

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Relatório Final

Trabalho de Conclusão de Curso

Extensometria óptica: variantes existentes no mercado e o desenvolvimento de um sistema próprio de medição aplicado ao ensaio de tração.

Autor: **Guilherme Marinho de Lima**

Orientador: **Prof. Dr. Sérgio Tonini Button**

Campinas, novembro de 2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Relatório Final
Trabalho de Conclusão de Curso

Extensometria óptica: variantes existentes no mercado e o desenvolvimento de um sistema próprio de medição aplicado ao ensaio de tração.

Autor: **Guilherme Marinho de Lima**

Orientador: **Prof. Dr. Sérgio Tonini Button**

Curso: Engenharia Mecânica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Campinas, 2014

S.P. – Brasi

Índice

Resumo	1
Lista de Figuras	2
Lista de Tabelas.....	4
Nomenclatura.....	5
Letras Latinas	5
Letras Gregas	6
Subscritos	7
Abreviações e Siglas	8
Capítulo 1 - Introdução	9
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica	11
2.1. Ensaio de tração.....	11
2.1.1. Curva tensão-deformação.....	14
2.1.2. Módulo de Young	15
2.1.3. Tensão de Escoamento	16
2.1.4. Limite de resistência.....	18
2.1.5. Tensão de Fratura.....	19
2.1.6. Outras Propriedades	19
2.2. Extensometria de contato.....	20
2.3. Extensometria óptica	24
2.3.1. Grades de Bragg.....	25
2.3.2. Técnica de Moiré.....	30
2.3.3. Interferometria Eletrônica de Padrões (<i>Electronic Speckle Pattern Interferometry</i> - ESPI)	35
2.3.4. Correlação de Imagens Digitais (<i>Digital Image Correlation</i> - DIC)	40

Capítulo 3 – Método de Medição	43
3.1. <i>Software</i> DIC	44
3.1.1. Funcionamento do <i>software</i>	44
3.2- Descrição dos ensaios de tração	49
3.3.1. As amostras	50
3.3.2. Tratamento de imagens e utilização do <i>software</i>	52
Capítulo 4 – Resultados e Discussão	57
Capítulo 5 – Conclusão.....	67
5.1 – Sugestões de melhoria.....	67
Referências Bibliográficas	69

Resumo

DE LIMA, Guilherme Marinho, Extensometria óptica: variantes existentes no mercado e o desenvolvimento de um sistema próprio de medição aplicado ao ensaio de tração, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Trabalho de Conclusão de Curso, 2014, 70 PP.

Em busca de aperfeiçoar seus produtos, os tornando melhores e mais baratos, dois dos caminhos que as empresas comumente optam são o de alteração do material utilizado e/ou o de redução do volume de material empregado para a produção. Tais modificações só são possíveis graças ao desenvolvimento de novos materiais e técnicas para a obtenção de suas propriedades. Essas técnicas além de possibilitarem a obtenção de maneira mais segura das características dos materiais, também permitem avaliar campos de deformação e tensão na peça. O método mais difundido para obtenção dessas características é a extensometria de contato, porém ele apresenta certas limitações. Dessa forma, a primeira parte deste trabalho, a partir de uma extensa pesquisa bibliográfica, visa demonstrar os princípios físicos, vantagens e desvantagens de métodos de extensometria encontrados no mercado baseados na óptica aplicados ao ensaio de tração como alternativa ao método anteriormente citado. As técnicas selecionadas para o estudo foram: grades de Bragg, técnica de Moiré, *Electronic Speckle Pattern Interferometry* e a *Digital Image Correlation*, além de uma revisão do ensaio de tração e da extensometria de contato. Na segunda parte do trabalho, desenvolveu-se um sistema próprio para a medição de deslocamentos e deformações baseado em um *software* de acesso livre, cujo algoritmo é fundamentado na técnica da *Digital Image Correlation*, aplicado em informações obtidas de ensaios de tração para validação do sistema proposto obtendo bons resultados.

