é visualizado quando o modelo fotoelástico está sob carregamento e é iluminado com luz polarizada. Os padrões de franjas contém informações sobre os pontos sobrecarregados e sobre os valores e direções das tensões máximas [22].

- Fotoelasticidade por reflexão: Ao invés de ser construído um modelo fotoelástico, reveste-se a própria estrutura ou parte dela com uma camada de material fotoelástico. O carregamento é aplicado na estrutura e o padrão de tensões é visualizado através de um polariscópio portátil. [22].

- Holografia Eletrônica (HE): A superfície a ser medida é iluminada com feixes de laser vindos de duas diferentes direções. O padrão de *speckle*, formado pela iluminação com luz coerente, muda quando a superfície é deformada. As imagens dos padrões de *speckle*, antes e depois da deformação, são gravadas por uma câmera CCD. Técnicas de comparação entre as imagens permitem o registro de deslocamentos com resolução submicrométrica. A análise das franjas de interferência permite o cálculo dos campos de deslocamentos, deformações e tesões (Capítulo 3).

- Shearography: Técnica de interferometria por *speckle* como a holografia eletrônica. Porém, a *shearography*, através da análise das franjas de interferência, calcula as derivadas dos deslocamentos ao invés dos deslocamentos puros como na Holografia Eletrônica [29]. A *shearography* sofre menos influência dos deslocamentos de corpo rígido e o arranjo óptico para a utilização da técnica é mais complicado que na holografia eletrônica [30].

- Moiré Geométrico: Mede deformações e deslocamentos no plano. No moiré geométrico são utilizadas duas grades de linhas paralelas e eqüidistantes. Uma das grades é aplicada à superfície do componente em estudo, e a segunda grade (chamada de grade de referência) é colocada em contato àquela aplicada no componente. Quando o componente é carregado, ou movimentado, padrões de interferência são gerados. Através das ordens de franja dos padrões gerados calcula-se as deformações e/ou deslocamentos sofridos pelo objeto [6] [25] [26].

- Moiré Interferométrico: Moiré interferométrico combina os conceitos e técnicas do moiré geométrico e da interferometria. Uma grade de difração é colada sobre o componente em estudo. A grade é iluminada com dois feixes de laser que interferem entre si. A imagem de interferência é capturada por uma câmera CCD. Quando cargas são aplicadas ao componente, a deformação superficial sofrida é transferida à grade de difração com grande fidelidade. É possível calcular os deslocamentos e as deformações sofridas (intensidades e direções principais), pois existe uma relação bem definida entre estas grandezas e as ordens de franjas [6] [25] [26].

- Extensômetros a Laser: Dois retro-refletores são colados no corpo a ser estudado e são separados por uma distância determinada. O feixe de laser varre o corpo de prova através de espelhos giratórios. Através da análise dos ângulos dos raios refletidos e da distância da fonte de laser

à peça, calcula-se a deformação sofrida pelo componente [32]. O extensômetro por difração e o extensômetro interferométrico são outros tipos de extensômetros ópticos [4].

A Tabela 1 será utilizada para a comparação entre os métodos de medição de tensão anteriormente introduzidos. Os seguintes itens serão considerados: grandeza medida, tipo de medição, local de medição e características de operação. Dependendo do item, será utilizada uma escala de zero a dez para uma melhor comparação entre os métodos.

A comparação técnico-econômica entre a Roseta Óptica e a extensometria por resistência elétrica pode ser encontrada no Anexo D. Fica claro que, embora o investimento inicial na aquisição da Roseta Óptica seja maior que o necessário para a extensometria, em pouco tempo este investimento é recuperado em função do menor custo operacional.

Tabela 1 Métodos Ópticos de Medição de Tensão

Métodos de Medição de Tensão	Grandeza Medida	Tipo de Medição				Local		Resultados				Operação									
		Campo Completo = CC	Pontual = P	Dinâmica = 10	Estática = 0	Absoluta = A	Relativa = R	Sem Contato = SCT	Com Contato = CT	Em Campo = 10	Em Laboratório = 0	Ambiente Agressivo = 10	Ambiente Laboratorial = 0	Faixa de Medição [MPa]	Incerteza Típica [%]	Resolução [MPa]	Tempo de Preparação	Tempo de Medição [s]	Consumíveis: Não = N / Sim = S	Fácil = 10 / Difícil = 0	Custo: Baixo = 10 / Alto = 0
a) Mecânicos																					
- Clip Gage	D	P	2	R	CT	0	8	1000	5	<1	ID	5 min	< 1s	N	5	5					
- Revestimento Quebradiço	σ	CC	2	R	SCT	10	7	500	>20	5	2D	5h	5 min	S	2	5					
b) Elétricos																					
Extensometria por Resistência Elétrica	ϵ	P	10	R	CT	10	10	1000	2	<1	2D	1h	< 1s	S	6	6					
c) ÓPTICOS																					
- Fotoelasticidade por Transmissão	σ	CC	6	A	SCT	2	5	500	10	0,1	2D/3D	1 dia	> 1h	S	4	3					
- Fotoelasticidade por Reflexão	σ	CC	10	R	SCT	10	6	500	10	0,1	2D	4h	> 1h	S	2	3					
- Holografia Eletrônica	D	CC	3	R	SCT	7	3	500	5	<1	2D/3D	2h	1 min	N	3	3					
- Shearography	D	CC	3	R	SCT	9	6	500	10	<1	2D/3D	1h	1 min	N	5	3					
- Moiré Geométrico	D	CC	0	R	SCT	5	5	500	10	20	2D	1h	1 min	S	5	5					
- Moiré Interferométrico	D	CC	0	R	SCT	2	0	500	5	20	2D/3D	5h	1 min	S	0	0					
- Extensômetros a Laser	D	P	4	R	CT	6	3	500	15	≈ 3	1D	1h	1 min	N	5	3					
d) ROSETA ÓPTICA	D	P	2	R	SCT	8	6	500	<5	0,1	2D	5 min	1 min	N	8	2					

2.2.3 Principais sistemas ópticos disponíveis comercialmente para medição de tensões e deformações

As técnicas ópticas de medição têm um grande potencial para redução de custos de inspeção e fabricação. Essas técnicas são muito mais suscetíveis às variações ambientais (vibrações, correntes de convecção, entre outras) quando comparadas às técnicas convencionais [27] [28], e por isto, as técnicas ópticas são muito mais empregadas em laboratórios, onde as condições ambientais são bem controladas.

No entanto, nota-se uma tendência recente do mercado em desenvolver dispositivos ópticos que possam ser utilizados em ambientes industriais, visando a redução dos tempos de medição e a garantia um nível de incerteza satisfatório.

A pesquisa bibliográfica trouxe os seguintes sistemas ópticos disponíveis comercialmente para a medição de tensões e deformações:

- Extensômetro a Laser (EXT-62-LOE) [32]
- PhotoStress [33]
- Modelo 2D ASAME [34]
- ASAMA Target Model [35]
- Q-100 – Microstar [36]
- Q-300 [36]
- LaserOptical [36]
- GPF 1000 – PSA [37]
- PEMI II – Interferômetro de Moiré Portátil [38]
- LES – Laser Grating Extensometer [27]
- Extensômetro óptico OPEX [27]

A seguir, será realizada uma descrição dos sistemas ópticos comerciais mais importantes da listagem acima, evidenciando-se os métodos de medição utilizados em cada dispositivo. Através dos itens descritos pode-se comparar os dispositivos.

1. Extensômetro a Laser (EXT-62-LOE)

Fabricante: United

Endereço: www.tensiletest.com/laserext.htm

Método de Medição utilizado: Extensometria óptica por reflexão.

Grandeza medida: deformações.

Tipo de medição: campo completo através da varredura da área entre os retro-refletores colados no corpo de prova; dinâmica; relativa; necessita do contato dos retro-refletores no corpo de prova, mas a varredura é feita sem contato.

Local de Medição: em campo; realiza medições em ambientes com alta temperatura (ambiente agressivo).

Resultados apresentados: somente 1D; mede de 1% a mais de 1000% de alongamento; resolução de 2,5 μm com uma taxa de varredura de 30 medições por segundo.

Operação: necessita-se de tempo para a preparação do corpo de prova, colagem dos retro-refletores e alinhamento do medidor; medições feitas em tempo real; utiliza consumíveis (retro-refletores); operação relativamente fácil; custo abaixo de U\$ 10.000.

2. Modelo 2D ASAME * (* *Automated Strain Analysis and Measurement Environment*)

Fabricante: Camsys

Endereço: www.camsysinc.com/2dm.html

Método de Medição utilizado: Grades de linhas paralelas ou circulares são estampadas à superfície do componente. Utiliza câmera CCD.

Grandeza medida: deslocamentos dos pontos das grades.

Tipo de medição: campo completo; estática; sem contato; absoluta.

Local de medição: laboratório (ensaios de tração).

Resultados: 2D

Operação: grande dificuldade para a estampagem da grade no componente; tempo de medição automática menor que 1 minuto; 10

minutos para medições manuais; o custo de investimento pode variar de U\$D 11.000 a U\$D 50.000.

3. Q-100 - MicroStar

Fabricante: Ettemeyer

Endereço: www.ettemeyer.com

Método de Medição utilizado: Holografia Eletrônica.

Grandeza medida: deslocamentos.

Tipo de medição: necessita do contato do cabeçote de medição com a peça; estática ou dinâmica; relativa; automática.

Local de medição: em campo.

Resultados: 3D.

Operação: fácil de operar; tempo de medição de aproximadamente 1 minuto depois de fixado o dispositivo; medição em passos de carregamento; custo aproximado de U\$ 90.000.

4. PEMÍ II – Interferômetro de Moiré Portátil

Fabricante: Photo Mechanics

Endereço: www.photomechanics.com

Método de Medição utilizado: Moiré Interferométrico

Grandeza medida: deslocamentos

Tipo de medição: necessita a colocação de uma grade de difração sobre a peça; estática; relativa; automática; sensibilidade normal de 417 nm/OF.

Local de medição: campo.

Resultados: 2D

Operação: tempo gasto na colocação da grade de difração sobre a peça; fácil utilização; fácil alinhamento; mudanças automáticas das direções de medição; custo pode variar de U\$ 60.000 a U\$ 110.000 (com acessórios).

Capítulo 3

Holografia Eletrônica

3.1 Princípios da Holografia Eletrônica

A Holografia Eletrônica tem sido utilizada para a medição de microdeslocamentos, vibrações, propriedades mecânicas de materiais, deformações mecânicas e tensões [6]. A técnica envolve princípios interferométricos e utiliza a luz de um laser.

Através da Holografia Eletrônica determina-se o campo de deslocamentos sofrido por um corpo, quando este é solicitado mecânica ou termicamente, assumindo um estado deformado. O campo de deslocamentos medido está diretamente relacionado ao nível de solicitação ao qual o corpo foi submetido.

3.1.1 Formação do *speckle*

A Figura 3.1 representa um dos efeitos da incidência da luz coerente e monocromática de um laser sobre uma superfície rugosa. Tipicamente as variações das alturas da microgeometria da maioria dos materiais são pelo menos da ordem de um comprimento de onda do laser ($0,6 \mu\text{m}$) [1]. As ondas refletidas se espalham no espaço e, ao incidirem em um determinado anteparo, formam um padrão de interferência granular, mostrando vários pontos claros e escuros aleatoriamente

distribuídos. Este granulado óptico é denominado padrão de “*speckle*” [2][3] (Figura 3.2), que significa “mancha” em inglês.

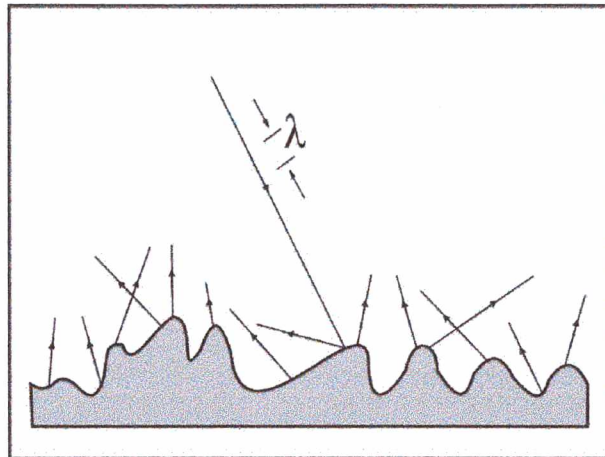


Figura 3.1 Luz espalhada de forma difusa ao incidir sobre uma superfície rugosa

A cada *speckle* corresponde um valor de intensidade luminosa mensurável e também uma fase bem definida, que varia de forma aleatória de *speckle* para *speckle* [10].

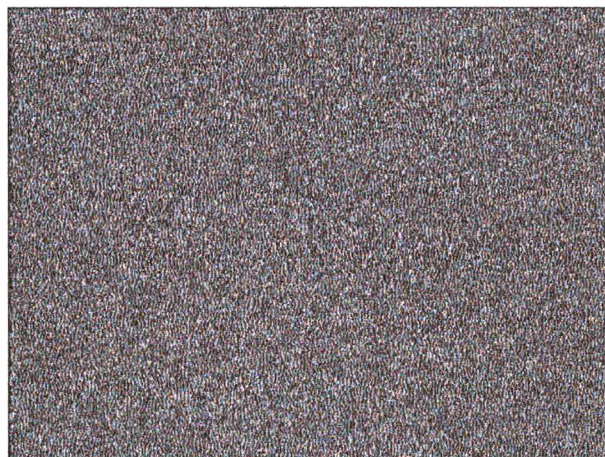


Figura 3.2 Padrão de *speckle* de uma superfície rugosa iluminada pelo laser

3.1.2 Interferência e diferença de fase

A interferência é a combinação, por superposição, de duas ou mais ondas que se encontram no mesmo ponto do espaço. Considere a Figura 3.3.

Para cada caso, considere duas ondas (uma desenhada de cor vermelha e a outra na cor preta) com a mesma frequência e o mesmo comprimento de onda.

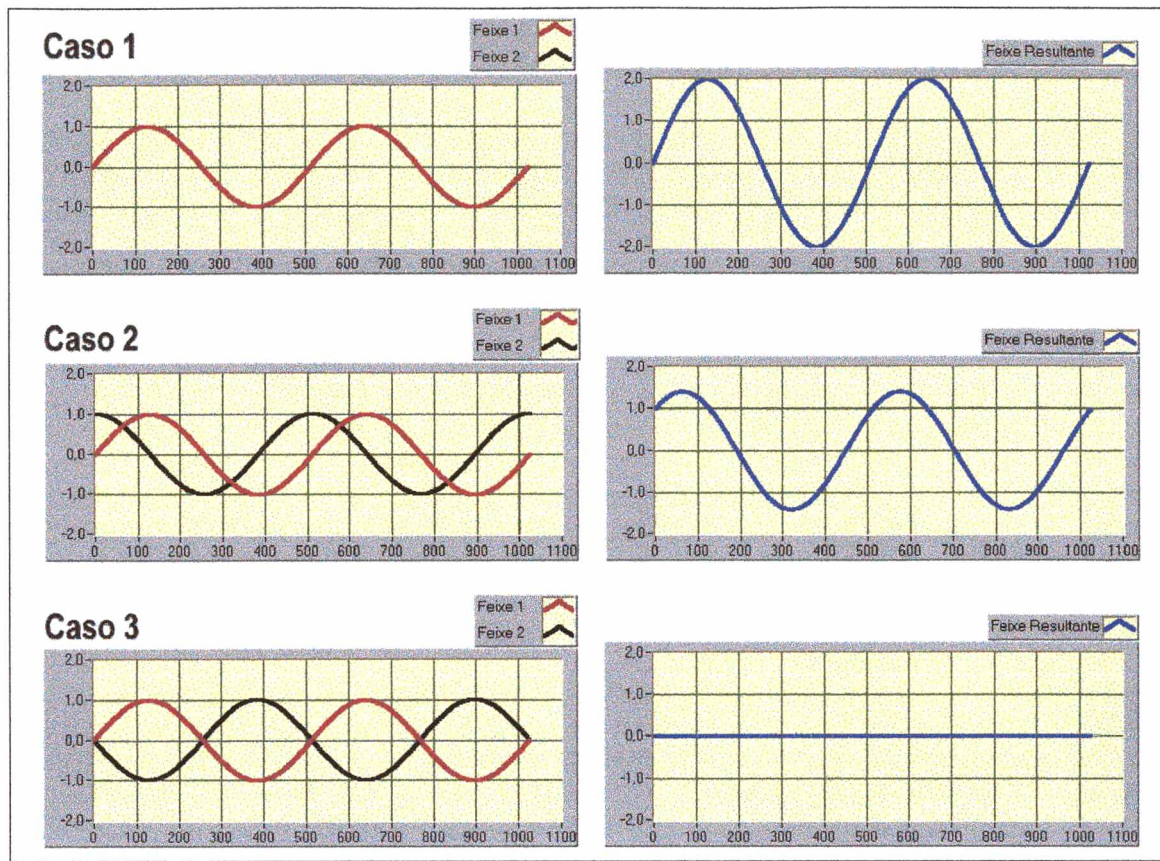


Figura 3.3 Possíveis casos de interferência ¹

Segundo a teoria eletromagnética, quando as ondas desenhadas em vermelho e preto se superpõem, o resultado é uma soma vetorial das suas amplitudes. A intensidade resultante (linha com cor azul) é proporcional ao quadrado da amplitude e depende ainda da diferença de fase ($\Delta\phi$) entre as duas ondas (Equação 3.1) [2].

$$I = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A \cdot I_B} \cdot \cos\Delta\phi \quad (3.1)$$

onde

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (3.2)$$

O termo $2\sqrt{I_A \cdot I_B} \cdot \cos\Delta\phi$ é chamado de termo de interferência.

Analisando-se o termo de interferência percebe-se que se a diferença de fase for 180° (π radianos), ou qualquer ângulo cômruo de 180° , tem-se que:

¹ No Caso 1 considere também a onda de cor preta. Esta não aparece na figura devido à superposição com a onda vermelha.

$$\Delta\phi = (2n+1)\pi \quad \text{para } n = 0,1,2,\dots$$

sendo $\cos\Delta\phi = -1$ e a intensidade é mínima. Neste caso, as ondas parciais estão em fases opostas entre si e a interferência é chamada destrutiva (Caso 3 da Figura 3.3).

Porém, quando a diferença de fase for 0 ou qualquer ângulo cômgruo de 360° (2π radianos) tem-se que:

$$\Delta\phi = 2.n.\pi \quad \text{para } n = 0,1,2,\dots$$

sendo $\cos\Delta\phi = 1$ e a intensidade alcança o seu máximo. Neste caso, as duas ondas parciais estão em fase e interferem construtivamente entre si (Caso 1 da Figura 3.3).

No Caso 2 da Figura 3.3 estão representadas duas ondas defasadas de 90° , onde a onda resultante atinge uma intensidade intermediária.

Na Figura 3.4 observam-se faixas claras e escuras que se denominam franjas de interferência. As franjas claras representam regiões de interferência construtiva e as faixas escuras representam as regiões de interferência destrutiva.

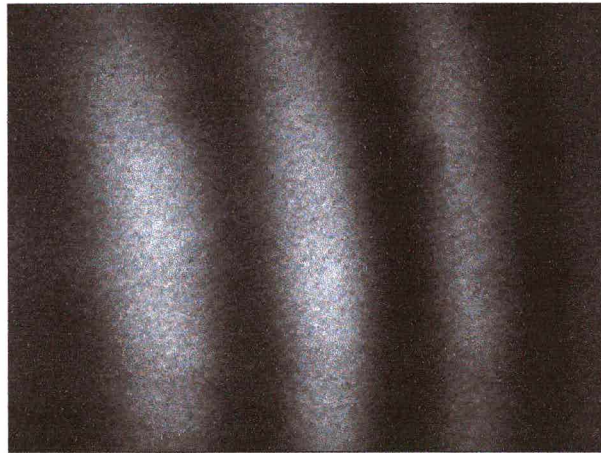


Figura 3.4 Franjas de Interferência

3.2 Medição de Deslocamentos

Dois tipos de iluminação são utilizados na holografia eletrônica: iluminação simples e iluminação dupla.

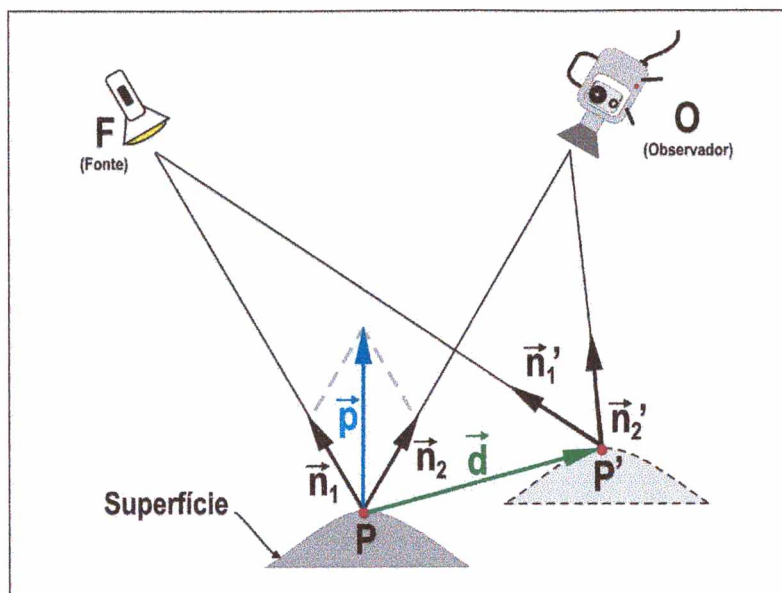


Figura 3.5 Arranjo holográfico com iluminação simples

A Figura 3.5 mostra uma configuração genérica de medição de deslocamentos com iluminação simples. Este tipo de montagem possibilita a medição de deslocamentos normais, ou quase normais, à superfície iluminada. A direção do deslocamento na qual esta montagem é sensível é dada pelo vetor sensibilidade \vec{p} , resultante da soma de dois vetores unitários, ambos fixados no ponto P, um deles apontando para a posição da fonte de iluminação e o outro para o observador (câmera de TV). Esta configuração é também referenciada como sensibilidade “fora do plano” [11].

A configuração com iluminação dupla, ponto de maior interesse deste trabalho, está representada na Figura 3.6.