Palavras Chave: extensometria óptica, extensometria de contato, ensaio de tração, grades de Bragg, técnica de Moiré, *Electronic Speckle Pattern Interferometry*, *Digital Image Correlation*.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Corpo-de-prova padronizado (formato quadrado).	12
Figura 2.2 - Corpo-de-prova padronizado (formato cilíndrico).	12
Figura 2.3 - Equipamentos universais a) acionada por parafuso e b) por sistema hidráulico.	13
Figura 2.4 - Tensão-deformação relacionadas sob a aplicação de uma carga axial.	15
Figura 2.5 - Curva tensão-deformação de uma liga de alumínio.	17
Figura 2.6 - Estricção de um corpo-de-prova antes da fratura.	18
Figura 2.7 - Representação a partir do gráfico de: a) Resiliência e b) Tenacidade .	19
Figura 2.8 - Extensômetro eletromecânico do tipo <i>clip-on gage</i>	20
Figura 2.9 - Deformação de um material sob tração.....	21
Figura 2.10 - Circuito Especial: Ponte de Wheatstone.	22
Figura 2.11 - <i>Strain-gauge</i> de ligação metálica.	24
Figura 2.12 - Vista em corte de uma fibra óptica com uma grade de Bragg gravada em seu núcleo.	26
Figura 2.13 - Princípio de operação de um sistema de sensoriamento distribuído utilizando uma rede óptica com grades de Bragg.....	27
Figura 2.14 - Diagrama com os sensores para monitoramento de tensões em uma ponte.....	28
Figura 2.15 - Deslocamento espectral de uma rede de Bragg submetida à tração e compressão.	30
Figura 2.16 - Padrões de franjas de moiré	31
Figura 2.17 - Medição de deformações utilizando a Técnica de Moiré.....	32

Figura 2.18 - Interação entre o retículo de referência e o retículo do corpo: a) corpo indeformado; b) corpo deformado.....	33
Figura 2.19 - Sobreposição de retículos para o cálculo do deslocamento.....	35
Figura 2.20 - Configuração básica do sistema ESPI.	36
Figura 2.21 - a) Efeito speckle b) Esquema para iluminação da superfície rugosa.	37
Figura 2.22 - Formação de franjas no objeto a ser ensaiado.	38
Figura 2.23 - Resumo da aplicação ESPI.....	40
Figura 2.24 - Esquema para obtenção das imagens DIC.....	42
Figura 2.25 - Resultado final da técnica de DIC.	42
Figura 3.1 – Sequência de etapas para uso do sistema proposto.....	44
Figura 3.2 – Imagens e <i>subsets</i>	45
Figura 3.3 - Critérios para localização de <i>subsets</i>	47
Figura 3.4 - Rotina que estabelece o melhor posicionamento do <i>subset</i>	48
Figura 3.5 - Equipamento servo-hidráulico para ensaios mecânicos, extensômetro e câmera fotográfica.	49
Figura 3.6 - Ensaios utilizados para calibração da aparência da amostra.....	50
Figura 3.7 - Configurações das amostras de ensaio. A esquerda: amostra sem tinta com marcações feita à caneta e a direita: amostra com tinta vermelha e marcações feitas pelo altímetro.	51
Figura 3.8 - Dimensões dos corpos-de-prova.....	52
Figura 3.9 - Exemplo da transformação da imagem colorida para escalas de cinza.	52
Figura 3.10 - Imagem de referência.....	53
Figura 3.11 - Imagem atual.....	53
Figura 3.13 - Parâmetros para análise.	54

Figura 3.12 - Região de interesse.....	54
Figura 3.14 - Verificação da análise.	55
Figura 4.1 - Resultado do <i>software</i> : campo de deslocamento.....	59
Figura 4.2 – Arranjo experimental durante a documentação dos ensaios.	60
Figura 4.3 - Exemplo dos resultados obtidos pelo <i>software</i> : campo de deslocamento (superior) e campo de deformação (inferior).	61
Figura 4.4 - Gráfico da razão das medidas para os deslocamentos.....	63
Figura 4.5 - Gráfico da razão das medidas para as deformações.	64