Segundo Sciamarella (1976) a medição de deslocamentos paralelos ao plano pode ser implementada iluminando-se o objeto através de dois feixes de luz coerente, ambos formando um mesmo ângulo φ com a normal à superfície. Cada um dos feixes de luz que incide sobre o objeto gera o seu próprio padrão de *speckle*. Os padrões gerados se combinam, interferem e resultam em um terceiro padrão, diferente dos demais, que é visualizado pela câmera de TV. A esta configuração é dado o nome de dupla iluminação.

Quando o objeto iluminado se move ou é deformado, os padrões de *speckle* sofrem uma defasagem devido à alteração do caminho óptico percorrido pelos feixes.

Esta defasagem provoca alterações na intensidade luminosa captada pela câmera de TV.

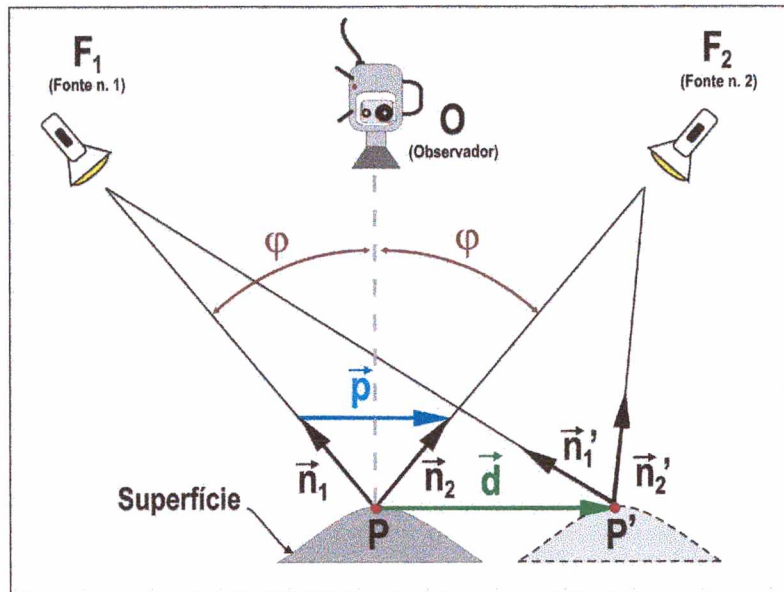


Figura 3.6 Configuração de dupla iluminação

A relação entre o deslocamento d e a diferença entre os caminhos ópticos percorridos pela luz entre os pontos P e P' , é mostrada abaixo:

$$\Delta = Estado_{FINAL} - Estado_{INICIAL} \quad (3.3)$$

$$\Delta = (F_2P' - F_1P') - (F_2P - F_1P) \quad (3.4)$$

$$\Delta = (F_2P' - F_2P) - (F_1P' - F_1P) \quad (3.5)$$

$$\Delta = \vec{d} \cdot \vec{n}_2 - \vec{d} \cdot \vec{n}_1 \quad (3.6)$$

$$\Delta = \vec{d} (\vec{n}_2 - \vec{n}_1) \quad (3.7)$$

$$\Delta = \vec{d} \cdot \vec{p} \quad (3.8)$$

sendo:

- ⇒ Δ = Alteração no caminho óptico percorrido pela luz;
- ⇒ \vec{n}_1 e \vec{n}_2 são vetores unitários;
- ⇒ \vec{p} = vetor sensibilidade;
- ⇒ \vec{d} = vetor deslocamento.

Esta configuração de interferômetro é adotada para medir preferencialmente deslocamentos tangentes à superfície iluminada, situação referenciada também como sensibilidade “no plano” do objeto.

A alteração de fase $\Delta\phi$ no ponto P, que coincide com a alteração de fase do *speckle* correspondente, provocada pelo deslocamento da superfície, é dada por [9] :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot [\vec{p} \cdot \vec{d}] \quad (3.9)$$

Reescrevendo a Equação 3.9 chega-se à Equação 3.10.

$$\vec{p} \cdot \vec{d} = \lambda \cdot \frac{\Delta\phi}{2\pi} \quad (3.10)$$

A Equação 3.10 pode ser reescrita novamente, obtendo-se:

$$\vec{p} \cdot \vec{d} = \lambda \cdot OF \quad (3.11)$$

onde OF é a Ordem de Franja. A ordem de franja é um número associado à defasagem sofrida pelo *speckle*, definido por [3] [6] :

$$OF = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \quad (3.12)$$

No caso particular em que \vec{n}_1 e \vec{n}_2 são orientados simetricamente em relação à normal à superfície do objeto, a relação entre o deslocamento (d) paralelo à superfície e a ordem de franja é dado por:

$$d = \frac{\lambda}{2 \cdot \text{sen}\varphi} \cdot OF \quad (3.13)$$

onde φ é o ângulo de iluminação referenciado em relação à normal à superfície.

Conforme a Equação 3.13, quanto menor for o comprimento de onda λ do laser e quanto maior for o ângulo φ , maior será o número de franjas formado para um mesmo deslocamento d .

3.2.1 Deslocamento de Fase (*Phase shifting*)

Até o presente momento, mostrou-se que há relação entre os deslocamentos sofridos por um determinado objeto e a alteração de fase do padrão de *speckle*.

O processo de cálculo dos ângulos de fase do padrão de *speckle* é relativamente simples. A idéia básica consiste no uso de um dispositivo capaz de provocar deslocamentos de fase conhecidos. Estes deslocamentos podem ser feitos, por exemplo, através da colocação de um espelho no caminho óptico do feixe de luz. Tal espelho pode aumentar ou diminuir o caminho percorrido pela luz, modificando, assim, a fase de cada ponto do padrão de *speckle*.

Para calcular a fase de um dado *speckle* considere a Equação 3.1 aplicada quatro vezes, sendo, entre elas, acrescentado um incremento de fase de 90°. Assim:

$$I_0 = I_A + I_B + 2 \cdot \sqrt{I_A \cdot I_B} \cdot \cos \phi \quad (3.14)$$

$$I_1 = I_A + I_B + 2 \cdot \sqrt{I_A \cdot I_B} \cdot \cos(\phi + 90^\circ) = I_A + I_B - 2 \cdot \sqrt{I_A \cdot I_B} \cdot \sin \phi \quad (3.15)$$

$$I_2 = I_A + I_B + 2 \cdot \sqrt{I_A \cdot I_B} \cdot \cos(\phi + 180^\circ) = I_A + I_B - 2 \cdot \sqrt{I_A \cdot I_B} \cdot \sin(\phi + 90^\circ) \quad (3.16)$$

$$I_3 = I_A + I_B + 2 \cdot \sqrt{I_A \cdot I_B} \cdot \cos(\phi + 270^\circ) = I_A + I_B - 2 \cdot \sqrt{I_A \cdot I_B} \cdot \sin(\phi + 180^\circ) \quad (3.17)$$

Combinando as quatro equações acima é possível calcular ϕ por [1]:

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{I_3 - I_1}{I_0 - I_2} \right] \quad (3.18)$$

Carrè (1966) [1] [2] desenvolveu uma técnica para o cálculo do deslocamento de fase que é independente da quantidade de deslocamento utilizada. Porém, o incremento utilizado entre os quatro passos deve ser constante ($\Delta\alpha$). Assim, têm-se

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{[(I_0 - I_3) + (I_1 - I_2)] \cdot [3(I_1 - I_2) - (I_0 - I_3)]}}{(I_1 + I_2) - (I_0 + I_3)} \quad (3.19)$$

sendo

ϕ = ângulo de fase do padrão de *speckle*

I_n = intensidade do padrão de *speckle* para cada passo (Equação 3.20)

$$I_n = I_A + I_B + 2 \cdot \sqrt{I_A \cdot I_B} \cdot \cos(\phi + n \cdot \Delta\alpha) \quad (3.20)$$

Uma das grandes vantagens da técnica dos quatro passos é a simplicidade do modelo matemático, além de que, neste processo a fase não precisa ser calibrada. Segundo Cloud (1995) esta técnica é a melhor a ser empregada quando se tem erros de deslocamento de fase presentes.

3.2.2 Remoção do Salto de Fase (*Phase Unwrapping*)

Tanto a Equação 3.18 quanto a Equação 3.19 calculam o ângulo de fase pelo inverso da tangente. Considerando os sinais do numerador e denominador é possível determinar o valor de ϕ dentro da faixa entre 0° e 360° . Para cada pixel da imagem o ângulo de fase é representado por um número entre 0 (zero) e 255, sendo que 0 (zero) corresponde a 0° e 256 corresponderia a 360° . A imagem onde o ângulo de fase é representado desta forma denomina-se “mapa de fases”, como mostra a Figura 3.7.

Considere o eixo ordenado x sobre o mapa de franjas da Figura 3.7.

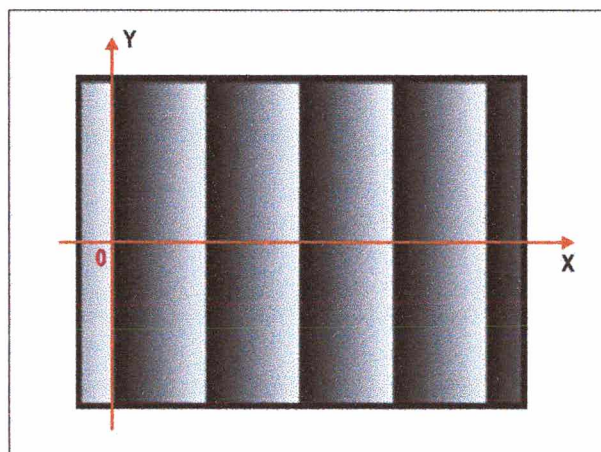


Figura 3.7 Mapa de fase indicando o início da franja de ordem 0 (zero)

O ângulo de fase é uma quantidade contínua que ultrapassa os limites entre 0° e 360° . Porém a equação de cálculo fornece apenas o valor de seu ângulo cômputo dentro da primeira volta. Ao passar para uma franja vizinha ocorre uma descontinuidade de 360° correspondente ao “salto de fase” representado na Figura 3.8.

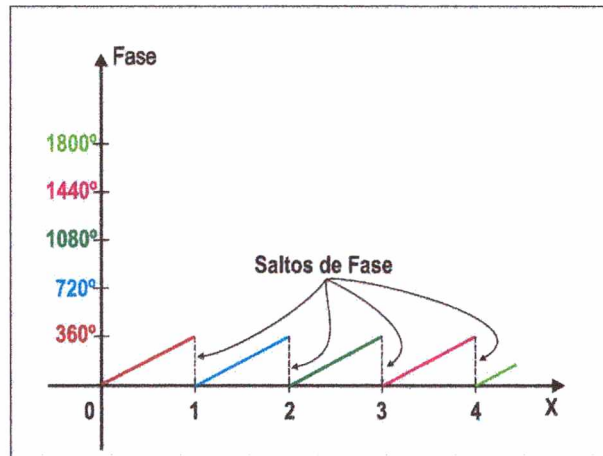


Figura 3.8 Fase calculada antes da remoção do salto de fase

A determinação do ângulo de fase é feita por um algoritmo especial denominado de “remoção do salto de fase” (*phase unwrapping*) [3].

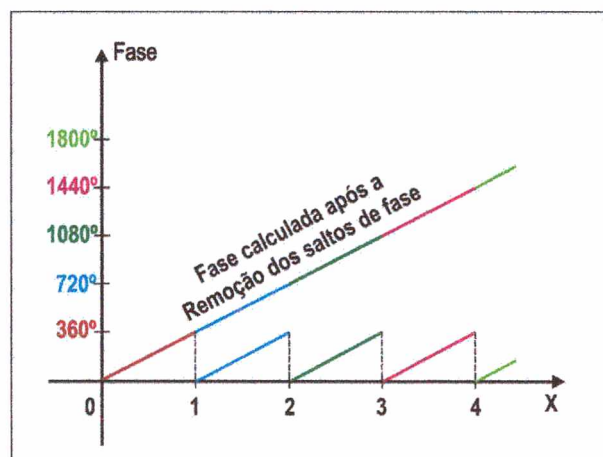


Figura 3.9 Fase calculada após a remoção dos saltos de fase

3.3 O Interferômetro Radial

Albertazzi [15] desenvolveu o Interferômetro Radial (Figura 3.10) cujo principal propósito é a medição de deslocamentos radiais em campos bidimensionais. Este dispositivo foi concebido inicialmente para a medição de tensões residuais pelo método do furo [17] [12] [13]. O Interferômetro Radial é composto de dois espelhos cônicos para gerar iluminação dupla com sensibilidade radial em uma região circular.

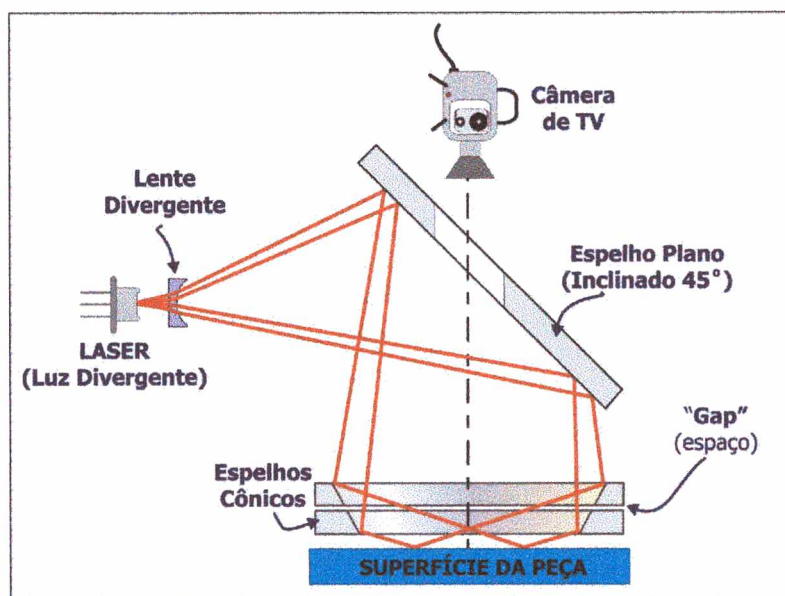


Figura 3.10 Interferômetro Radial

Um feixe não colimado de laser incide sobre os espelhos, de forma que cada ponto da região é iluminado por um único par de raios opostos diametralmente e em alturas diferentes (Figura 3.10). Desta forma, o caso de dupla iluminação é configurado (Seção 3.2).

Mesmo que existam outras componentes no campo de deslocamentos, apenas a componente radial é medida, pois o vetor sensibilidade aponta para o centro e é praticamente paralelo à superfície da peça (sensibilidade radial). A componente radial do deslocamento correspondente a cada pixel da imagem é calculada a partir da fase, do comprimento de onda do laser e do ângulo dos espelhos cônicos pela Equação 3.13.

Segundo Albertazzi, deslocamentos radiais da ordem de até $2\ \mu\text{m}$ podem ser medidos com incertezas melhores que $\pm 0,04\ \mu\text{m}$ [15].

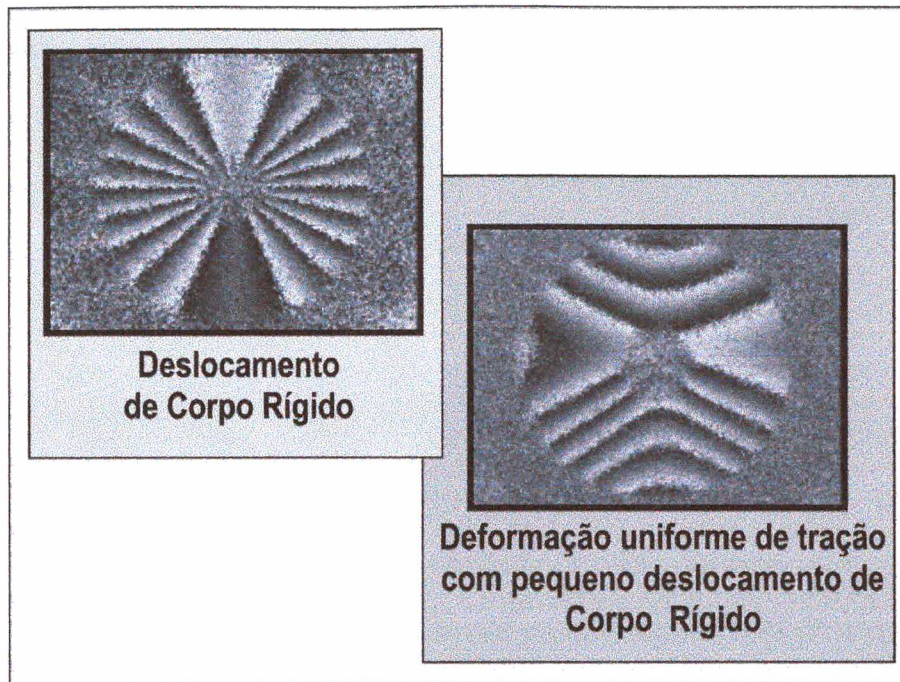


Figura 3.11 Mapas da diferença de fases típicos do Interferômetro Radial

A Figura 3.11 ilustra alguns mapas das diferenças de fase obtidos experimentalmente.

A região iluminada tem tipicamente 7 mm de diâmetro. Pela Figura 3.11 pode-se observar a existência de uma região circular não sensível no centro da imagem. Esta região não é iluminada propositalmente em função da existência de um pequeno espaço (“gap”) entre os dois espelhos cônicos (Figura 3.10). Caso não houvesse esse pequeno espaçamento ocorreria uma excessiva concentração de luz nesta região, o que ofuscaria e diminuiria a qualidade das imagens prejudicando diretamente os resultados das medições.

O interferômetro radial permite aplicar as mesmas técnicas de obtenção de mapas de fase utilizadas na holografia eletrônica. Os mapas de fase correspondentes a cada estado de solicitação (inicial e final) são determinados pelo método de deslocamentos de fase, este promovido por atuadores piezoelétricos que movimentam axialmente um dos espelhos cônicos. O valor de fase em cada pixel é determinado pelo método de Carré (Seção 3.2.1). A remoção do salto de fase (*phase*

unwrapping) (Seção 3.2.2) é realizada aqui pelo método da “inundação ponderada”, proposto por Anand Asundi [50].

3.4 Medição de Tensões Médias com o Interferômetro Radial

A elasticidade clássica exprime a relação entre as tensões e as deformações principais pelas Equações 3.21 e 3.22 e através da Figura 3.12 [4].

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 - \nu\sigma_2}{E} \quad (3.21)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2 - \nu\sigma_1}{E} \quad (3.22)$$

sendo:

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: deformações principais

($\varepsilon_1 = \partial u_1 / \partial x_1$ e $\varepsilon_2 = \partial u_2 / \partial x_2$)

σ_1, σ_2 : tensões principais

E : Módulo de Elasticidade

ν : coeficiente de Poisson

β : ângulo principal de tensões

x_1, x_2 : eixos segundo as direções principais

u_1, u_2 : deslocamentos nas direções principais

u_r : deslocamento na direção radial

Considerando um estado constante de tensões na região medida, as expressões das componentes de deslocamento segundo as direções principais “1” e “2” são obtidas pelas Equações 3.23 e 3.24:

$$u_1 = \int \varepsilon_1 \cdot dx_1 = \varepsilon_1 \cdot x_1 + T_1 \quad (3.23)$$

$$u_2 = \int \varepsilon_2 \cdot dx_2 = \varepsilon_2 \cdot x_2 + T_2 \quad (3.24)$$

sendo:

T_1, T_2 : componentes de deslocamento de corpo rígido (translação) nas direções de x_1 e x_2 , respectivamente.

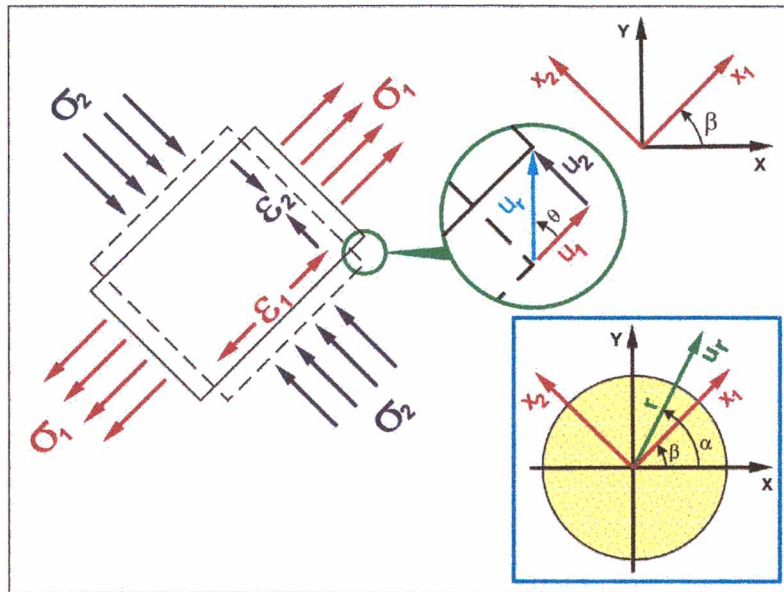


Figura 3.12 Relações entre tensões e deformações no estado plano de tensões e interpretação do deslocamento radial

Em coordenadas polares, o deslocamento radial u_r pode ser expresso em termos de u_1 e u_2 por:

$$u_r = u_1 \cdot \cos\theta + u_2 \cdot \sen\theta \tag{3.25}$$

$$\theta = \alpha - \beta \tag{3.26}$$

e sendo:

$$x_1 = r \cdot \cos\theta \tag{3.27}$$

$$x_2 = r \cdot \sen\theta \tag{3.28}$$

As equações acima podem ser reorganizadas para que se obtenha o deslocamento radial u_r , em função das tensões σ_1 e σ_2 . Substituindo-se as Equações 3.23 e 3.24 na Equação 3.25, tem-se:

$$u_r = \varepsilon_1 \cdot x_1 \cos \theta + \varepsilon_2 \cdot x_2 \cdot \text{sen} \theta + T_1 \cdot \cos \theta + T_2 \cdot \text{sen} \theta \quad (3.29)$$

Fazendo a substituição das Equações 3.27 e 3.28 na Equação 3.29, obtém-se:

$$u_r = \varepsilon_1 \cdot r \cdot \cos^2 \theta + \varepsilon_2 \cdot r \cdot \text{sen}^2 \theta + T_1 \cdot \cos \theta + T_2 \cdot \text{sen} \theta \quad (3.30)$$

Conhecendo-se as seguintes relações trigonométricas:

$$\cos^2 \theta = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\theta) \quad (3.31)$$

$$\text{sen}^2 \theta = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\theta) \quad (3.32)$$

e substituindo-se as relações trigonométricas 3.31 e 3.32 na Equação 3.30, tem-se:

$$u_r = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot \frac{r}{2} \cdot \cos 2\theta + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot \frac{r}{2} + T_1 \cdot \cos \theta + T_2 \cdot \text{sen} \theta \quad (3.33)$$

Por último, substitui-se as Equações 3.21 e 3.22 em Equação 3.33, chega-se a:

$$u_r(r, \theta) = \frac{r(1-\nu)}{2E} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{r(1+\nu)}{2E} \cdot \cos(2\theta)(\sigma_1 - \sigma_2) + T_1 \cdot \cos \theta + T_2 \cdot \text{sen} \theta \quad (3.34)$$

Da Equação 3.34, pode-se observar que a primeira parcela, que contém a soma das tensões principais, é proporcional ao raio e independente de θ . A segunda parcela contém a diferença das tensões principais e é multiplicada pelo raio e por $\cos(2\theta)$. As componentes de translação independem do raio, mas dependem de $\text{sen} \theta$ e $\cos \theta$. A análise destes sinais pelos harmônicos fora adotada por Rodacoski (1997) [13] e também é adequada ao método aqui deduzido. Assim, o processamento de imagens é conduzido em um sistema coordenado polar, determinando-se os coeficientes da série de Fourier discreta, para os Harmônicos de ordem zero (H_0), ordem um (H_1) e ordem dois (H_2). A amplitude destes harmônicos corresponde aos coeficientes da Equação 3.34, o que permite determinar as tensões principais σ_1 e σ_2 assumindo E e ν conhecidos, como descrito nas Equações 3.35 e 3.36. O ângulo

principal β é determinado pela relação entre os termos em seno e cosseno do segundo harmônico (H_{2s} e H_{2c}) e as componentes de translação podem ser obtidas pelas componentes em seno e cosseno do primeiro harmônico (Equações 3.37, 3.38 e 3.39).

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{2 \cdot H_0 \cdot E}{r \cdot (1 - \nu)} \quad (3.35)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{2 \cdot H_2 \cdot E}{r \cdot (1 + \nu)} \quad (3.36)$$

$$T_1 = H_{1c} \quad (3.37)$$

$$T_2 = H_{1s} \quad (3.38)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{H_{2s}}{H_{2c}}\right) \quad (3.39)$$

A princípio, os harmônicos calculados ao longo de apenas um anel são suficientes para determinar as tensões e direções principais e as componentes de translação. Para tornar o processamento mais robusto, sinais de vários anéis são analisados e os valores de tensão calculados pelos mínimos quadrados.

As equações acima fornecem também a solução para quando se deseja conhecer as propriedades elásticas do material, tendo-se σ_1 e σ_2 previamente conhecidos [13]:

$$\nu = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2) \cdot H_2 - (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot H_0}{(\sigma_1 + \sigma_2) \cdot H_2 + (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot H_0} \quad (3.40)$$

$$E = \frac{r \cdot (1 - \nu) \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)}{2 \cdot H_0} = \frac{r \cdot (1 + \nu) \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)}{2 \cdot H_2} \quad (3.41)$$

Observa-se que o cálculo do coeficiente de Poisson independe do módulo de elasticidade e dispensa o conhecimento do valor de tensão se o estado for uniaxial (σ_1 ou $\sigma_2 = 0$).

A análise do estado de tensões pode avançar na direção do conhecimento dos gradientes de tensão, trazendo informações sobre sua direção e magnitude. Essas informações podem contribuir na análise qualitativa, como por exemplo, na pesquisa

de regiões com tensão máxima, e na análise quantitativa, estimando tensões em regiões vizinhas de difícil acesso pelo interferômetro. O modelo proposto, que inclui os gradientes de tensão, não foi avaliado experimentalmente até esta data. Porém, testes do algoritmo com dados reais apontam para a coerência da formulação.

Capítulo 4

A Roseta Óptica

A principal função da Roseta Óptica é **medir e caracterizar o estado de tensões localizado** em componentes e estruturas mecânicas nas condições de serviço (medições estáticas ou quase estáticas). Deverá ser um sistema **de fácil utilização, prático, rápido e confiável**, indicando a **intensidade e a direção das tensões e deformações principais**. Estas características devem estar reunidas em um dispositivo compacto, capaz de ser utilizado com praticidade tanto em ambiente laboratorial como em ambiente industrial.

A metodologia de projeto empregada no desenvolvimento da Roseta Óptica foi a mesma utilizada no desenvolvimento do primeiro protótipo do Medidor Portátil de Tensões Residuais – MTRES [3], em razão do sucesso obtido anteriormente.

Esta metodologia consistiu, basicamente, no detalhamento progressivo e sistemático do projeto, buscando a maximização da qualidade, a diminuição dos custos e a funcionalidade do produto. Tal metodologia apresenta as seguintes fases:

a) Planejamento do produto: Nesta etapa definiu-se o perfil do produto: funções a exercer, mercado a que se destina, prazo para implantação, ciclo de vida e os custos de desenvolvimento, implantação e fabricação. A partir do levantamento das necessidades reais dos futuros usuários, montou-se um cenário para o produto, visualizando-se assim, vários aspectos ligados à concepção e ao projeto do medidor. Em seguida, detalhou-se todas as funções

que devem ser executadas pelo medidor, levando-se sempre em conta, as necessidades dos potenciais usuários.

b) Estudo da viabilidade: Estabelecidos os requisitos técnicos na etapa anterior, algumas configurações foram geradas, e dentre elas, foi selecionada a melhor configuração considerando aspectos técnicos e econômicos.

c) Projeto básico: Tendo em mente a configuração considerada viável, foram feitas várias análises sobre os modelos que permitiam alcançar as características desejáveis definidas na fase de planejamento do produto.

d) Projeto executivo: Nesta fase, os subsistemas que compõem o medidor foram totalmente desmembrados e detalhados, definindo-se dimensões, materiais, acabamentos e especificações de todos os componentes e peças do produto.

e) Fabricação e compra de componentes: Com o término do projeto executivo iniciou-se a usinagem e a compra dos componentes necessários à montagem do primeiro protótipo.

f) Montagem e Testes: Com a chegada das peças usinadas e dos componentes comprados iniciou-se a montagem e integração dos subsistemas. Depois de montada, a Roseta Óptica foi submetida a alguns testes de bancada.

O grande tempo investido fases “a”, “b”, “c” e “d” reverteu-se em ganho nas fases de usinagem e integração dos componentes. Um outro fator que contribuiu enormemente para que não houvesse problemas na fase de montagem e integração, foi o ótimo contato mantido com a empresa prestadora dos serviços de usinagem.

4.1 Subsistemas da Roseta Óptica

Para materializar o sistema Roseta Óptica, seis subsistemas (Figura 4.1) foram idealizados e construídos com o objetivo de dotar o sistema de todas as funções necessárias para o desenvolvimento das atividades a que se destina.

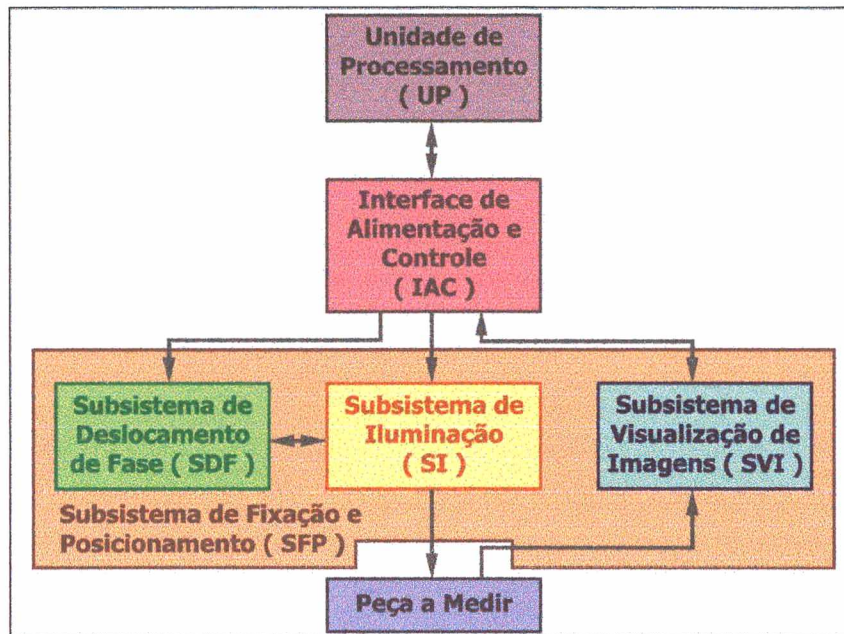


Figura 4.1 Subsistemas da Roseta Óptica

A Unidade de Processamento (UP) é composta pelo *laptop* e pelo software de medição. Através da UP, o usuário é capaz de comandar remotamente todas as funções da Roseta Óptica. A Interface de Alimentação e Controle (IAC) é composta pelas fontes de alimentação, componentes eletro-eletrônicos e pelos *drivers* de componentes internos da Roseta Óptica, como por exemplo, o *driver* de controle dos piezoatuadores. A IAC é a ponte entre a unidade de processamento e o sistema de medição.

Os quatro subsistemas restantes são aqueles que fazem parte diretamente do dispositivo de medição. A principal função do Subsistema de Iluminação (SI) é iluminar a região de medição com dupla iluminação. O Subsistema de Deslocamento de Fase (SDF) tem por função modificar o ângulo de fase de uma parte da luz que incide sobre a região de medição, para que seja possível o cálculo da fase das imagens adquiridas. O Subsistema de Visualização de Imagens (SVI) é responsável

por visualizar e captar as imagens da região iluminada. Por fim, o Subsistema de Fixação (SF) é responsável por manter o dispositivo de medição rigidamente fixo à peça a medir. Cada subsistema apresenta detalhes construtivos e outras funções específicas que serão abordados separadamente a seguir.

4.1.1 Subsistema de Iluminação (SI)

O subsistema de iluminação (Figura 4.2) é constituído de elementos ópticos e mecânicos que têm por função expandir e direcionar a luz coerente do feixe de um laser diodo [39][41]. O feixe de luz divergente (não-colimado) deve atingir os espelhos cônicos, responsáveis pela criação da configuração de dupla iluminação (Seção 3.2) sobre a superfície da peça a ser medida.

O laser diodo utilizado nesta montagem é um dispositivo bastante compacto, cujo fabricante é a empresa Blue Sky Research. Suas dimensões principais são aproximadamente 9 mm de diâmetro e 6,5 mm de altura; a potência nominal é de 50 mW e o comprimento de onda é de aproximadamente 785 nm (infravermelho). Segundo especificações técnicas da Blue Sky Research [40] o feixe de laser deveria ser circular, mas testes de bancada mostraram que o laser possui um certo astigmatismo, o que o torna um pouco elíptico. A forma elíptica do laser é problemática, visto que a densidade luminosa não é tão uniforme quanto seria a de um perfil totalmente circular.

Com a lente plano-côncava, apresentada na Figura 4.2, aumenta-se o ângulo de saída do feixe de laser para que toda a área do espelho cônico possa ser iluminada. Esta expansão do feixe deve ocorrer numa distância aproximada de 20 mm.

O feixe de laser é direcionado aos espelhos cônicos através de um espelho plano furado, inclinado de 45° (Figura 4.2). Tal espelho apresenta um furo passante de 6,5 mm de diâmetro, que permite a visualização da região iluminada pela câmera CCD. Este espelho possui um recobrimento especial, objetivando otimizar seu comportamento para o comprimento de onda do laser diodo utilizado e para o ângulo de incidência da luz.

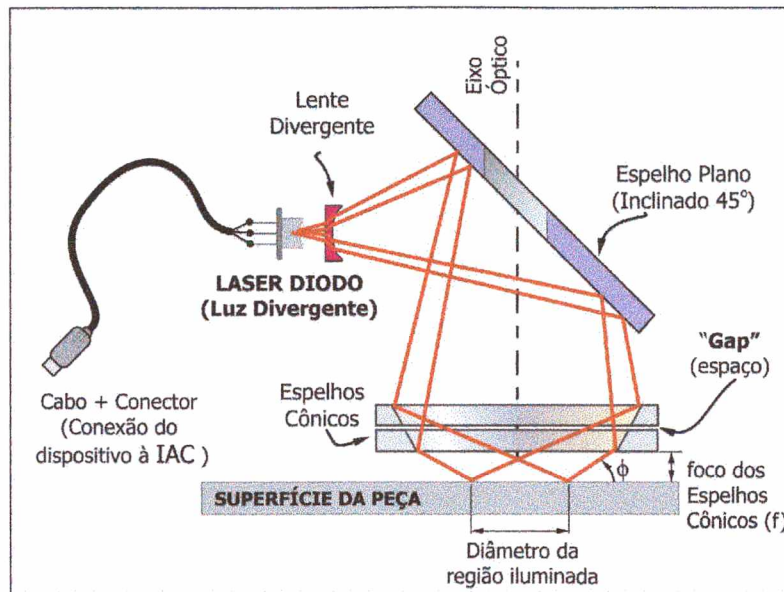


Figura 4.2 Subsistema de Iluminação

O feixe direcionado pelo espelho plano inclinado sofre reflexão nos espelhos cônicos, criando uma região iluminada de aproximadamente 10 mm de diâmetro externo (D_{med}) e uma região de sombra (D_{somb}) de aproximadamente 1,5 mm (Figura 4.3). A região de sombra situa-se no centro da área iluminada e é propositalmente formada pelo espaço (*gap*) existente entre os dois espelhos cônicos. Esta região pode ser observada na parte central das imagens da Figura 3.11.

Utilizando-se o artifício da região de sombra evita-se o ofuscamento da imagem pelo excesso de luz que, se concentraria no ponto central da imagem caso não existisse o *gap*. O ofuscamento prejudicaria a qualidade das imagens e, conseqüentemente, o resultado das medições.

Para que se consiga as condições específicas de iluminação, as dimensões dos espelhos cônicos devem ser calculadas com base em alguns parâmetros determinados pelo projetista (Figura 4.3). São eles:

- D_{med} : diâmetro da região iluminada que se quer obter;
- D_{somb} : diâmetro da região de sombra;
- f : distância entre o espelho inferior e a peça a medir;
- α : ângulo dos espelhos cônicos;

componentes. Foram feitas várias combinações de valores, chegando-se aos seguintes resultados para os parâmetros de entrada:

- $D_{med} = 10 \text{ mm}$;
- $D_{somb} = 1,5 \text{ mm}$;
- $f = 2 \text{ mm}$;
- $\alpha = 60^\circ$;
- $d_t = 51 \text{ mm}$;

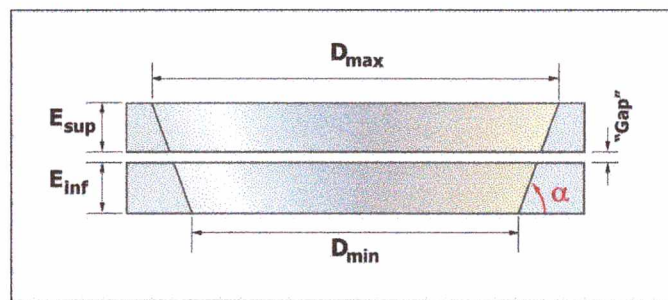


Figura 4.4 Dimensões dos espelhos cônicos

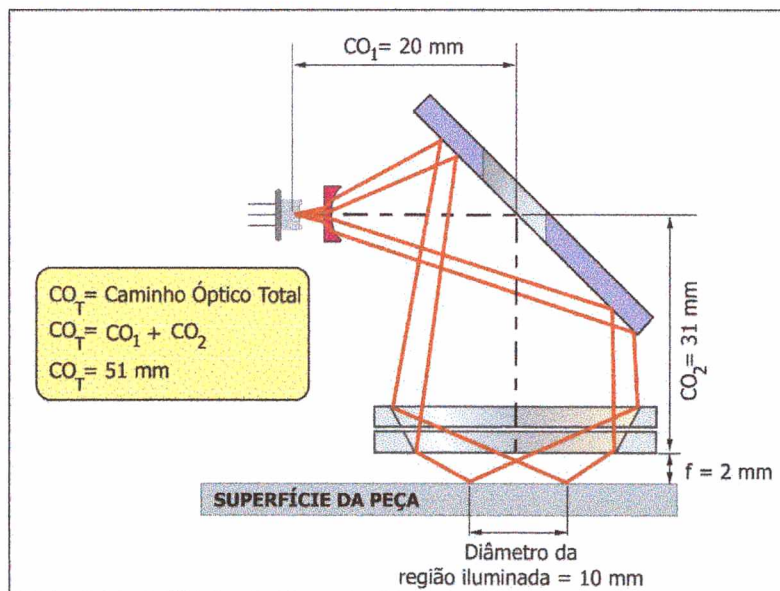


Figura 4.5 Caminho óptico do feixe de laser

Utilizando-se os valores acima, chegou-se aos valores finais das dimensões dos espelhos cônicos que estão sendo utilizados atualmente na Roseta Óptica:

- $D_{\max} = 25,96 \text{ mm}$
- $D_{\min} = 22,74 \text{ mm}$
- $E_{\text{sup}} = 1,06 \text{ mm}$
- $E_{\text{inf}} = 1,32 \text{ mm}$
- $Gap = 0,40 \text{ mm}$
- $\phi_{\text{médio}} = 16^\circ$

As equações utilizadas no cálculo das dimensões dos espelhos cônicos podem ser encontradas no Anexo A.

Os espelhos cônicos são usinados com ferramenta de diamante em um torno de ultraprecisão em razão da necessidade de se obter um ótimo acabamento na superfície espelhada. O material utilizado para a fabricação dos espelhos cônicos é o Alumecc 89 [3] [43].

O Alumecc 89 apresenta grande uniformidade em sua estrutura e em suas propriedades mecânicas, o que minimiza as falhas ou defeitos provenientes de heterogeneidades do material. Além disso, possui excelente usinabilidade, o que reduz o tempo de usinagem e o desgaste da ferramenta.

A Figura 4.6 mostra todos os componentes projetados para o sistema de iluminação.

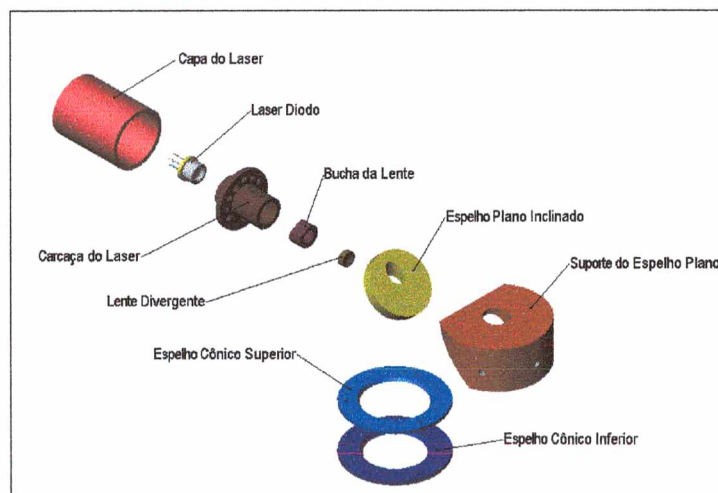


Figura 4.6 Subsistema de Iluminação 3D

4.1.2 Subsistema de Visualização de Imagens (SVI)

O procedimento utilizado para a medição de tensões consiste em captar duas imagens: uma referente ao estado inicial da peça (nível inicial da carga) e outra referente ao estado final (nível final da carga). As imagens captadas são gravadas no computador e processadas posteriormente.

A câmera CCD empregada apresenta dimensões reduzidas (32 mm x 32 mm x 29 mm). Trata-se de uma câmera “on-board” com CCD de 1/3” (3,6 mm de altura x 4,8 mm de largura) fabricada pela empresa Marshall Electronics [42]. Tal modelo foi escolhido devido à sua adequação e disponibilidade no laboratório. Porém, novos modelos e marcas estão sendo pesquisados para futuros protótipos buscando-se menores dimensões e tecnologias mais avançadas, como por exemplo, o uso de câmeras digitais.

A câmera visualiza a região de medição através do furo no espelho plano inclinado de 45°. Um conjunto de duas pequenas lentes com 6 mm de diâmetro cada, associado a uma abertura óptica pré-dimensionada, é utilizado para o ajuste de foco e ampliação da imagem captada. As lentes estão devidamente coladas e distanciadas no interior de um tubo de cobre. (Figura 4.7). A construção mecânica do suporte da câmera permite o deslizamento do tubo de cobre no interior de um furo, possibilitando o ajuste do tamanho da imagem e da distância focal do conjunto. A relação teórica da imagem foi fixada em 0,5 vezes e a distância focal é de aproximadamente 70 mm.

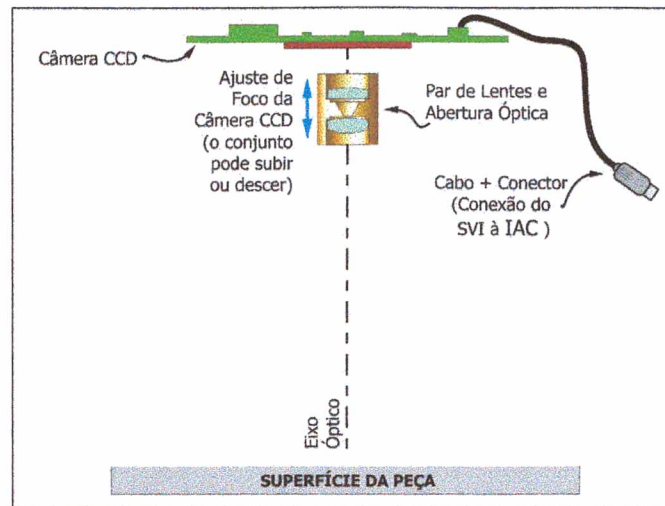


Figura 4.7 Subsistema de Visualização

4.1.3 Subsistema de Deslocamento de Fase (SDF)

O princípio empregado no deslocamento de fase da luz consiste em movimentar apenas o espelho cônico superior com o auxílio de atuadores piezoelétricos, mantendo o espelho inferior fixo. Dessa forma apenas a luz refletida pela parte móvel do conjunto tem o caminho óptico alterado.

A Figura 4.8 mostra os componentes do subsistema de deslocamento de fase.