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Relação entre os dimensionais dos corpos-de-prova utilizados em diferentes países.....	13
Tabela 4.1 – Dados obtidos a partir do extensômetro de contato.....	58
Tabela 4.2 – Dados obtidos a partir do <i>software</i> DIC.....	62
Tabela 4.3 – Análise dos resultados considerando separadamente os dois grupos de ensaios.....	66

Nomenclatura

Letras Latinas

A	área da seção transversal	[m ²]
D	diâmetro	[m]
E	módulo de Young	[N/m ²]
e	tensão elétrica	[V]
g	passo do retículo	[m]
I	Intensidade luminosa	[cd]
K	sensibilidade à deformação	
L	comprimento útil	[m]
l	comprimento do fio	[m]
N	ordem da franja	
n	índice de refração	
p	constante óptico-mecânica	
P	carga externa axial	[N]
R	resistência elétrica	[Ω]
Ur	módulo de resiliência	[J]

u	deslocamento relativo	[m]
x	coordenada abscissa de um ponto	[m]
y	coordenada ordenada de um ponto	[m]
C_{cc}	<i>cross correlation criterion</i>	
C_{LS}	<i>least squares criterion</i>	

Letras Gregas

α	deslocamento da franja	[m]
γ	deformação tangencial	
ν	coeficiente de Poisson	
ϵ	deformação de engenharia	
σ	tensão de engenharia	[N/m ²]
ρ	resistividade do material	[$\Omega \cdot m$]
λ	comprimento de onda	[m]
Λ	período de modulação	[s]

Subscritos

o inicial

f final

e escoamento

w trabalho

LR limite de resistência

máx máximo

Fratura fratura

eff efetivo

B bragg

ref referência

cur atual

rc transformada do sistema de referência para o sistema de coordenada atual

xx plano xx

yy plano yy

Xy plano xy

Abreviações e Siglas

CCC	cúbica de corpo centrado
CFC	cúbica de face centrada
ESPI	<i>Electronic Speckle Pattern Interferometry</i>
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
ROI	<i>Region of Interest</i>

Capítulo 1 - Introdução

O desejo de toda indústria é ser reconhecida no mercado como uma empresa de excelência naquilo que faz. Nesse sentido, as corporações buscam inovações que lhes deem vantagens competitivas sobre a concorrência, isto é, buscam o desenvolvimento de novos produtos que apresentem desempenho e confiabilidade maior ou igual à versão anterior, a um menor custo.

A fim de atingir esses objetivos, as empresas comumente optam entre dois caminhos: alterar o material utilizado e/ou reduzir o volume de material a ser empregado para a produção. A primeira opção refere-se à substituição do material previamente utilizado por outro que seja mais barato e que apresente melhores características específicas requeridas pelas condições de trabalho. A segunda alternativa é apoiada no aumento da confiabilidade dos modelos computacionais e de fabricação aplicados na engenharia que permitem alterar a geometria e o processo de fabricação da peça, reduzindo o material necessário para a produção, sem afetar as principais características do componente. Assim, para se usufruir de tais ações é imprescindível o conhecimento de todos os esforços que a peça sofrerá nas mais diversas condições de operação, especialmente aquelas que possuem um grande grau de complexidade.

Além das forças que são aplicadas à peça durante toda sua vida útil, também é de extrema importância o conhecimento das propriedades dos materiais que a compõem. Essas propriedades são empregadas para diversos fins como: a escolha do material que será utilizado na fabricação da peça, a aprovação da qualidade do material proveniente do fornecedor, entre outros escopos. Elas são obtidas a partir de ensaios que visam avaliar o comportamento de tal material sob determinadas condições de esforço. Ensaios de tração, torção e flexão são algumas das técnicas existentes e comumente utilizadas na engenharia e que apresentam uma grande importância para o levantamento correto de tais dados, uma vez que eles estão ligados principalmente a fatores de segurança dos projetos. Esses ensaios são

também muito aplicados para a validação de modelos numéricos feitos a partir de softwares de simulação com o fim de verificar o comportamento do componente.