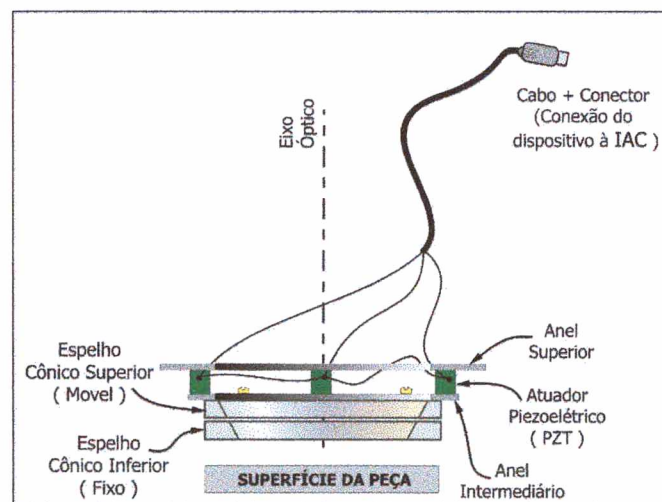


Figura 4.8 Subsistema de deslocamento de fase

Os atuadores piezoelétricos, fabricados pela empresa Piezomechanik GmbH, e equidistantes 120° entre si, estão colados aos anéis superior e intermediário. O

espelho cônico superior é acoplado ao anel intermediário através de três parafusos M2. Todo o conjunto de deslocamento de fase é integrado dentro do soquete do medidor (Figura 4.9).

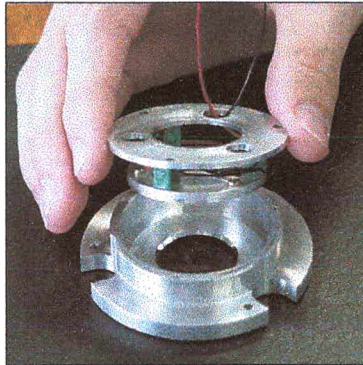


Figura 4.9 Subsistema de deslocamento de fase sendo integrado ao soquete

O espelho cônico inferior apresenta um ajuste fixo leve e é colado rigidamente no interior do soquete com cola à base de ciano-acrilato. O anel superior é fixo por parafusos ao soquete fazendo com que haja um espaçamento (*gap*) entre os espelhos cônicos. Este espaçamento, além de não permitir a criação de uma região de saturação luminosa no centro da região iluminada (Seção 4.1.1), tem como objetivo permitir a movimentação do espelho superior. O espelho superior, cuja folga diametral em relação à parede do soquete é de aproximadamente 1,5 mm, desloca-se aproximadamente 2 μm quando a tensão é aplicada nos atuadores piezoelétricos, permitindo o deslocamento de fase da luz.

4.1.4 Subsistema de Fixação e Posicionamento (SFP)

Manter-se rigidamente fixa à peça e manter rigidamente fixos entre si seus componentes internos são funções que a Roseta Óptica deve executar com eficiência. Ao mesmo tempo, flexibilidade e facilidade de ajuste e posicionamento nas diferentes formas geométricas das superfícies de medição, são características indispensáveis.

Com o objetivo de compatibilizar as necessidades acima descritas, projetou-se um conjunto de componentes responsável pela fixação, pelos ajustes e pelo posicionamento do sistema, tanto na hora da montagem do dispositivo como no

momento das medições. Tal conjunto mostrou-se versátil, de fácil manuseio e é constituído das partes mostradas na Figura 4.10.

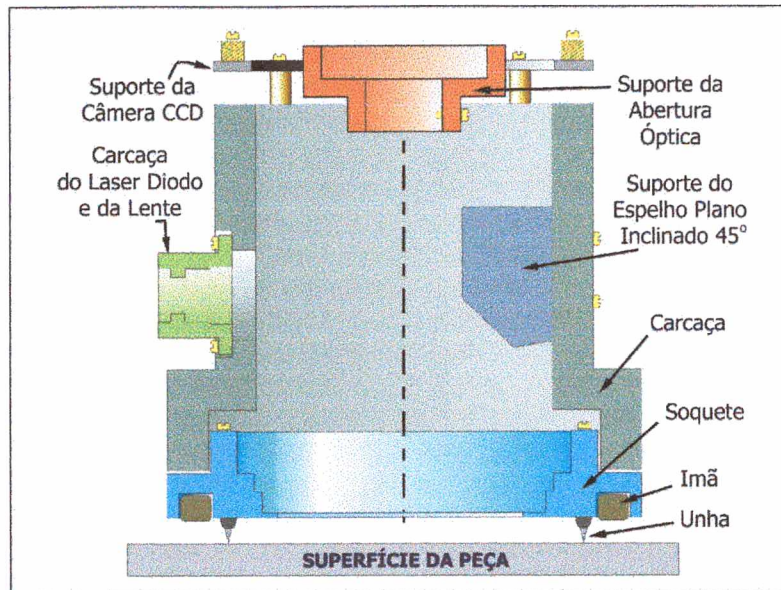


Figura 4.10 Subsistema de fixação e posicionamento

A maioria das peças do subsistema de fixação e posicionamento é fabricada em alumínio, procurando-se desta forma, reduzir a massa total do sistema e também evitar oxidação. As únicas exceções são os parafusos utilizados na montagem e as unhas de fixação. Os parafusos são confeccionados em aço inox. As unhas de fixação são fabricadas em aço rápido, proporcionando maior dureza (resistência a impactos) e menor desgaste. Todo o sistema tem uma massa aproximada de 530 g.

As unhas de fixação são pequenos cones pontiagudos que funcionam como punções de cravamento e que proporcionam uma pequena penetração na superfície da peça a medir. Cada unha está alojada na ponta de um parafuso M5 (Figura 4.11), permitindo o ajuste de altura (foco) e inclinação da Roseta Óptica em relação à superfície de medição.

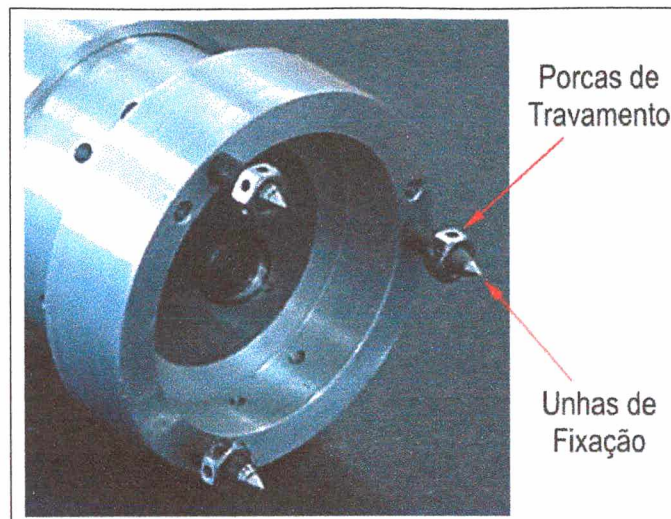


Figura 4.11 Unhas de Fixação e Porcas de Travamento

A altura ideal é obtida quando os dois círculos de luz gerados pelos espelhos cônicos estiverem concêntricos e a luz for igualmente distribuída ao longo do raio dos círculos. As porcas mostradas na Figura 4.11 servem para travar as unhas após realizados os ajustes de altura a inclinação.

Os ímãs de terras-raras são responsáveis pela força de atração entre a Roseta Óptica e a peça em estudo. Tais ímãs foram escolhidos devido à maior intensidade de seu campo magnético, em comparação com outros ímãs disponíveis no mercado. Desta forma, com pequenas áreas de contato nos ímãs de terras-raras, consegue-se grandes forças de atração; característica essencial para o bom funcionamento do sistema de fixação. Na Roseta Óptica são utilizados nove ímãs de terras-raras com 11 mm de diâmetro e 5,5 mm de altura. Os ímãs são colados no soquete com cola epoxi.

A força de atração dos ímãs de terras-raras, associada às unhas de fixação, praticamente impedem os movimentos de translação, sejam os movimentos paralelos do medidor em relação à superfície de medição, ou sejam os movimentos do centro óptico da Roseta decorrentes das deformações. Estes movimentos de translação, introduzem franjas adicionais (franjas de corpo rígido) que se misturam às franjas de tensão [12], prejudicando a qualidade das imagens captadas pela câmera.

Através do suporte da câmera CCD, mostrado na Figura 4.12, pode-se ajustar a altura da câmera, a sua centralização em relação à imagem da região iluminada e ainda sua inclinação.

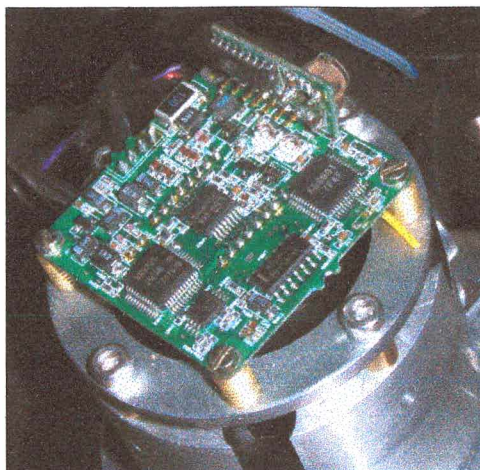


Figura 4.12 Câmera CCD, anel suporte e parafusos de ajuste

O ajuste de posição e o ajuste angular do laser diodo são feitos através da carcaça mostrada na Figura 4.13. Os parafusos Allen M2 sem cabeça servem para inclinar a carcaça em relação ao corpo do medidor, enquanto os parafusos fenda M2 auxiliam no posicionamento horizontal-vertical e prendem a carcaça ao corpo. O caminho óptico percorrido pelo feixe de laser pode ser levemente ajustado, afastando-se a carcaça do laser diodo do corpo do medidor.

A carcaça do laser diodo serve também para alojar a lente plano-côncava de expansão do feixe de laser. A lente de expansão é colada a uma pequena bucha de bronze e pode deslizar livremente no interior para que o ajuste da abertura do laser seja realizado. Após conseguido o ajuste da abertura do feixe, a bucha é travada por um parafuso Allen M2 sem cabeça.

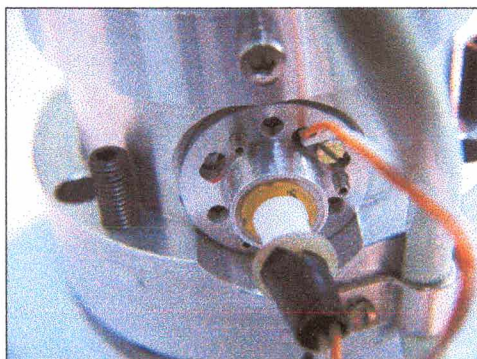


Figura 4.13 Carcaça do laser diodo

Uma tampa de alumínio é parafusada à carcaça do laser para evitar a entrada de poeira, curtos-circuitos e choques mecânicos ao laser diodo.

Já o espelho plano furado é inclinado 45° através do suporte de alumínio mostrado na Figura 4.14. O espelho plano é colado ao suporte com cola a base de ciano-acrilato. Este suporte é fixado ao corpo da Roseta Óptica por três parafusos M3. O suporte do espelho plano não possui dispositivos de ajuste.

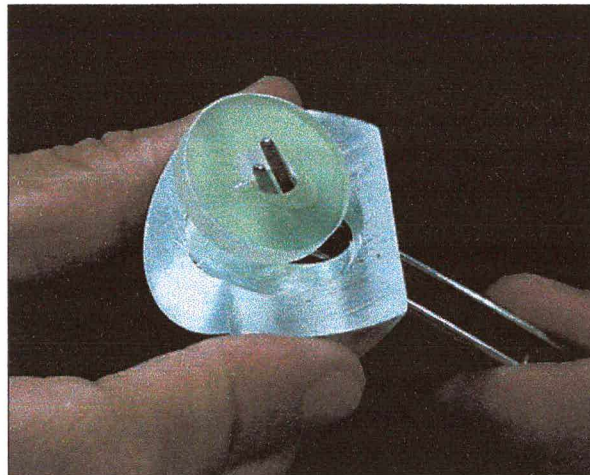


Figura 4.14 Espelho plano furado e suporte 45°

4.1.5 Alinhamento dos componentes internos

Os alinhamentos realizados nos subsistemas de iluminação, deslocamento de fase e visualização não apresentaram problemas, pois a construção mecânica do corpo da Roseta Óptica garante, por si só, um ótimo pré-alinhamento de todos os componentes internos. Os ajustes finos, pequenos deslocamentos e inclinações, são realizados através dos mecanismos descritos na seção anterior.

4.1.6 Interface de Alimentação e Controle (IAC)

A Figura 4.15 apresenta uma idéia básica da interface de alimentação e controle e a suas ligações com os demais subsistemas.

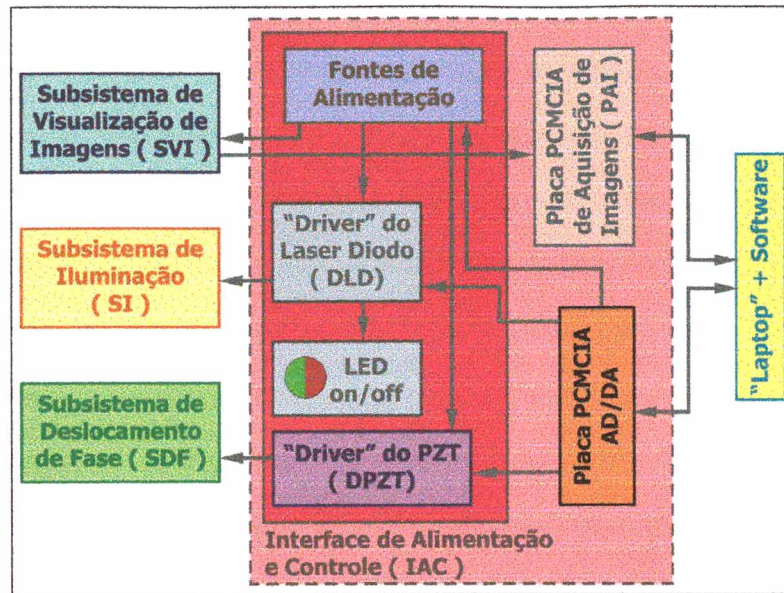


Figura 4.15 Relações da interface de alimentação e controle

A eletrônica utilizada para comandar a Roseta Óptica é composta pelos seguintes componentes: fontes de alimentação de +5 V, +12 V e -45 V; placa PCMCIA DAQCard-1200 da National Instruments; placa PCMCIA de aquisição de imagens modelo *Video Port Professional* da MRT Micro; *driver* para o laser diodo modelo PLD-500 da Wavelength Electronics e *driver* para controle dos atuadores piezoelétricos.

Grande parte da eletrônica utilizada na Roseta Óptica foi baseada na eletrônica do Medidor de Tensões Residuais – MTRES [3]. Seguem alguns comentários sobre os componentes da interface de alimentação e controle:

- *Driver* de controle dos atuadores piezoelétricos (PZTs): o *driver* de controle dos PZTs é um circuito amplificador-inversor que controla o nível de tensão imposto aos PZTs no momento do deslocamento de fase (Seção 4.1.3). O método de aquisição dos mapas de fase requer 5 imagens tomadas com 5 valores de fase defasados de 90°. Estes 90° correspondem a aproximadamente 10 V impostos aos PZTs [3]. Os piezoatuadores são controlados pela fonte de alimentação de -45 V, em razão da alta tensão requerida para o seu funcionamento. O nível

de tensão enviado da fonte para os PZTs é controlado através da placa PCMCIA DAQCard 1200.

- Driver e Circuito de controle do laser diodo: o controle de potência do laser diodo é realizado através de um circuito elétrico comandado via software pela placa AD/DA. Este circuito, por sua vez, controla o driver PLD-500. O *driver* PLD-500 controla o laser diodo através da corrente e é alimentado pela fonte de +5 V. A corrente máxima suportada pelo laser diodo é de 120 mA. Por razões de segurança o driver PLD-500 foi ajustado para uma corrente máxima de 100 mA.
- LED indicador do laser On/Off: A radiação emitida pelo laser diodo é invisível para os olhos humanos (infravermelho) e caso o feixe de laser seja emitido diretamente para os olhos nus, danos graves à visão podem ser causados. Desta forma, para que se tenha segurança no momento da operação é importante que o medidor seja dotado de um mecanismo de alerta que indique que o laser está ligado. O *driver* PLD-500 fornece tal indicação. Porém, este dispositivo está enclausurado em uma caixa metálica junto com todos os outros componentes eletrônicos da interface de alimentação e controle (IAC), não sendo possível visualizar o sinal de perigo. Para resolver tal problema, dois LEDs de duas cores (verde/vermelha) foram instalados; um deles na carcaça da caixa metálica da IAC e o outro na parte superior da Roseta Óptica. Os dois LEDs estão ligados diretamente ao *driver* PLD-500 e mudam de cor de acordo com o acionamento do laser diodo: emitem luz verde quando o laser está desligado e luz vermelha quando o laser está em operação.

A câmera CCD é alimentada pela fonte de +12 V e a placa de aquisição de imagens é responsável por captar as imagens da região iluminada.

A interface de alimentação e controle é a ligação entre o microcomputador e o dispositivo de medição.

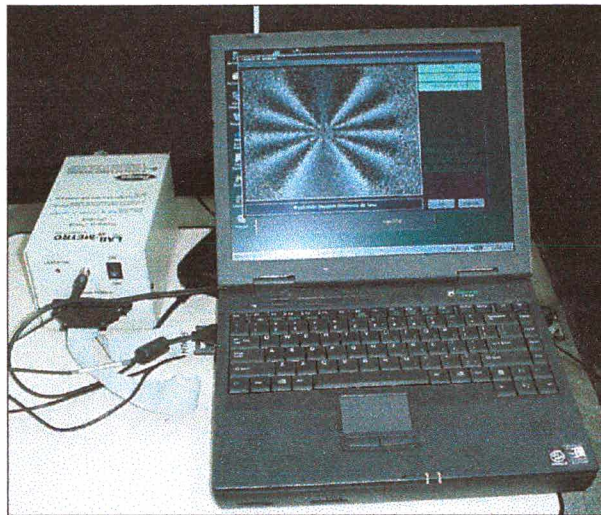


Figura 4.16 *Laptop e caixa da Interface de Alimentação e Controle*

4.1.7 A Interface do Software de Medição

Em paralelo ao desenvolvimento do primeiro protótipo da Roseta Óptica foi desenvolvida uma nova interface para o software de medição, visando obter uma interface amigável, de fácil utilização para o operador e que apresente os resultados da medição em formas gráficas, facilitando a compreensão do usuário.

Todas as operações da Roseta Óptica são comandadas via software, possibilitando medições em locais de difícil acesso para o operador.

A Figura 4.17 mostra as funções desempenhadas pelo software. Em seguida tem-se a descrição de cada função.

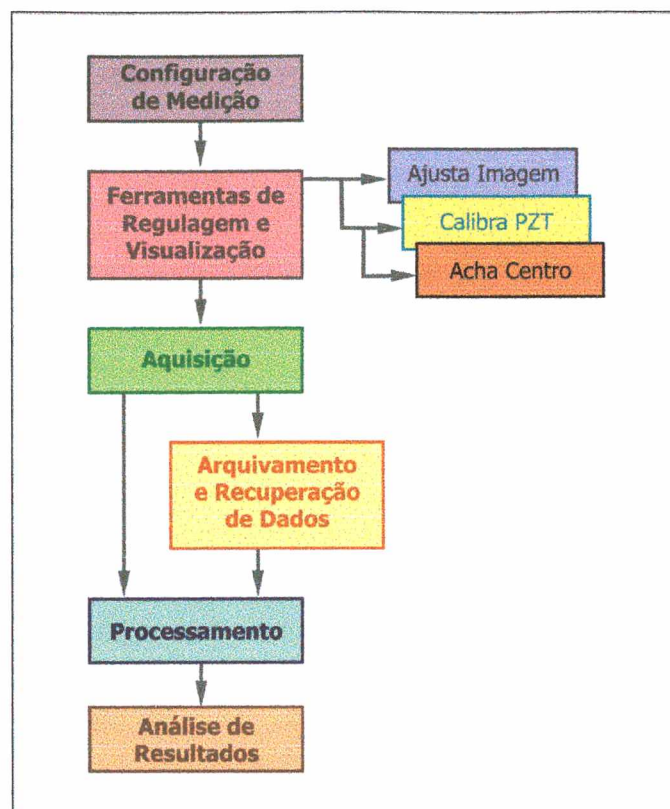


Figura 4.17 Funções do software de medição

1. Configuração de Medição: Antes de iniciar qualquer medição ou qualquer processamento de imagens adquiridas anteriormente, o usuário deve configurar alguns parâmetros importantes que serão levados em conta no cálculo das tensões. Na Figura 4.18, por exemplo, é mostrada a tela de configuração das propriedades do material. Esta tela permite que o usuário tenha uma lista dos materiais mais utilizados e suas propriedades (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e tensões de escoamento e ruptura). Pode-se editar os valores das propriedades e adicionar ou remover materiais da lista. Na seção de configuração da medição pode-se ainda configurar o método de cálculos da tensões: método dos harmônicos ou o método dos mínimos quadrados. Por último, seleciona-se os limites da região de amostragem e o número de pontos que serão analisados na imagem no momento do processamento das tensões. A Figura 4.19 mostra um exemplo de região de amostragem de 4 anéis

com 28 pontos cada e mostra também os raios interno e externo desta região. Comumente, utiliza-se 12 anéis com 512 pontos de amostragem por anel.

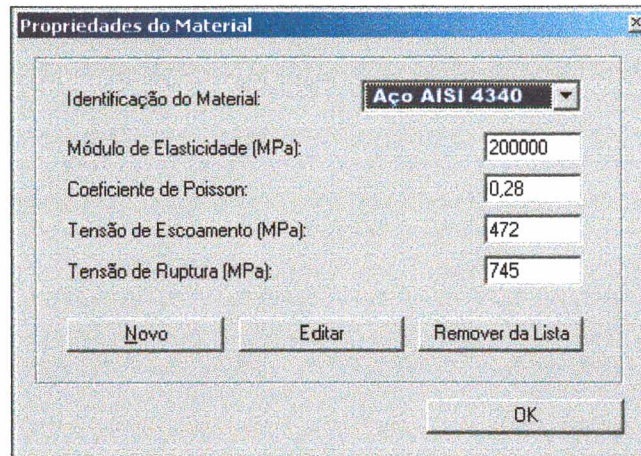


Figura 4.18 Tela de configuração das propriedades do material em estudo

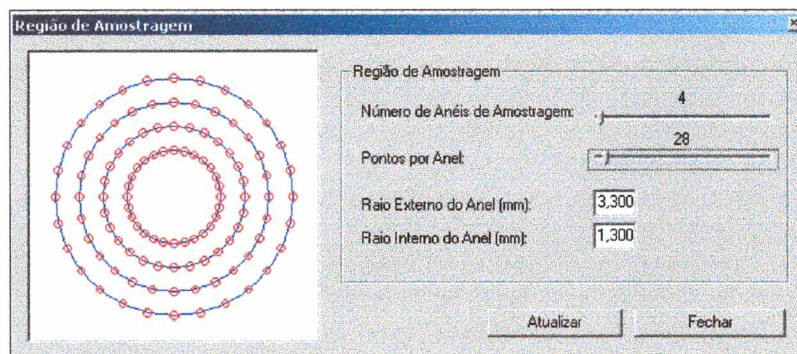


Figura 4.19 Tela de configuração da região de amostragem

2. Ferramentas de Regulagem e Visualização: Após realizada a etapa de configuração da medição deve-se ligar o laser diodo para que a imagem da região iluminada possa ser ajustada para a medição. Existem três ferramentas de ajuste: ajuste de imagem, calibração dos PZTs e “acha centro” da imagem.

No ajuste da imagem regula-se o brilho e o contraste da imagem ao vivo evitando-se a saturação da imagem. Pontos da imagem são considerados

saturados quando atingem o nível mínimo ou máximo da escala de nível de cinza. Um algoritmo de cores falsas mostra quando a imagem está saturada. A cor azul representa pontos da imagem saturados no nível de cinza mínimo (preto ou 0) e a cor vermelha representa pontos que atingiram o nível de cinza máximo (branco ou 255). Com a ferramenta de ajuste de imagem consegue-se fazer com que todos os pontos encontrem-se devidamente distribuídos na escala de nível de cinza.

Realizado o ajuste de imagem, parte-se para a calibração dos PZTs. A calibração dos PZTs é feita para que se possa sincronizar o nível de tensão imposto aos atuadores piezoelétricos com a mudança de fase provocada na imagem.

Por último, franjas de corpo rígido são utilizadas para determinar o centro da região iluminada circular da imagem, a partir do qual será definida a região de amostragem. O centro da imagem pode ser encontrado a partir de uma única imagem das franjas de corpo rígido ou várias imagens podem ser utilizadas para tal operação. No último caso, as médias das coordenadas X e Y são utilizadas como centro da imagem.

As ferramentas de calibração dos PZTs e “acha centro” não necessitam ser utilizadas a cada nova medição. É importante que se utilize a ferramenta para achar o centro toda vez que o ajuste de altura ou inclinação do medidor seja modificado. Teoricamente, a calibração dos PZTs deveria ser realizada apenas na primeira vez que a Roseta Óptica fosse utilizada, mas no estágio atual do protótipo, recomenda-se executá-la toda vez que o raio de curvatura da superfície a medir for muito diferente do raio de curvatura da medição anterior.

3. Aquisição: Após realizadas as etapas de regulagem, inicia-se o processo de medição. A medição realizada pela Roseta Óptica é uma medição relativa, pois necessita de uma referência. Por isso, a fase de uma imagem inicial deve ser adquirida antes da aplicação do carregamento na peça em estudo. A primeira imagem adquirida é chamada de imagem de referência.

Após a aquisição da imagem de referência, aplica-se o carregamento final na peça. Neste instante, o software pode ser colocado no modo de imagem “franjas ao vivo”. Neste modo é possível visualizar, em tempo real, a ação do carregamento sobre a peça através das franjas de interferência que vão se formando na tela. O modo “franjas ao vivo” é uma ferramenta de extrema importância, pois se percebe instantaneamente o comportamento da peça, podendo-se controlar o número de franjas da imagem a ser adquirida. A experiência mostra que até 10 pares de franjas podem ser processadas com facilidade, levando a bons resultados no processamento. Quando o carregamento aplicado produz um número muito alto de franjas na imagem, prejudicando a sua qualidade, o carregamento pode ser dividido em várias etapas intermediárias com menores incrementos de carga. Estas etapas podem ser depois combinadas para levar ao resultado final. Com o número de franjas na imagem definido ou com a aplicação do carregamento terminada, adquire-se a segunda imagem.

4. Arquivamento e Recuperação dos Dados: As imagens captadas pela placa de vídeo podem ser salvas a qualquer momento. As imagens salvas podem ser reprocessadas, sejam elas imagens de fase ou os próprios mapas das diferenças de fase. Os relatórios gravados no computador podem ser lidos ou impressos, mas não podem ser modificados pelo sistema.
5. Processamento: O processamento das imagens adquiridas é realizado subtraindo-se o mapa de fase final (imagem da peça com carregamento final aplicado) do mapa de fase inicial (imagem de referência). A remoção do salto de fase é realizada aqui pelo método da “inundação ponderada”, adaptado a partir do método proposto por Anand Asundi [50]. Na Figura 4.20 vê-se um mapa da diferença de fase processado pelo software da Roseta Óptica.
6. Análises do resultados: O mapa da diferença de fases da Figura 4.20 é uma imagem real obtida pela Roseta Óptica num ensaio de tração. Após o

processamento do mapa da diferença de fases os resultados são apresentados nas formas numérica e gráfica.

No lado direito da tela de processamento estão os campos onde aparecem os valores numéricos dos resultados calculados (Figura 4.20).

As setas de cores azul e vermelha, que aparecem sobre a imagem somente após o processamento, indicam as direções e intensidades proporcionais das tensões principais calculadas. A seta de cor laranja indica a direção dos deslocamentos de corpo rígido (translações). Estas setas podem ser retiradas da imagem de acordo com a necessidade do usuário.

As linhas de cores amarela e verde aparecem na tela quando o usuário clica e arrasta o indicador do *mouse* sobre o mapa da diferença de fases. Ao arrastar o indicador do *mouse* sobre a figura, tem-se no lado direito da tela uma leitura instantânea dos valores das tensões cartesianas $\sigma_x (S_x)$, $\sigma_y (S_y)$ e $\tau_{xy} (T)$; de acordo com o ângulo alcançado com a movimentação do *mouse* sobre a tela. Os valores das deformações $\varepsilon_x (E_x)$, $\varepsilon_y (E_y)$ e $\gamma_{xy} (G)$ correspondem às tensões cartesianas e também se modificam com a movimentação do *mouse*.

Os resultados do processamento são também apresentados na forma do Círculo de Mohr.

Uma outra forma interessante de apresentação dos resultados é a retirada das franjas de corpo rígido do mapa da diferença de fases. Com a retirada dessas franjas, apenas as franjas referentes ao carregamento permanecem na imagem (Figura 4.21).

Todos os resultados obtidos podem ser apresentados na forma de um relatório gerado no próprio software. Um exemplo do relatório emitido pelo software pode ser encontrado no Anexo B.

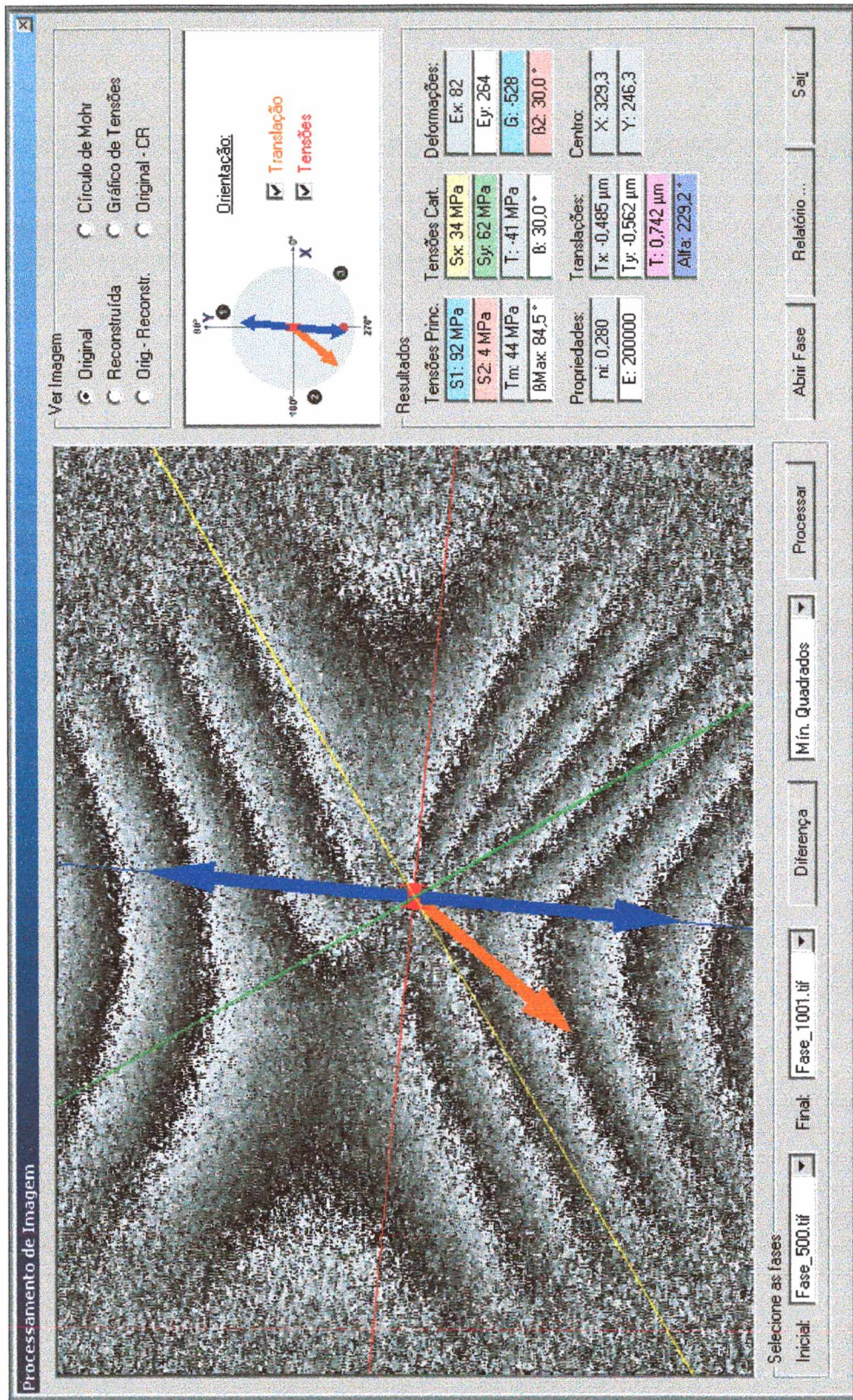


Figura 4.20 Tela de processamento

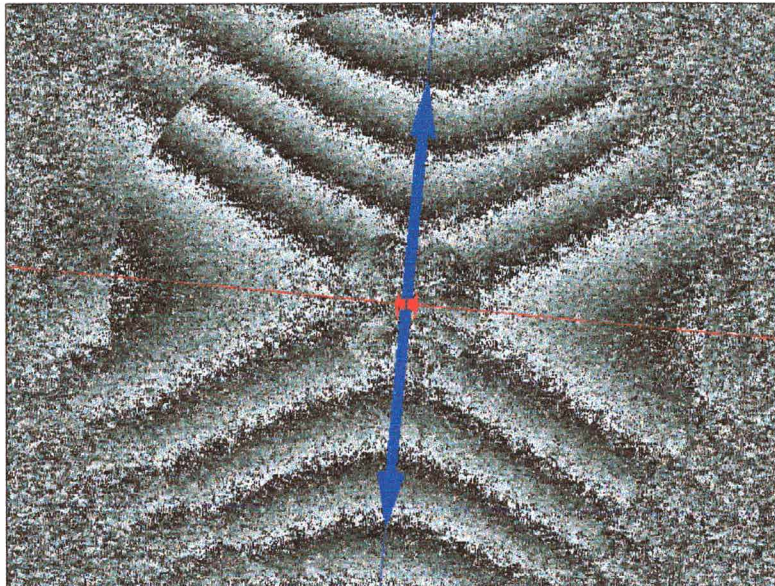


Figura 4.21 Imagem do ensaio de tração sem franjas de corpo rígido

Capítulo 5

Experimentos Realizados e Resultados Obtidos

Após a montagem completa do primeiro protótipo da Roseta Óptica, alguns ensaios foram realizados objetivando-se avaliar seu comportamento operacional e metrológico. A maior parte dos testes foram realizados em ambiente laboratorial. Adicionalmente, a Roseta Óptica foi submetida também a um teste em campo.

5.1 Ensaios utilizando-se o Interferômetro de Michelson

Neste experimento, um interferômetro de Michelson foi utilizado como padrão para que se pudesse analisar os deslocamentos medidos pela Roseta Óptica.

O interferômetro de Michelson é um arranjo óptico, capaz de medir deslocamentos com elevada resolução. Cada ordem de franja corresponde a deslocamentos de metade do comprimento de onda do laser utilizado [44]. O esquema básico de um interferômetro de Michelson é mostrado na Figura 5.1.

Um feixe de laser He-Ne é originado no ponto P percorrendo o caminho até o divisor de feixe (DF), onde é dividido em dois outros que, por sua vez, percorrem trajetórias distintas. O feixe do braço móvel percorre a distância d_1 até atingir o espelho móvel (EM), onde é refletido de volta, atravessa novamente o divisor de feixe até atingir o anteparo. O outro feixe, o do braço fixo, percorre a distância d_2 até atingir o espelho fixo (EF), retornando ao divisor de feixe (DF), onde é desviado

também para o anteparo. Nesse processo, a diferença entre os caminhos ópticos nos braços do interferômetro é $2(d_1-d_2)$, e uma figura de interferência, tal como a Figura 3.4, poderá ser vista no anteparo tela através da câmera de vídeo.

Na montagem experimental utilizada, um atuador piezoelétrico, fabricado pela empresa Physik Instrumente, é acoplado ao espelho móvel de forma a provocar pequenos deslocamentos neste espelho. De acordo com os deslocamentos provocados no espelho móvel, as franjas de interferência visualizadas no anteparo movimentam-se. Esta movimentação das franjas é cíclica e se repete toda vez que o espelho EM é movimentado para frente ou para trás, numa distância de meio comprimento de onda do laser. Isto significa que a cada distância igual a meio comprimento de onda que o espelho móvel é deslocado, as franjas de interferência são movimentadas em uma Ordem de Franja (OF) (Seção 3.2).

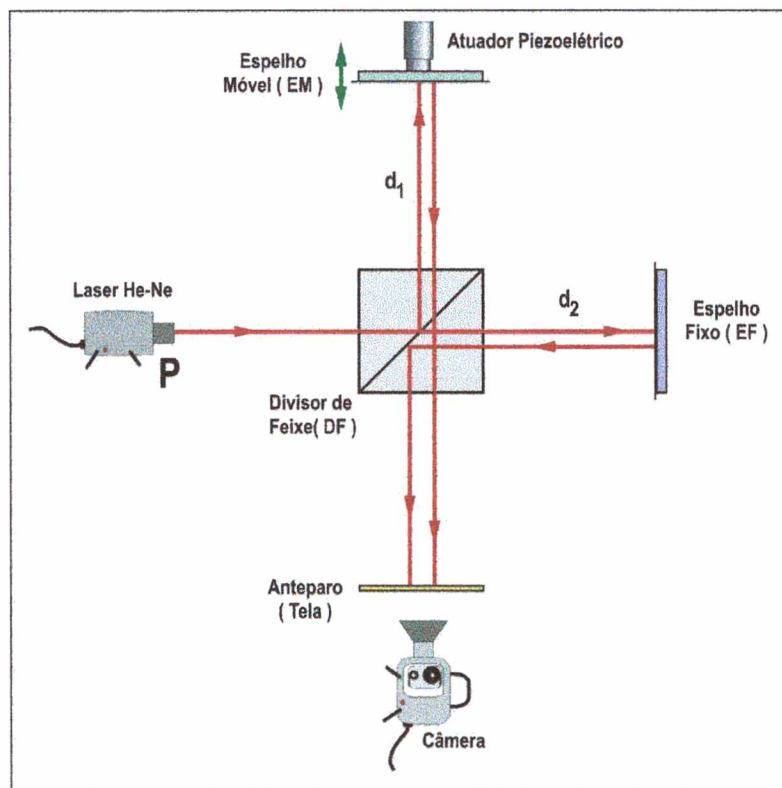


Figura 5.1 Interferômetro de Michelson

Desta forma, contando-se o número de franjas (OF) que passam no anteparo e, multiplicando-se este número pelo valor de meio comprimento de onda

(Equação 5.1), determina-se o deslocamento aplicado ao espelho (EM) pelo atuador piezoelétrico. O comprimento de onda (λ) do laser He-Ne utilizado neste experimento é de 632,8 nm.

$$d = \frac{1}{2} \lambda OF \quad (5.1)$$

O controle do atuador piezoelétrico, responsável direto pela movimentação do espelho, é realizado por um *driver* também fabricado pela empresa Physik Instrumente [45] composto por dois módulos: um módulo D/A Converter E-255.60 e o outro módulo PZT Control E-809.0. Este *driver* é controlado através da saída serial de um computador, aplicando-se um sinal analógico entre 0 e 10 V na entrada do amplificador do atuador piezoelétrico.

Dois pequenos softwares, desenvolvidos em Visual Basic, foram utilizados no experimento: um deles controla a aplicação da tensão no atuador piezoelétrico e o outro conta o número de franjas que passam na tela enquanto a tensão é aplicada ao PZT.

No entanto, considerando-se os aspectos metrológicos, o interferômetro de Michelson somente poderia ser utilizado como padrão de deslocamentos para calibrar a Roseta Óptica caso suas incertezas fossem não superiores a 10% das incertezas esperadas para a Roseta Óptica [46].

Seguindo-se a orientação acima descrita, uma pequena modificação foi introduzida ao interferômetro de Michelson (Figura 5.2).

O espelho móvel (EM) foi inclinado em relação ao feixe do interferômetro, e mais um espelho fixo (EFI) foi adicionado à montagem. Os espelhos EFI e EMI estão dispostos um de frente para o outro, provocando várias reflexões (Figura 5.2).

As várias reflexões provocam um aumento de sensibilidade do interferômetro, ou seja, o número de franjas é maior para um incremento menor de deslocamento.

Foi realizada uma comparação entre as sensibilidades dos interferômetros comum (Figura 5.1) e modificado (Figura 5.2). A mesma rampa de tensão, de 0 a 10 V, foi aplicada às duas configurações. O incremento de tensão entre cada passo da rampa foi de 5 mV.

O aumento de sensibilidade alcançado com o interferômetro modificado foi de 11,5 vezes, ou seja, para um mesmo incremento de tensão aplicado ao atuador piezoelétrico no interferômetro comum tem-se a passagem de apenas uma franja no anteparo, enquanto que, no interferômetro modificado passam aproximadamente 11,5 franjas.

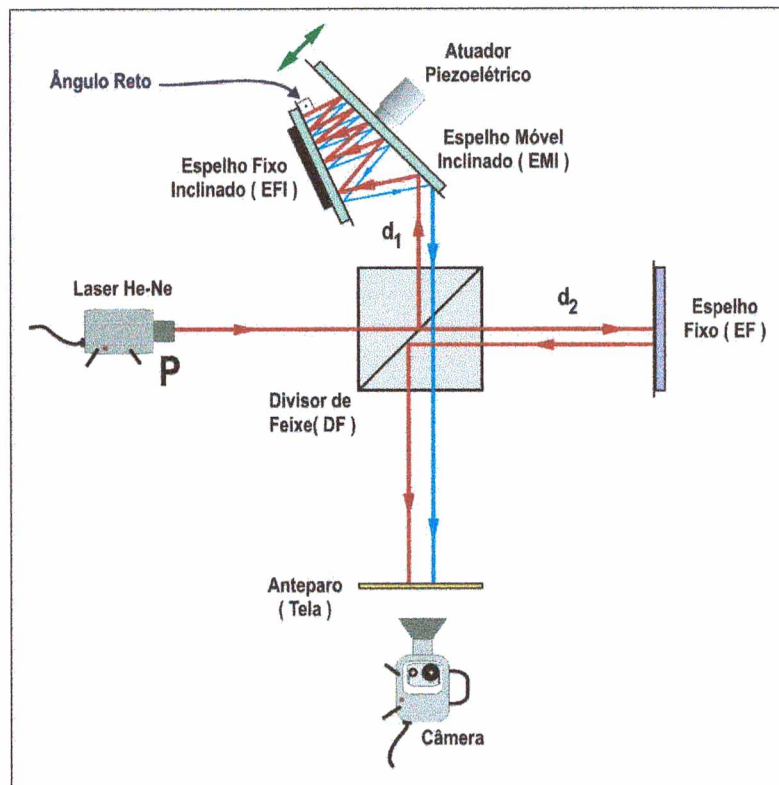


Figura 5.2 Interferômetro de Michelson Modificado ¹

Esse aumento de sensibilidade reflete-se numa maior resolução do interferômetro modificado. Para cada ordem de franja que passa na tela do interferômetro comum, tem-se um deslocamento do espelho equivalente a 316,4 nm. Já no interferômetro modificado, para cada ordem de franja que passa, tem-se um deslocamento equivalente a 27,6 nm.

¹ O feixe de laser que é desviado pelo divisor (DF) para os espelhos inclinados, retorna pelo mesmo caminho ao tocar o espelho fixo inclinado (EFI) com um ângulo de 90°. A cor azul, que representa a volta do feixe, é um artifício apenas ilustrativo.

De acordo com a Equação 3.13, para cada ordem de franja da Roseta Óptica tem um deslocamento correspondente a aproximadamente 408,3 nm, considerando-se 785 nm de comprimento de onda do laser diodo e φ igual a 74°.

Tabela 5.1 Comparação dos resultados obtidos com as duas configurações do Interferômetro de Michelson

Número da Medição	Deslocamentos medidos pelo Interferômetro de Michelson Comum [μm]	Deslocamentos medidos pelo Interferômetro de Michelson Modificado [μm]
01	1,474	1,480
02	1,474	1,481
03	1,500	1,482
04	1,490	1,485
05	1,487	1,481
Média:	1,485	1,482
Desvio Padrão :	0,011	0,002

Comparando-se os resultados do interferômetro de Michelson comum com os resultados do interferômetro modificado, chegou-se a $\pm 0,031 \mu\text{m}$ de repetitividade para o interferômetro comum e $\pm 0,006 \mu\text{m}$ de repetitividade para o interferômetro modificado. Percebe-se que o interferômetro modificado apresenta um valor de repetitividade cinco vezes menor que o encontrado no interferômetro comum. Idealmente, para que o interferômetro de Michelson modificado possa ser utilizado como padrão, sua incerteza, de acordo com [46], deveria ser menor que 1/10 da incerteza esperada para a Roseta Óptica.

Para que a comparação entre os deslocamentos medidos pela Roseta Óptica e pelo interferômetro modificado fosse possível, o dispositivo mostrado na Figura 5.3 foi montado.

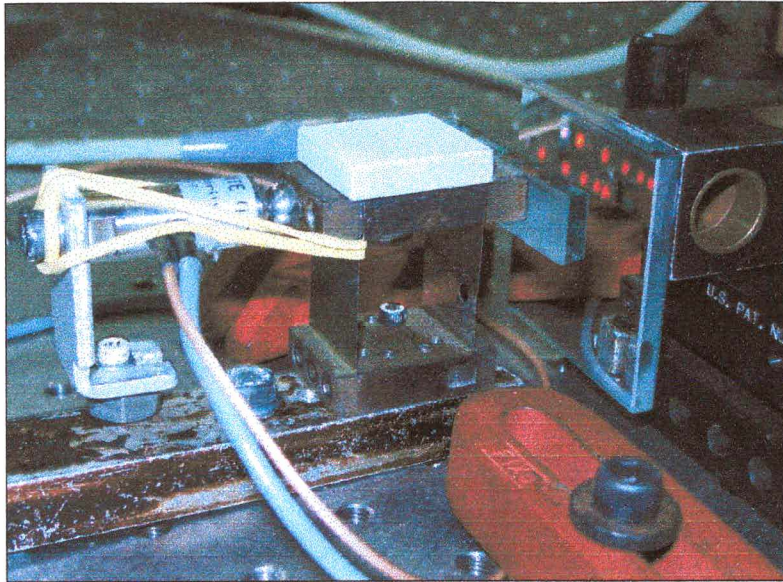


Figura 5.3 Detalhe do interferômetro de Michelson modificado, mostrando os espelhos inclinados, o atuador piezoelétrico e a plataforma branca de medição

A Roseta Óptica, com o auxílio de um suporte externo, foi posicionada sobre a placa de alumínio, como mostra a Figura 5.4. A Roseta Óptica foi ajustada e uma imagem de referência, com a plataforma parada, foi adquirida. Uma variação em rampa de tensão entre 5 a 6 V foi aplicada ao atuador piezoelétrico, movimentando a plataforma. A imagem obtida com a Roseta Óptica é mostrada na Figura 5.5. A seta de cor laranja indica a direção do deslocamento.

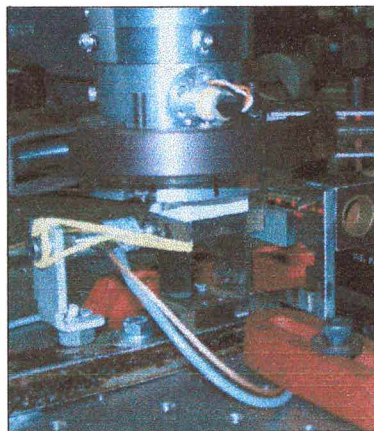


Figura 5.4 Roseta Óptica posicionada sobre a plataforma de cor branca do interferômetro de Michelson modificado

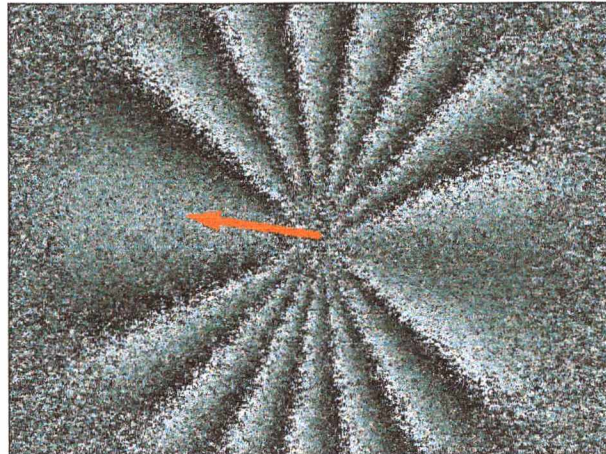


Figura 5.5 Franjas de corpo rígido originadas no interferômetro de Michelson

Neste experimento, foram realizadas 5 medições de deslocamentos. A comparação entre os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Resultados obtidos no experimento com o interferômetro de Michelson modificado

Número da Medição	Deslocamentos medidos pelo Interferômetro de Michelson Modificado [μm]	Deslocamentos medidos com a Roseta Óptica [μm]
01	1,480	1,486
02	1,481	1,480
03	1,482	1,485
04	1,485	1,479
05	1,481	1,478
Média:	1,482	1,482
Desvio Padrão :	0,002	0,004

Analisando-se as médias das medições, nota-se que a Roseta Óptica apresenta um excelente resultado em comparação com o padrão utilizado, pois não há diferença entre as médias dos resultados obtidos. No entanto, a Roseta Óptica apresentou maior dispersão dos resultados, mas ainda considerado muito bom.

5.2 Ensaios realizados em uma Máquina de Tração

Uma máquina para ensaios de tração e um corpo de prova instrumentado com extensômetros foram utilizados para verificar os resultados das medições da Roseta Óptica em termos de tensões e deformações.

O corpo de prova (Figura 5.6) foi fabricado em aço AISI 4340 [47] [48] que tem, tipicamente, as seguintes propriedades mecânicas: Módulo de Elasticidade (E) de (200 ± 10) GPa e Tensão de Escoamento (σ_e) de (472 ± 24) MPa. A máquina de tração utilizada tem capacidade máxima de carga de 100 kN.

A área da seção transversal (A) do corpo de prova é igual a (301 ± 4) mm². A partir dos dados acima, chega-se a um valor de aproximadamente 332 MPa para a tensão máxima que pode ser aplicada àquele corpo de prova com a máquina de tração utilizada. Este valor da tensão máxima equivale a 1660 $\mu\text{m/m}$ de deformação específica.

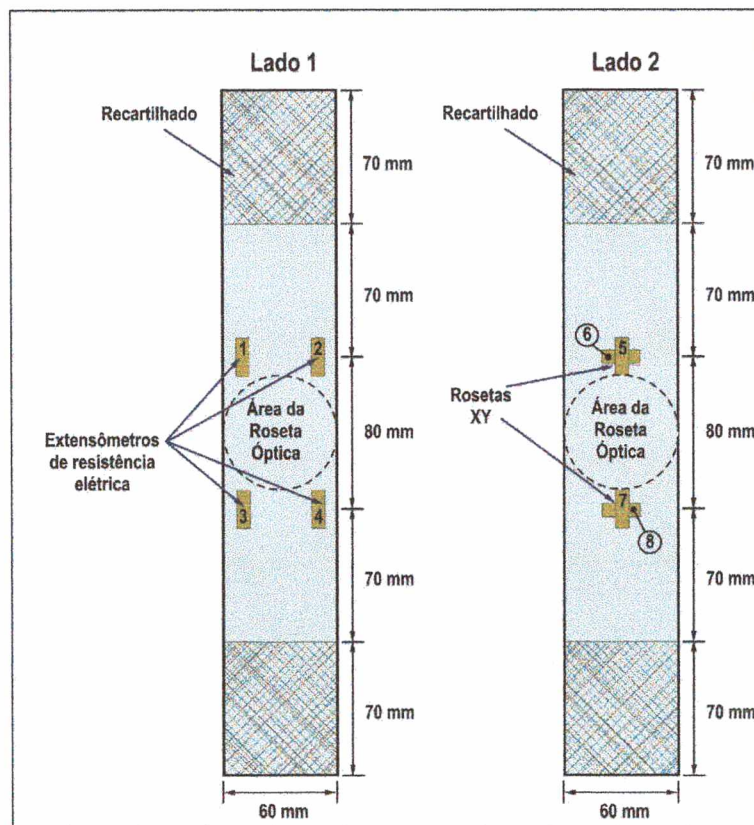


Figura 5.6 Corpo de prova de tração e disposição dos extensômetros

Note que o valor da tensão máxima alcançada por esta máquina de tração, considerando as características do corpo de prova, atinge somente 70% do valor da tensão de escoamento do material. Desta forma, considera-se a realização deste ensaio dentro do regime elástico do material.

A Roseta Óptica foi fixada na parte central do corpo de prova (Figura 5.6). Numa das faces do corpo de prova foram colados 4 extensômetros de resistência uniaxiais e, na outra, duas rosetas extensométricas do tipo XY (Figura 5.6). Estes extensômetros foram devidamente ligados a uma ponte de Wheatstone [6] da Hottinger Baldwin Messtechnik - HBM, modelo MCGplus [49]. Os resultados obtidos pelos extensômetros e pela Roseta Óptica serão comparados posteriormente.

Note que os extensômetros colados ao corpo de prova são identificados por números. Os extensômetros de números 1, 2, 3, 4, 5, e 7 estão orientados da mesma forma, devendo apresentar indicações de deformação aproximadas. Os extensômetros de números 6 e 8 estão dispostos transversalmente aos demais. Através dos valores de deformação fornecidos por estes extensômetros, pode-se calcular o valor do Coeficiente de Poisson (ν) (Seção 2.2) do material do corpo de prova. O valor médio do Coeficiente de Poisson obtido nos experimentos foi de 0,28, valor este, que se encontra dentro da faixa de 0,27 a 0,30, especificada para este material [47].

A Figura 5.7 mostra a Roseta Óptica fixada ao corpo de prova já instalado na máquina de tração.

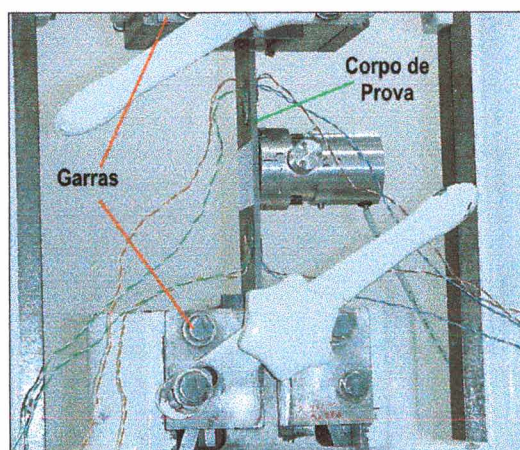


Figura 5.7 Roseta Óptica preparada para o ensaio de tração

A seguir, tem-se a descrição do ensaio:

- O corpo de prova foi acoplado e travado às garras da máquina tração. Suas extremidades foram recartilhadas (Figura 5.6), com o intuito de evitar o escorregamento entre o corpo de prova e as garras no momento da aplicação de carga.
- A ponte foi devidamente configurada e os extensômetros foram ligados aos oito canais da ponte da HBM, utilizando-se a configuração de meia ponte [49]. Em seguida, os canais foram zerados.
- A Roseta foi instalada e devidamente ajustada sobre o corpo de prova. Note que a Roseta Óptica está na posição transversal (Figura 5.7). Os imãs de terras-raras apresentaram um bom resultado na fixação da Roseta, no que diz respeito à força de atração com o corpo de prova.
- O carregamento foi aplicado manualmente e de forma suave, através do comando manual da máquina de tração (manivela). Os comandos automáticos da máquina imprimem uma velocidade muito alta de carregamento, dificultando paradas em pontos pré-determinados. Utilizando-se o avanço manual controla-se a máquina com maior facilidade, parando-se o carregamento nos pontos desejados. O nível de carregamento aplicado ao corpo de prova é controlado através do mostrador digital da ponte da HBM.
- Um pré-carregamento foi aplicado ao corpo de prova antes de começarem as medições com a Roseta Óptica. O nível de carga inicial adotado foi o de $500 \mu\text{m/m}$, o que corresponde a uma tensão inicial da ordem de 100 MPa. Neste ponto, adquiriu-se a imagem de referência.
- A partir deste momento, o carregamento foi sendo realizado de forma incremental, utilizando-se $100 \mu\text{m/m}$ (20 MPa) como incremento de carga. A cada passo de carga aplicado, uma nova imagem era adquirida e as leituras dos oito canais dos extensômetros eram anotadas.
- O carregamento foi realizado em 5 passos de $100 \mu\text{m/m}$, resultando em cerca de 100 MPa de carregamento total.

A seguir, serão mostrados os resultados de três ensaios realizados com o eixo Y da Roseta Óptica, posicionado aproximadamente, na direção do carregamento aplicado. A Figura 5.8 mostra uma das seqüências de imagens obtidas neste ensaio.

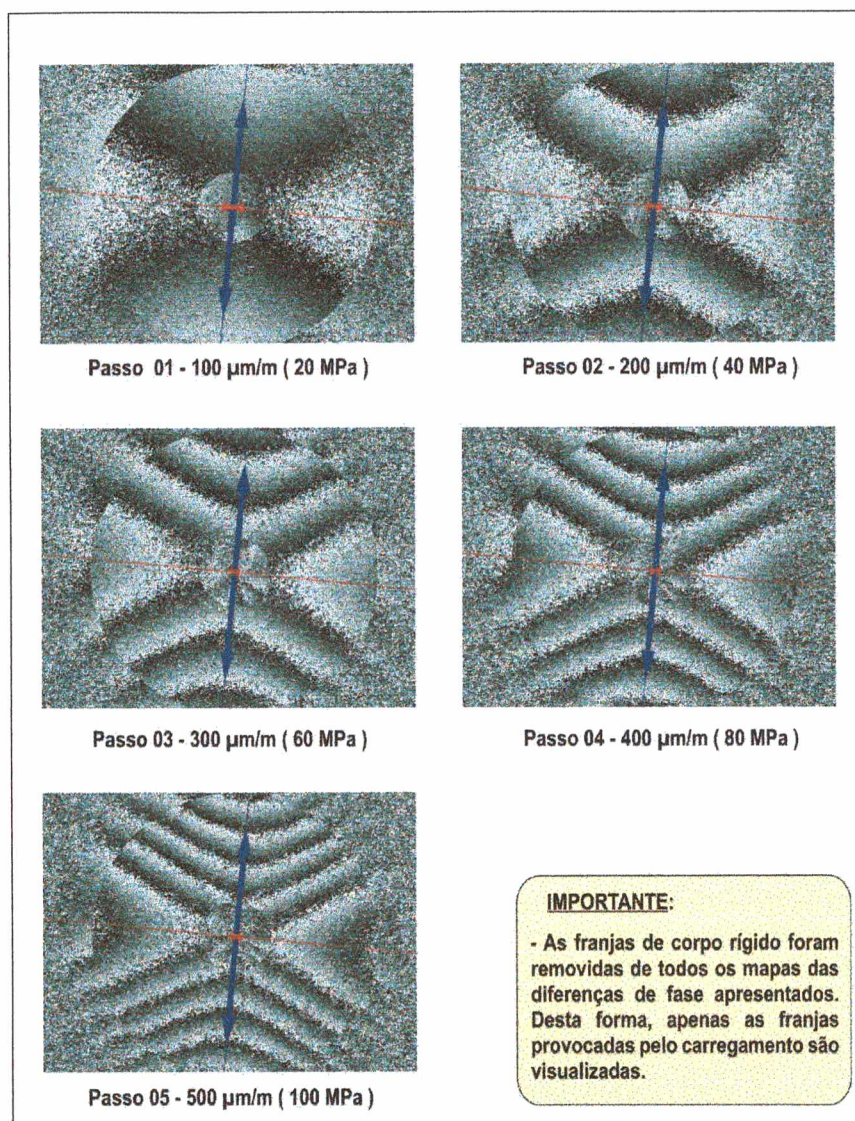


Figura 5.8 Seqüência de imagens adquiridas no decorrer do carregamento

A título de ilustração a Figura 5.9 mostra o mapa das diferenças de fase do último passo da Figura 5.8 sem a remoção das franjas de corpo rígido. Embora as franjas de corpo rígido possam ser totalmente removidas pelo software de medição, sua presença é indesejada por aumentar muito a densidade de franjas, forçando o

usuário a aplicar menores incrementos de carregamento para que se mantenha a boa qualidade da imagem a ser processada.

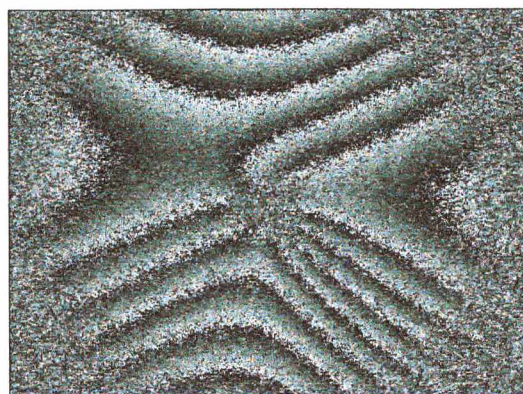


Figura 5.9 - Passo 05 da Figura 5.8 sem a remoção das franjas de corpo rígido

Nas tabelas 5.3 e 5.4, estão apresentados os resultados obtidos com os extensômetros de resistência e a Roseta Óptica, respectivamente.

Os resultados foram obtidos em três carregamentos sucessivos. Para cada passo do carregamento foram lidas as deformações de cada extensômetro (Anexo C) e adquiridas as imagens da Roseta Óptica.

Depois de terminado o primeiro ensaio, o corpo de prova foi descarregado até o nível inicial e o segundo ensaio foi iniciado. O mesmo aconteceu para o terceiro ensaio.

Tabela 5.3 Resultados acumulados obtidos com os extensômetros

Carga [MPa]	Resultados dos Ensaiois [MPa]		
	n. 01	n. 02	n. 03
Passo 1	22,2	19,9	20,6
Passo 2	40,1	40,0	40,6
Passo 3	58,4	60,0	60,7
Passo 4	78,7	79,6	80,4
Passo 5	98,8	99,8	99,7

Tabela 5.4 Resultados acumulados obtidos com o processamento das imagens da Roseta Óptica

Carga [MPa]	Resultados dos Ensaios [MPa]		
	n. 01	n. 02	n. 03
Passo 1	18,2	18,0	18,3
Passo 2	35,4	36,3	36,6
Passo 3	53,3	55,5	54,4
Passo 4	73,0	74,8	73,7
Passo 5	94,9	95,1	92,4

Como o controle do carregamento na máquina de tração é manual, fica bastante difícil alcançar pontos exatamente iguais de carregamento em cada ensaio. Tome como exemplo o primeiro nível de carregamento, que atingiu os valores de 22,2 MPa, 19,9 MPa e 20,6 MPa para os ensaios 1, 2 e 3, respectivamente, enquanto que o objetivo era alcançar o valor de 20 MPa para todos os três carregamentos.

Desta forma, para que fosse possível comparar os resultados, obteve-se as equações de correlação para cada ensaio, com as quais foi possível normalizar os níveis de carregamento. A Figura 5.10 mostra o gráfico de correlação para os dados do primeiro ensaio e a Tabela 5.5 apresenta as equações de correlação para os três ensaios realizados.

Tabela 5.5 Equações de correlação

Número do Ensaio	Equação de Correlação	Coefficiente de Correlação ⁽²⁾
Ensaio n. 1	$y = 0,9963x - 4,4622$	0,9994
Ensaio n. 2	$y = 0,9664x - 1,9072$	0,9996
Ensaio n. 3	$y = 0,9357x - 1,4372$	0,9996

² O valor do Coeficiente de Correlação pode ser interpretado como a proporção da variância em Y que pode ser atribuída à variância em X. Quanto mais próximo de 1 melhor é a relação entre as variâncias [51].

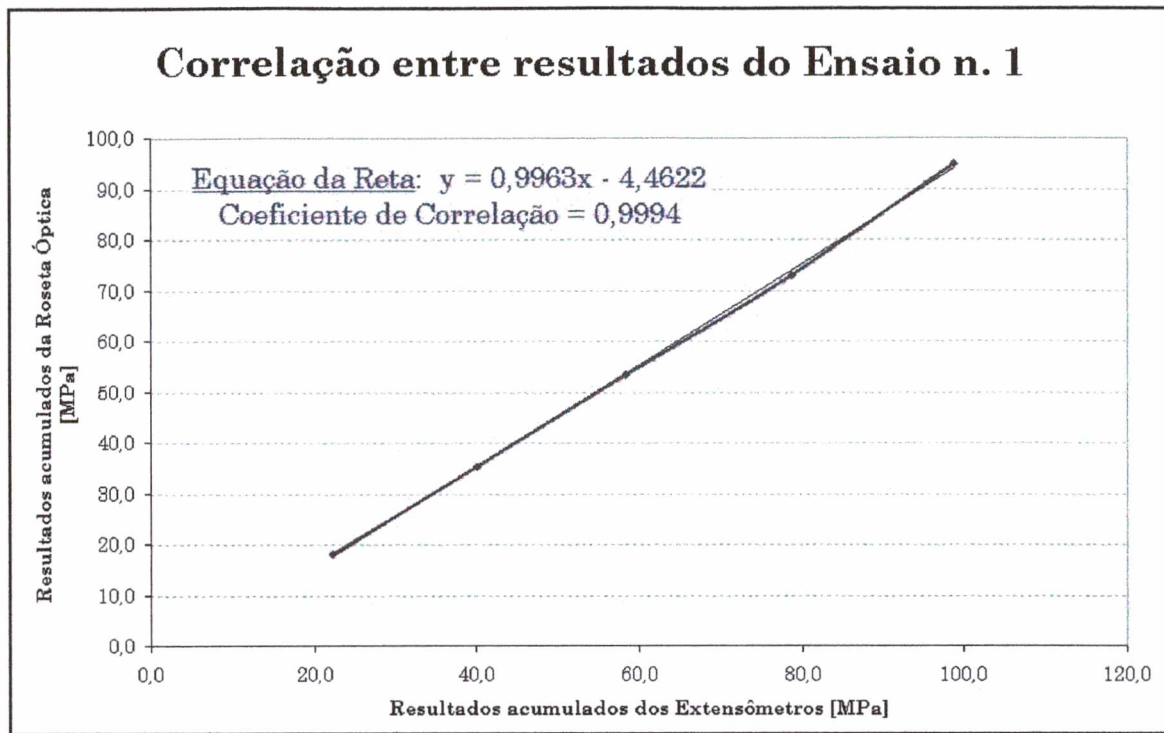


Figura 5.10 Gráfico de correlação entre os resultados obtidos no ensaio n. 1

A partir das equações de correlação obteve-se, por interpolação, os valores medidos pela Roseta Óptica para os passos de 20, 40, 60, 80 e 100 MPa. Estes valores são mostrados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 Comparação dos resultados corrigidos

Carga	Resultados dos Extensômetros [MPa]	Tensões Medidas pela Roseta Óptica [MPa]				
		Ensaio n. 1	Ensaio n. 2	Ensaio n. 3	Média	Desvio Padrão
Passo 1	20,0	15,5	17,4	17,3	16,7	1,1
Passo 2	40,0	35,4	36,7	36,0	36,0	0,7
Passo 3	60,0	55,3	56,1	55,4	55,4	0,7
Passo 4	80,0	75,2	75,4	74,7	74,7	1,1
Passo 5	100,0	95,2	92,1	94,0	94,0	1,6

A partir dos dados da Tabela 5.6, pode-se fazer uma comparação entre os valores dos extensômetros e as médias dos resultados obtidos com a Roseta Óptica. Essa comparação é apresentada na Figura 5.11. Note também o baixo desvio-padrão obtido nas medições com a Roseta Óptica.

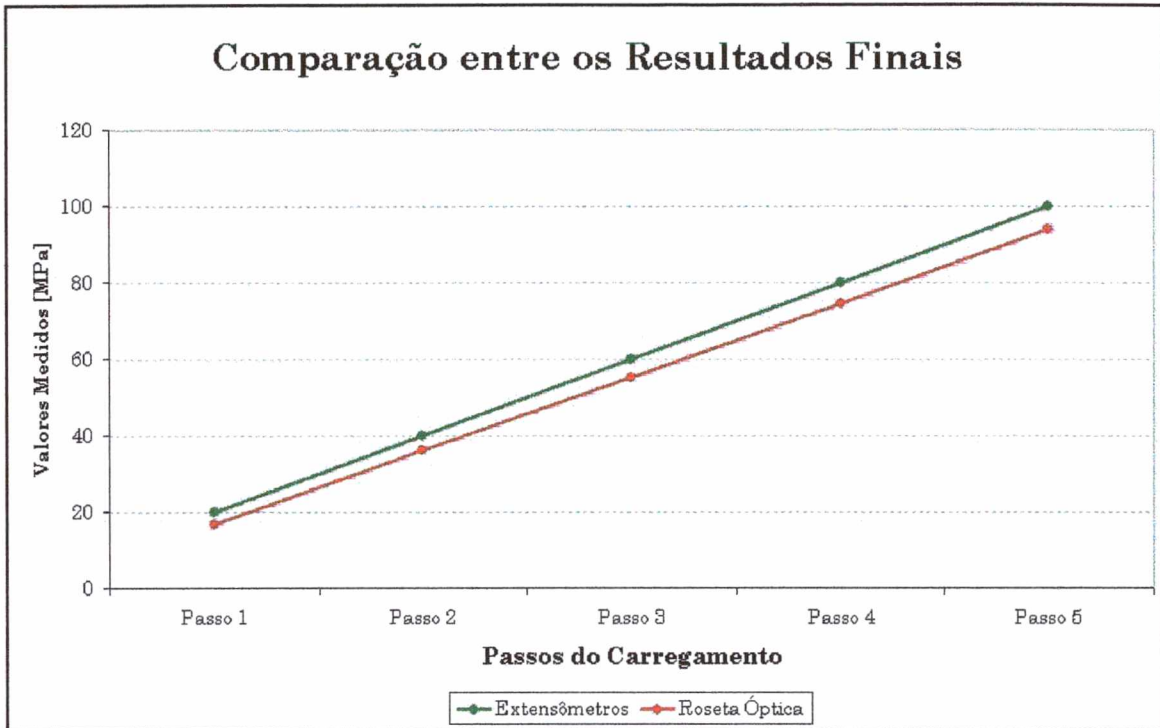


Figura 5.11 Gráfico comparativo dos resultados da máquina de tração

Apesar de os resultados obtidos com a Roseta Óptica diferirem dos resultados do extensômetros, nota-se que existe boa linearidade nos dois casos. Além disso, estes resultados podem ser corrigidos pela equação mostrada na Figura 5.12. As médias dos resultados obtidos pela Roseta Óptica já corrigidas, são mostradas na Tabela 5.7.

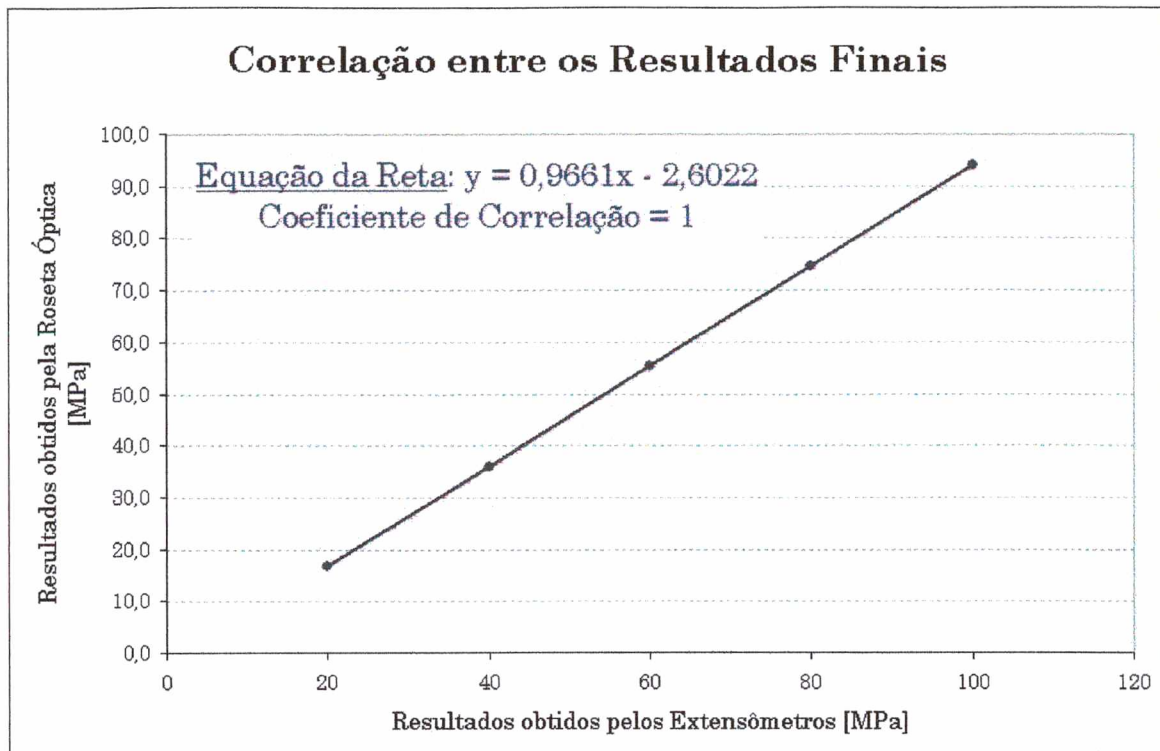


Figura 5.12 Gráfico de correlação para a correção dos resultados obtidos pela Roseta Óptica

Tabela 5.7 Correção das médias dos resultados acumulados obtidos com o processamento das imagens da Roseta Óptica

Carga [MPa]	Resultados dos Ensaiois [MPa]		
	Extensômetros	Média da Roseta Óptica	Média da Roseta Óptica CORRIGIDA
Passo 1	20,0	16,7	20,0
Passo 2	40,0	36,0	40,0
Passo 3	60,0	55,4	60,0
Passo 4	80,0	74,7	80,0
Passo 5	100,0	94,0	100,0

Apesar de ser possível corrigir os resultados obtidos com a Roseta Óptica, observou-se algumas causas que podem ter contribuído para as diferenças entre os resultados não corrigidos. Estas causas são descritas abaixo:

- Existem certas diferenças entre os resultados obtidos pelos extensômetros 1, 2, 3, 4, 5 e 7. Teoricamente, caso a aplicação da carga fosse perfeitamente axial, estes resultados deveriam ser iguais. Porém, este fato não ocorreu, indicando a presença de gradientes de tensões no corpo de prova. Os valores das leituras obtidas nos ensaios podem ser encontradas no Anexo C.
- Os pontos de medição dos extensômetros e o ponto de medição da Roseta Óptica diferem entre si em aproximadamente 40 mm. Assim, os valores reais das tensões nas regiões medidas podem ser mesmo diferentes, mesmo quando a média dos extensômetros vizinhos é considerada.
- A regulagem da Roseta Óptica utilizada no ensaio de tração foi diferente da regulagem utilizada na calibração com o Interferômetro de Michelson modificado. Estes ajustes foram modificados quando se necessitou trocar o laser diodo que queimou.
- Além disso, comprimento de onda dos lasers diodos pode variar mesmo entre unidades da marca e modelo. Por isso, além de se ter modificado os ajustes da Roseta Óptica quando da troca do laser diodo, pode-se ter instalado um laser novo com um comprimento de onda ligeiramente diferente do anterior. Este fato pode explicar a pequena diferença de inclinação entre as retas dos resultados mostradas na Figura 5.11.
- A calibração da Roseta Óptica foi feita apenas para a medição de deslocamentos. Sua calibração para medição de tensões depende de um dispositivo padrão ainda não disponível no LABMETRO.

Somente com estes resultados não é possível chegar a uma conclusão definitiva acerca do desempenho metrológico da Roseta Óptica para a medição de

tensões. Porém, estes ensaios serviram para que se verificasse a coerência dos resultados apresentados pela Roseta Óptica.

Atualmente, um dispositivo simulador de tensões está sendo desenvolvido por engenheiros do Laboratório de Metrologia e Automatização da UFSC – LABMETRO, para que se possa, em breve, analisar a Roseta Óptica em relação a um padrão, e assim, poder calcular as incertezas associadas às medições com este dispositivo.

5.3 Ensaio realizado em campo

Para comprovar as características de portabilidade e facilidade de uso do dispositivo, um pequeno ensaio em campo foi realizado.

O feixe de molas de uma pick-up foi devidamente limpo e a área de medição pintada com tinta de cor branca. A pintura da área de medição é necessária para que se tenha melhor reflexão do laser na superfície de medição.

A Roseta Óptica e seus componentes foram devidamente instalados e ligados (Figura 5.13 e Figura 5.14).

Após os ajustes de medição, e sem cargas sobre a caçamba da pick-up, adquiriu-se a imagem de referência.

Em seguida, colocou-se aproximadamente 150 kg de carga sobre a caçamba da pick-up e adquiriu-se a segunda imagem. O mapa da diferença de fases adquirido pode ser visto na Figura 5.15. A tensão máxima principal encontrada foi de 45 MPa, e os deslocamentos de corpos rígido foram da ordem de 1 μm . Não foram feitas comparações com extensometria por resistência elétrica.

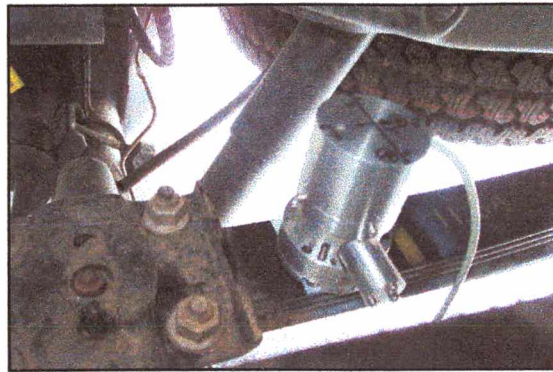


Figura 5.13 Roseta Óptica instalada sobre o feixe de molas da pick-up

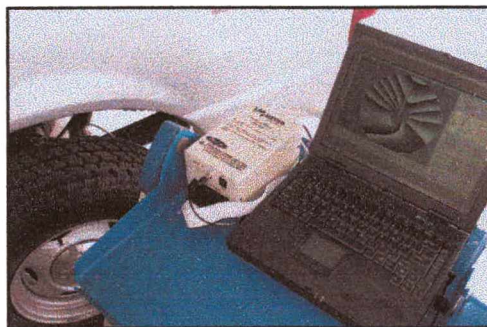


Figura 5.14 Laptop e driver de controle ao lado da pick-up



Figura 5.15 Resultado do ensaio na pick-up

Capítulo 6

Conclusões

Este trabalho mostrou a metodologia empregada e as etapas do desenvolvimento do primeiro protótipo da Roseta Óptica e realizou um conjunto de ensaios visando a avaliação das suas características metrológicas e operacionais. Através das atividades realizadas, e anteriormente apresentadas neste documento, pôde-se chegar a algumas conclusões:

- O primeiro protótipo da Roseta Óptica possui dimensões externas de aproximadamente 110 mm de altura por 68 mm de diâmetro e, com a maioria das peças fabricadas em alumínio, alcançou uma massa aproximada de 0,5 kg. Além disso, o sistema computacional de comando e operação pode estar a alguns metros do local de medição, possibilitando medições remotas em ambientes de difícil acesso ao operador. Estas características atendem às especificações de portabilidade detalhadas no início do projeto.
- A Roseta pode estar fixada na peça a medir em qualquer direção (horizontal, vertical ou sobrecabeça). O sistema de imãs associado à massa reduzida proporcionam grande força de atração entre a Roseta e a superfície da peça medida.
- A instalação do dispositivo na peça é rápida e de extrema facilidade, necessitando, em alguns casos, apenas uma limpeza superficial e a

pintura da pequena superfície a medir com tinta branca de secagem rápida. Após instalada e ajustada, toda a operação de medição, incluindo o processamento das imagens e a apresentação dos resultados, pode ser feita dentro de um minuto, pois a operação de medição é totalmente controlada via software.

- Conseguiu-se desenvolver uma interface de software bastante amigável para com o usuário, pois com apenas alguns minutos de treinamento, pode-se operá-lo facilmente, realizando-se desde operações de ajuste até o processamento dos resultados.
- Através do software desenvolvido, os resultados são apresentados graficamente através de setas de indicação das direções e intensidades das tensões e deformações principais e, também, setas indicadoras da direção das translações de corpo rígido sofridas pelo dispositivo. Um gráfico de barras, um círculo de Mohr e uma função para a retirada das franjas de corpo rígido da imagem são também utilizadas para proporcionar uma melhor visualização e entendimento dos resultados pelos usuários. Os resultados podem ser apresentados na forma de um relatório de medição.
- Ao se utilizar a luz do laser na sua forma divergente dispensou-se o uso de uma lente de colimação e proporcionou-se a diminuição do caminho óptico percorrido pelo laser. Este fato contribuiu para a diminuição das dimensões do dispositivo como um todo.
- Os espelhos cônicos apresentaram problemas no que diz respeito à sua usinagem. Pequenos riscos (causados por vibrações do torno de ultraprecisão) associados à baixa espessura dos espelhos cônicos prejudicaram a iluminação da superfície proporcionando uma iluminação não muito uniforme. Os espelhos foram recobertos com ouro, por eletrodeposição, uniformizando a superfície dos espelhos cônicos e conseqüentemente a iluminação da região de medição.
- Apesar dos sistemas de sinalização e avisos estampados sobre o medidor, o laser diodo de comprimento de onda infravermelho utilizado ainda apresenta um risco à saúde do usuário. O feixe de

laser é invisível e pode causar sérios danos à visão, caso uma pessoa desavisada olhe diretamente para o interior da Roseta e se exponha ao feixe de laser enquanto o mesmo estiver em operação.

- Os componentes internos apresentaram excelente rigidez. Porém, o sistema de fixação através das unhas apresentou, em alguns casos, problemas em relação a deslocamentos de corpo rígido e acesso a regiões de grande curvatura.
- A Roseta Óptica é um novo sistema de medição que se propõe a substituir parte das medições realizadas com os extensômetros por resistência elétrica. A Roseta Óptica oferece algumas vantagens sobre a extensometria, tais como, a redução do tempo de medição, a facilidade de operação e a apresentação gráfica dos resultados, que facilita muito a compreensão por parte do usuário.
- Os primeiros resultados obtidos com a Roseta Óptica serviram como ótimos indicadores de que resultados promissores podem ser alcançados num futuro muito próximo. Algumas melhorias são aqui sugeridas para que se consiga estes resultados:
 1. Adotar uma nova configuração para as unhas de fixação, de forma a deixá-las fixas e sem ajustes de altura para que se possa conseguir maior rigidez;
 2. Proporcionar uma outra forma de sapatas de fixação que possam ser coladas ou fixas de forma não magnética, convenientes para medições em materiais não ferromagnéticos;
 3. Procurar melhorar a qualidade dos espelhos cônicos com a intenção de se obter menos riscos e melhorar a uniformidade da iluminação da região de medição. Além disso, deve-se projetar um subsistema de iluminação com espelhos cônicos com maior ângulo e mais espessos. Isto proporcionaria maior ângulo de incidência, menor ampliação da imagem do espelho na região de medição, e

conseqüentemente, menor sensibilidade às imperfeições dos espelhos cônicos;

4. O subsistema de deslocamento de fase pode ser modificado para utilizar apenas um atuador piezoelétrico e espelhos planos. Isto diminuiria o número de componentes dentro do dispositivo e facilitaria a usinagem do espelho cônico, que, com este tipo de configuração, não precisaria ser bipartido;
5. Deve-se procurar uma câmera com dimensões menores, de tecnologia digital e com menor nível de ruído;
6. Deve-se estudar a possibilidade de se utilizar lasers diodo com comprimento de onda visível com o intuito de minimizar as chances de futuros acidentes;
7. Apesar de o atual protótipo poder ser regulado e ajustado mecanicamente em todos os seus subsistemas, deve-se procurar projetar um novo dispositivo com possibilidades de regulagem dos subsistemas enquanto o aparelho estiver em operação. O atual protótipo precisa ser desligado e desmontado para que se possa regular, mecanicamente, alguns subsistemas.

Referências Bibliográficas

- [1] CLOUD, Gary L. **Optical Methods of Engineering Analysis**. Cambridge University Press, 1995
- [2] GASVIK, Kjell J. **Optical Metrology**. Second Edition, John Wiley & Sons Ltd., England, 1995
- [3] RONSANI, Maikon B. **Otimização de um Medidor Portátil de Tensões Residuais**. Dissertação de Mestrado apresentada na UFSC, CPGEM, Florianópolis, 2000
- [4] DALLY, James W., RILEY, William F. **Experimental Stress Analysis**. Third Edition, McGraw-Hill, Inc., International Edition 1991
- [5] THOMPSON, Brian J. **Selected Papers on Speckle Metrology**. SPIE Milestone Series Volume MS 35, SPIE USA, 1991
- [6] KOBAYASHI, A. S. **Handbook on Experimental Mechanics**. Society for Experimental Mechanics Inc., Prentice-Hall Inc., 1989
- [7] TIPLER, P. A. **Ótica e Física Moderna**. Editora LTC, Rio de Janeiro, Vol. 4, 1995
- [8] ALBERTAZZI, A. G. **Automatização da Medição de Deslocamentos pela Holografia Interferométrica**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica. UFSC, 1984

- [9] JONES, R., WYKES, C. **Holographic and Speckle Interferometry**. Cambridge University Press, 1989
- [10] SUTÉRIO, R. **Caracterização de constantes elásticas de materiais isotrópicos por Holografia Óptica Eletrônica combinado ao método da ressonância mecânica**. Dissertação de Mestrado apresentada na UFSC, PósMCI, Florianópolis, 1998
- [11] FANTIN, A. V. **Medição de deslocamentos através de Holografia Digital utilizando dupla iluminação**. Proposta de Tese de Doutorado apresentada na UFSC, PósMCI, Florianópolis, 2000
- [12] BOETTGER, J. **Desenvolvimento de um sistema portátil para medição de tensões residuais em campo utilizando a Holografia Eletrônica e o Método do Furo**. Dissertação de Mestrado apresentada na UFSC, CPGEM, Florianópolis, 1998
- [13] RODACOSKI, M. R. **Medição de Tensões Residuais com Holografia Eletrônica**. Tese de doutorado apresentada na UFSC, CPGEM, Florianópolis, 1997
- [14] KAPP, W. A. **Otimização do Desempenho Metrológico do Sistema de Medição Estação Holográfica**. Dissertação de Mestrado apresentada na UFSC, CPGEM, 1997
- [15] ALBERTAZZI, A. G. et al. **Adequação de um Interferômetro Radial para Medição de Tensões Residuais por meio da Holografia Eletrônica**. III Simpósio de Análise Experimental de Tensões – ABCM, Rio de Janeiro, 12/1995, pág. 19-26
- [16] ALBERTAZZI, A. G. **A Robust Hybrid Phase Unwrapping Technique by Block Processing and Successive Approximation to a Mathematical Model**. Fringe 2001 – The 4th International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns. Elsevier Science Publishers, Paris, 2001, pág. 265-270

- [17] ASTM E 837 94 **Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole -Drilling Strain-Gage Method**. American Society for Testing and Materials, 1994
- [18] ROBINSON, D. W., REID, G. T. **Interferogram Analysis**. Institute of Physics Publishing, England, 1993
- [19] STRAND, J., TAXT, T., JAIN, A. K. **Two-dimensional phase unwrapping using a block least-squares method**. IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 8, No. 3, pág. 375 – 386, 1999
- [20] HECHT, E. **Optics**. Third edition, Addison Wesley Longman, Inc., 1998
- [21] RILEY, W. F. et al. **Mechanics of Materials**. Fourth Edition. John Wiley and Sons, Inc., United States of America, 1985
- [22] BUDYNAS, R. G. **Advanced Strength and Applied Stress Analysis**. International Student Edition, McGraw-Hill, Inc., 1977
- [23] SHIGLEY, J. E., MISCHKE, C. R. **Mechanical Engineering Design**. Fifth Edition, McGraw-Hill, Inc., 1989
- [24] BEER, F. P., JOHNSTON, R. **Mechanics of Materials**. Second Edition. McGraw-Hill, Inc., 1992
- [25] POST, D., BONGTAE, H., IFJU, P. **High Sensitivity Moiré - Experimental Analysis for Mechanics and Materials**. Springer-Verlag New York, Inc., 1994
- [26] PATORSKI, K. **Handbook of The Moiré Fringe Technique**. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1993
- [27] KUJAWINSKA, M., SALBUT, L. **New generation of optical extensometers based on grid techniques and active phase analysis**. Fringe 2001 – The 4th International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns. Elsevier Science Publishers, Paris, 2001, pág. 86-93

- [28] HONLET, M. **Nondestructive testing of complex composite materials and structures using optical techniques**. Honlet Optical Systems GmbH, Pfaffenhofen, Germany, 2001
- [29] TAILLADE, F. et al. **Shearographic visualization of lamb waves in carbon epoxy plates interaction with delaminations**. The European Physical Journal – Applied Physics, Vol. 9, EDP Sciences, 2000, pág. 69-73
- [30] HUNG, Y. Y. **Electronic Shearography versus ESPI for nondestructive evaluation**. Proc. of SPIE Vol. 1554, Second Intl Conf on Photomechanics and Speckle Metrology: Speckle Techniques, Birefringence, 1991
- [31] WILLEMANN, D. P., VEIGA, C. L. N., ALBERTAZZI, A. G. **Development of an interferometric device for stress and strain measurement with Electronic Holography**. COBEM 2001 – 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Uberlândia – MG, 2001
- [32] UNITED. **Optical Extensometry: It's here to stay!**. Disponível na internet em <www.tensiletest.com/laserext.htm>. On-line. Capturada em 21/05/2001. (Última visita ao site em 02/03/2002)
- [33] VISHAY MEASUREMENTS GROUP. **TN-702 - Introduction to the PhotoStress Method**. Disponível na internet em <www.measurementsgroup.com/guide/pstress/tech/tn702/702intro.htm>. On-line. Capturada em 21/05/2001. (Última visita ao site em 02/03/2002)
- [34] CAMSYS INC. **Two-Dimensional Model**. Disponível na internet em <www.camsysinc.com/2dm.html>. On-line. Versão PDF capturada em 21/05/2001. (Última visita ao site em 02/03/2002)
- [35] CAMSYS INC. **Advanced Target Model**. Disponível na internet em <www.camsysinc.com/target.html>. On-line. Versão PDF capturada em 21/05/2001. (Última visita ao site em 02/03/2002)

- [36] ETTEMEYER. **Q-100 MASTER - Fast Stress Analysis**. Disponível na internet em <www.ettemeyer.com/q-100.html>. Capturada em 21/05/2001. (Última visita ao site em 02/03/2002)
- [37] STRESS PHOTONICS ONLINE. **GFP 1000 - PSA**. Disponível na internet em <www.stressphotonics.com/PSA/PSA_Intro.html>. On-line. Capturada em 21/05/2001. (Última visita ao site em 02/03/2002)
- [38] PHOTOMECHANICS INC. **PEMI II - 2nd Generation of Portable Engineering Moiré Interferometer**. Disponível na internet em <www.photomechanics.com>. On-line. Capturada em 21/05/2001. (Última visita ao site em 02/03/2002)
- [39] WADSWORTH, W. J. **Diode lasers - an Overview**. Department of Physics of Oxford University, 1994. Capturado em 21/05/2001. On-line. Disponível na internet em <<http://www.physics.ox.ac.uk/AL/research/groups/laser/diodes.html>> (Última visita ao site em 02/03/2002)
- [40] BLUE SKY RESEARCH. **Circulaser™ Laser Diodes - Complete Physical and Performance Specifications - PS026-00**. Versão PDF do Catálogo capturada em 21/05/2001. On-line. Disponível na internet em <http://www.blueskyresearch.com/products/p_circulaser.html>. (Última visita ao site em 02/03/2002)
- [41] HECHT, J. **The laser guidebook**. McGraw-Hill, Inc., 1986
- [42] MARSHAL ELECTRONICS, INC - OPTICAL SYSTEMS DIVISION. **540 TV line High Resolution B/W CCD Board Camera**. Versão PDF capturada em 30/10/2001 no endereço <<http://www.marscam.com/osd/cameras/board-bw/v1260.html>>. On-line. (Última visita ao site em 02/03/2002)
- [43] PLASTICS AUXILIARIES & MACHINERY MAGAZINE. **Thicker Aluminum Mold Plate Offered**. Capturada em 20/02/2002. On-line. Disponível na internet em <http://www.plasticsauxiliaries.com/recent_

noteworthy/2000/oct2000/10-2000recent1.htm>. (Última visita ao site em 02/03/2002)

- [44] ROTHE-NEVES, M. **Técnica ópto-eletrônica de medição de geometria 3D com interferometria de luz não-coerente**. Dissertação de Mestrado apresentada na UFSC, PósMCI, Florianópolis, 2001
- [45] PHYSIK INSTRUMENTE (PI). **Operating Manual PZ 62E – E-500 Series PZT Control Electronics**. Release 2.20, 1997
- [46] ALBERTAZZI, A. G. **Metrologia – Parte I**. Apostila publicada pelo LABMETRO – UFSC, 1999
- [47] HARVEY, P. **Engineering Properties of Steel**. ASM International, 1982
- [48] DAVIS, J. R. **Metal's handbook: desk edition**. ASM International – The Materials Information Society, 1998
- [49] HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK. **Operating Manual of Amplifier system MGCPlus with display and control panel AB22A/AB32**. Darmstadt, 1999
- [50] ASUNDI, A., WENSEN, Z. **Fast phase-unwrapping algorithm based on a gray-scale mask and flood fill**. Applied Optics, vol. 31, No. 23, pp. 5416 – 5420, 1998
- [51] MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1999

Anexo A

Equacionamento dos espelhos cônicos

DIMENSÕES DOS ESPELHOS CÔNICOS PARA O FEIXE NÃO COLIMADO

DADOS DE ENTRADA

Diâmetro da área de Medição (mm):	Dmed := 10
Foco (mm):	f := 2
Ângulo do Espelho (°):	A := 60
Distância Total - distância do foco da lente divergente à base do espelho (mm):	dt := 51
Diâmetro da área de Sombra (mm):	Dsomb := 1.5

DIÂMETRO MÍNIMO - INFERIOR - Dmin (mm)

$$\alpha := \pi \frac{A}{180}$$

$$\alpha = 1.047$$

$$Dmin := 1$$

$$Dmin := \text{root} \left(Dmed + 2 \frac{f}{\tan \left(2\alpha - \frac{\pi}{2} - \text{atan} \left(\frac{Dmin}{2dt} \right) \right)} - Dmin, Dmin \right)$$

$$Dmin = 22.738$$

ESPESSURA TOTAL DO ESPELHO - Et (mm)

$$\phi_i := 2\alpha - \frac{\pi}{2} - \text{atan} \left(\frac{Dmin}{2dt} \right)$$

$$\phi_i = 0.304$$

$$\phi_i^\circ := \phi_i \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\phi_i^\circ = 17.433$$

$$Xint := \frac{\frac{Dmin}{2 \cdot \tan(\alpha)} + dt + Dmin \cdot \tan(\alpha)}{\left(\tan(\alpha) + \frac{1}{\tan(\alpha)} \right)}$$

$$Xint = 41.98$$

$$Yint := \tan(\alpha) \cdot (Xint - Dmin)$$

$$Yint = 33.327$$

$$\phi_s := \text{atan}\left(\frac{2 \cdot Y_{\text{int}} - dt + f}{2 \cdot X_{\text{int}} - \frac{D_{\text{min}}}{2} - \frac{f}{\tan(\phi_i)}}\right)$$

$$\phi_s = 0.261$$

$$\phi_s^\circ := \phi_s \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\phi_s^\circ = 14.927$$

$$E_t := \frac{f \cdot \left(\frac{1}{\tan(\phi_s)} + \frac{1}{\tan(\phi_i)}\right) - D_{\text{min}}}{\frac{1}{\tan(\alpha)} - \frac{1}{\tan(\phi_s)}}$$

$$E_t = 2.794$$

DIÂMETRO MÁXIMO - SUPERIOR - D_{max} (mm)

$$D_{\text{max}} := D_{\text{min}} + 2 \cdot \frac{E_t}{\tan(\alpha)}$$

$$D_{\text{max}} = 25.964$$

ESPESSURA DO ESPELHO SUPERIOR - E_{sup} (mm)

$$\phi_{\text{sup}} := \text{atan}\left(\frac{2 \cdot Y_{\text{int}} - dt + f}{2 \cdot X_{\text{int}} - D_{\text{min}} + \frac{D_{\text{somb}}}{2}}\right)$$

$$\phi_{\text{sup}} = 0.278$$

$$E_{\text{sup}} := E_t - \left[\frac{\frac{D_{\text{min}}}{2} + \frac{D_{\text{somb}}}{2} - \frac{f}{\tan(\phi_{\text{sup}})}}{\left(\frac{1}{\tan(\phi_{\text{sup}})} - \frac{1}{\tan(\alpha)}\right)} \right]$$

$$E_{\text{sup}} = 1.056$$

ESPESSURA DO ESPELHO INFERIOR - E_{inf} (mm)

$$\phi_{inf} := \text{atan} \left(\frac{2 \cdot Y_{int} - dt + f}{2 \cdot X_{int} - D_{min} - \frac{D_{somb}}{2}} \right)$$

$$\phi_{inf} = 0.284$$

$$E_{inf} := \frac{\frac{D_{min} - D_{somb}}{2} - \frac{f}{\tan(\phi_{inf})}}{\frac{1}{\tan(\phi_{inf})} - \frac{1}{\tan(\alpha)}}$$

$$E_{inf} = 1.323$$

GAP (mm)

$$Gap := E_t - E_{sup} - E_{inf}$$

$$Gap = 0.415$$

ÂNGULO DO VETOR SENSIBILIDADE - V_s (°)

$$V_s := \frac{(\phi_i^\circ - \phi_s^\circ)}{2}$$

$$V_s = 1.253$$

VARIAÇÃO PERCENTUAL DO ÂNGULO DO VETOR SENSIBILIDADE - V%

$$V\% := 100 \cdot \tan \left(V_s \cdot \frac{\pi}{180} \right)$$

$$V\% = 2.187$$

ÂNGULOS DE ABERTURA DO FEIXE DE LASER - (°)

$$\beta := 2 \cdot \left[\text{atan} \left[\frac{D_{max}}{2(dt - E_t)} \right] \right]$$

$$\beta = 0.526$$

$$\beta^\circ := \beta \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\beta^\circ = 30.145$$

$$\theta := 2 \cdot \left(\text{atan} \left(\frac{D_{\text{min}}}{2 \cdot dt} \right) \right)$$

$$\theta = 0.439$$

$$\theta^\circ := \theta \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\theta^\circ = 25.134$$

ÂNGULO IDEAL DE ABERTURA DO FEIXE DE LASER - (°)

$$\psi_{\text{ideal}} := 2 \cdot \left[\frac{\left[\left(\frac{\beta^\circ}{2} \right)^2 - \left(\frac{\theta^\circ}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\ln \left(\frac{\beta^\circ}{\theta^\circ} \right)} \right]$$

$$\psi_{\text{ideal}} = 39.035$$

DIMENSÕES DO ESPELHO CÔNICO - RESUMO

Diâmetro Superior (mm)	$D_{max} = 25.964$
Diâmetro Inferior (mm)	$D_{min} = 22.738$
Altura do Espelho Superior (mm)	$E_{sup} = 1.056$
Altura do Espelho Inferior (mm)	$E_{inf} = 1.323$
Gap (espaçamento entre os espelhos superior e inferior) (mm)	$Gap = 0.415$
Altura Total (mm)	$E_t = 2.794$
Ângulo do Espelho (°)	$A = 60$
Foco (mm)	$f = 2$
Diâmetro da área de Medição (mm):	$D_{med} = 10$
Diâmetro da área de Sombra (mm):	$D_{somb} = 1.5$
Distância total - da base do espelho ao foco da lente divergente (mm)	$dt = 51$
Ângulo do Vetor Sensibilidade (°)	$V_s = 1.253$
Variação Percentual do Ângulo do Vetor Sensibilidade (°)	$V\% = 2.187$
Ângulo de Abertura do Laser para o Raio Maior do Espelho(°)	$\beta^\circ = 30.145$
Ângulo de Abertura do Laser para o Raio Menor do Espelho(°)	$\theta^\circ = 25.134$
Ângulo de Abertura IDEAL do Laser (°)	$\psi_{ideal} = 39.035$
Ângulo de Incidência do Laser - Raio Superior (°)	$\phi_s^\circ = 14.927$
Ângulo de Incidência do Laser - Raio Inferior (°)	$\phi_i^\circ = 17.433$

Anexo B

Exemplo de Relatório de Medição emitido pelo Software

Roseta Óptica - Relatório de Ensaio

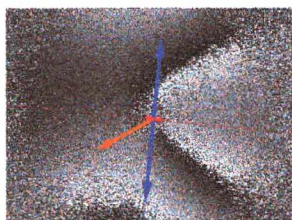
Medição de Tensões e Deformações

Título do Ensaio: Ensaio realizado na Máquina de Tração
 Nome do Arquivo: Ensaio realizado na Máquina de Tração.ros
 Data: 3/3/2002

Configurações

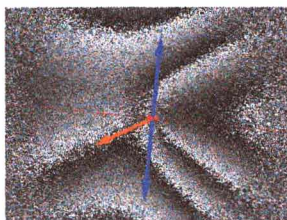
Material: Ident. do Material: Aço AISI 4340 Módulo de Elasticidade (MPa): 200000 Coeficiente de Poisson: 0,28 Tensão de Escoamento (MPa): 472 Tensão de Ruptura (MPa): 745	Anel: mm/pixel: 0,015 Raio Interno do Anel (mm): 1,3 Raio Externo do Anel (mm): 3,3 Número de Anéis de Amost.: 12 Número de Pontos por Anel: 512 Centro(pixels): (329,3;246,5)	Imagem ao Vivo: Brilho: 24 Contraste: -60
Laser: Potência (%): 80		Franjas ao Vivo: Contraste: 45
		PZT: Calibração: de 0 para 0 Número de Ciclos: 0

Resultados:



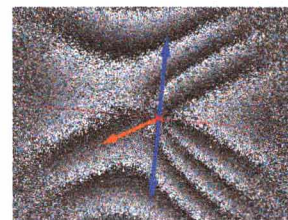
Dif_10.tif

S1: 18,3 MPa
 S2: 1,9 MPa
 Teta: 84 °
 Tx: -0,159 µm
 Ty: -0,085 µm
 Gxx: -0,083 MPa/mm
 Gxy: 0,105 MPa/mm
 Gyx: -0,154 MPa/mm
 Gyy: 0,034 MPa/mm



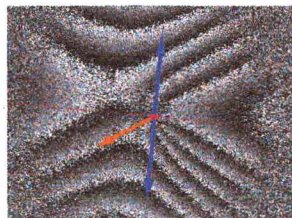
Dif_20.tif

S1: 35,7 MPa
 S2: 2,4 MPa
 Teta: 84 °
 Tx: -0,314 µm
 Ty: -0,147 µm
 Gxx: -0,021 MPa/mm
 Gxy: -0,081 MPa/mm
 Gyx: 0,041 MPa/mm
 Gyy: -0,051 MPa/mm



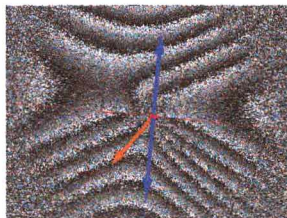
Dif_30.tif

S1: 53,1 MPa
 S2: 2,3 MPa
 Teta: 84 °
 Tx: -0,467 µm
 Ty: -0,204 µm
 Gxx: -0,038 MPa/mm
 Gxy: -0,041 MPa/mm
 Gyx: 0,024 MPa/mm
 Gyy: -0,067 MPa/mm



Dif_40.tif

S1: 71,8 MPa
 S2: 3,4 MPa
 Teta: 85 °
 Tx: -0,556 µm
 Ty: -0,287 µm
 Gxx: -0,071 MPa/mm
 Gxy: -0,061 MPa/mm
 Gyx: 0,023 MPa/mm
 Gyy: -0,021 MPa/mm



Dif_50.tif

S1: 91,4 MPa
 S2: 4,2 MPa
 Teta: 85 °
 Tx: -0,486 µm
 Ty: -0,563 µm
 Gxx: -0,222 MPa/mm
 Gxy: 0,111 MPa/mm
 Gyx: -0,164 MPa/mm
 Gyy: 0,110 MPa/mm

Observações / Comentários

Exemplo de Relatório de Medição emitido pelo software da Roseta Óptica. Neste relatório, os gradientes de tensão medidos pela Roseta Óptica também são apresentados. Porém, estes resultados ainda estão sendo avaliados.

Anexo C

**Leituras obtidas dos extensômetros
no ensaio com a máquina de tração**

Anexo D

Comparação Técnico-econômica

Uma comparação técnico-econômica entre a Roseta Óptica e a extensometria por resistência elétrica é aqui realizada.

Na Tabela D.1 a comparação enfoca apenas os aspectos técnicos da medição. Destacam-se as atividades de preparação e instalação da Roseta Óptica, que são mais fáceis de se realizar que na extensometria, implicando numa grande redução do tempo de medição. Além disso, os resultados apresentados pela Roseta Óptica são mais completos e são representados graficamente em uma forma fácil de ser compreendida.

Tabela D.1 Comparação técnica entre a Roseta Óptica e a Extensometria

Características	Roseta Óptica	Extensometria
Preparação da superfície	Somente pintura	Lixamento e limpeza
Instalação	Fixação magnética	Colagem e cabeamento
Módulos complementares	Laptop e <i>driver</i>	Ponte de Wheatstone, sistema de aquisição de sinais e laptop
Tempo de medição ¹	≈ 3 min	≈ 45 min
Tipo de resultado	Estado de tensões (σ_x , σ_y , τ_{xy} , σ_1 , σ_2 , τ_{max} , β) e translações	Estado de tensões (σ_1 , σ_2 , τ_{max} , β)
Materiais consumíveis	Tinta branca de secagem rápida	Extensômetros, cola, cabos e verniz

A Tabela D.2 evidencia os custos de operação dos dois sistemas de medição. Nota-se, que a redução dos tempos de preparação e instalação da Roseta Óptica incide diretamente sobre os custos, fazendo com que a mão de obra custe aproximadamente 93% mais baixo que na extensometria.

Outra grande vantagem da Roseta Óptica sobre a extensometria é baixo custo com material consumível. Para a Roseta Óptica o único material de consumo utilizado é a tinta de cor branca e de secagem rápida. Porém, cabe ressaltar, que a operação de pintura da região de medição só se faz necessária quando a superfície a medir é espelhada ou demasiadamente escura. A superfície espelhada atrapalha a

¹ Incluindo o tempo de preparação

medição pois muita luz é refletida em direção à câmera CCD, o que ofusca a câmera e prejudica a aquisição das imagens. Já a superfície escura não reflete suficientemente a luz que incide sobre a região de medição, dificultando a aquisição da imagem pelo CCD devido à pouca luminosidade.

Tabela D.2 Custos de operação ²

Item	Roseta Óptica	Extensometria
Mão de obra ³	US\$ 1,50	US\$ 22,50
Consumíveis	US\$ 0,06	US\$ 45,00
Total	US\$ 1,56	US\$ 67,50

Tabela D.3 Investimento Inicial

Roseta Óptica	US\$ 20,000
Extensometria	US\$ 12,000

A Tabela D.3 mostra uma estimativa dos valores que se deve investir na aquisição de cada um dos sistemas aqui comparados. Nota-se que a Roseta Óptica apresenta um valor inicial 40% maior. Porém, através do gráfico mostrado na Figura D.1, percebe-se que após cerca de 120 pontos medidos este valor é recuperado, em virtude de os custos de operação com a extensometria serem bem mais altos. Portanto, quanto mais se utiliza a Roseta Óptica mais nítidas se tornam suas vantagens.

² O custo de operação é considerado para apenas um ponto de medição (estado de tensão)

³ Considerando-se a hora técnica de US\$ 30,00

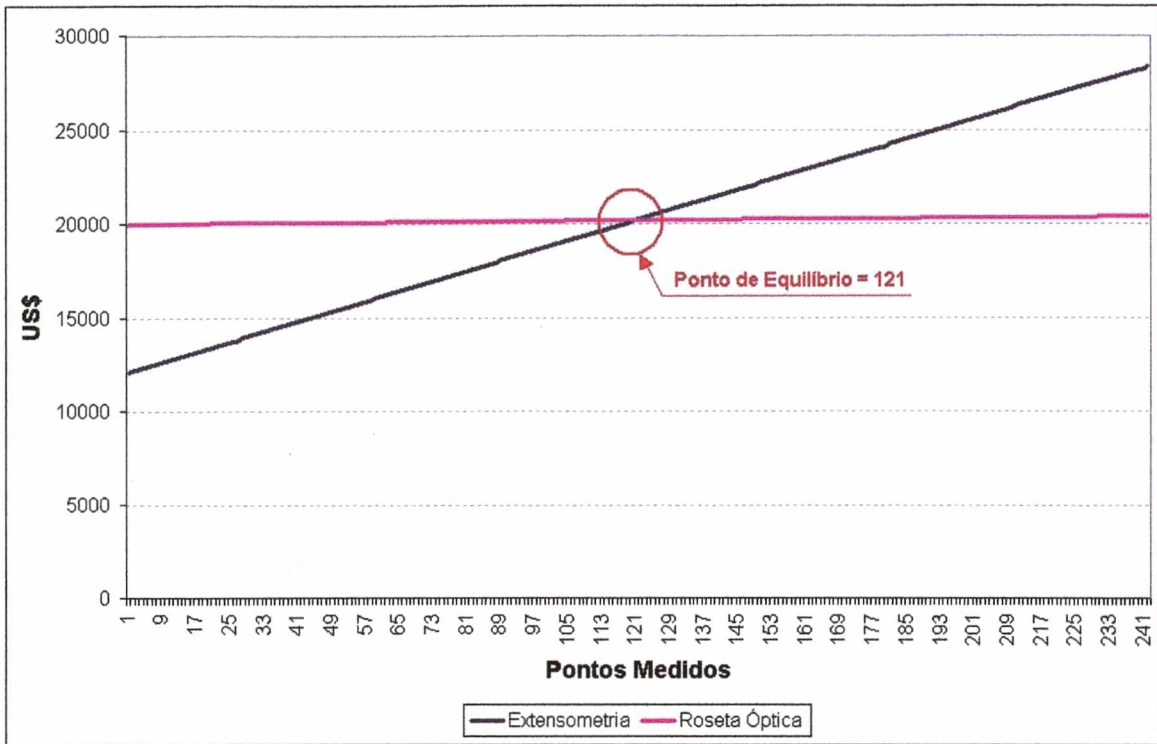


Figura D.1 Comparação entre os custos com Extensometria e os custos com a Roseta Óptica ao longo do tempo