O principal objetivo deste trabalho será o desenvolvimento de um sistema próprio de medição de deformações baseado no ensaio de tração, que consiste em um ensaio no qual uma carga unidirecional e crescente é aplicada axialmente a um corpo-de-prova que possui dimensões e geometrias padronizadas até a sua ruptura, conforme será explicado no capítulo 2.

Para que esse ensaio gere resultados úteis, faz-se necessária a medição dos deslocamentos e deformações que o corpo-de-prova sofre. O modo mais tradicional e difundido de se fazer essas medições é com extensômetros eletromecânicos, também conhecidos por *strain-gauges*, cujo funcionamento será explicado adiante.

Apesar da facilidade e do grande conhecimento existente sobre esse método ele não pode ser aplicado em certas situações, pois apresenta limitações, como a medição de deslocamentos e deformações de regiões locais e pequenas, além de possuir sensibilidade à apenas uma direção.

Por isso, outras formas de obter tais medidas estão sendo desenvolvidas a partir da utilização de dispositivos baseados em princípios ópticos associados a diversos aparatos como câmeras, espelhos e retículos incorporados à superfície das peças. Alguns dos métodos baseados na óptica serão apresentados nesse trabalho como: grades de Bragg, técnica de Moiré, *Electronic Speckle Pattern Interferometry* (ESPI) e a *Digital Image Correlation* (DIC).

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica buscando conceitos e informações na literatura relacionadas com o tema e objetivo do projeto. Assim, apresenta-se uma rápida revisão sobre o ensaio de tração e sobre os diferentes métodos utilizados por dispositivos existentes no mercado para medição das deformações.

2.1. Ensaio de tração

O ensaio de tração é conhecido por ser um experimento básico e universal de engenharia de forma a obter propriedades intrínsecas ao material como as que serão descritas no decorrer deste tópico e que são de grande utilidade para diversos fins, como a seleção de materiais, desenvolvimento de novas ligas e controle de qualidade dos materiais. Esse procedimento também pode ser utilizado para obtenção de maiores informações sobre o modo de falha do componente.

Basicamente, esse ensaio consiste na aplicação de uma carga crescente a uma taxa específica axialmente a um corpo-de-prova padrão de dimensões conhecidas para alongá-lo até sua ruptura.

A norma utilizada no ensaio de materiais metálicos é a *American Society of Testing and Materials E8* (ASTM E8) que contém diversos padrões de ensaio aplicáveis a corpos de provas provenientes dos mais variados tipos de materiais, dimensões e processos de fabricação. O ensaio deve ser realizado à temperatura ambiente (de 10 a 38°C) e os resultados apresentados são considerados satisfatórios. A amostra e o ambiente são padronizados para que possa ser possível a comparação e a reprodução das respostas do material ao esforço axial. Porém, os resultados obtidos com o ensaio de tração podem não representar totalmente as propriedades de resistência e ductilidade do produto final ou o seu comportamento em serviço quando utilizado em ambientes diferentes dos ensaiados. Outro fator

importante diz respeito ao alinhamento da amostra a ser ensaiada com a linha central do equipamento durante o ensaio, pois caso isso não ocorra, esforços de flexão serão introduzidos nos resultados acarretando erro nos cálculos das propriedades [2].

Um corpo-de-prova padrão pode ser preparado em um formato quadrado (figura 2.1) ou cilíndrico (figura 2.2) na seção ao longo do comprimento útil dependendo do padrão utilizado. As extremidades das amostras devem ter condições de superfície e comprimento suficientes para que ocorra uma boa fixação junto à máquina durante o experimento. O comprimento útil inicial, L_0 , é padronizado em muitos países, mas o diâmetro inicial, D_0 , ou a área da seção longitudinal pode variar conforme descrito na tabela 2.1. É importante salientar que, quando necessária, a etapa de tratamento térmico deve acontecer previamente ao processo de usinagem para a produção final da peça. Isso deve acontecer para prevenir a formação de óxidos na superfície, o que pode acarretar uma concentração de tensão e conseqüentemente uma alteração no resultado final. Porém, materiais que possuem uma dureza elevada ou algum revestimento na superfície fogem a essa regra [1, 2, 3].

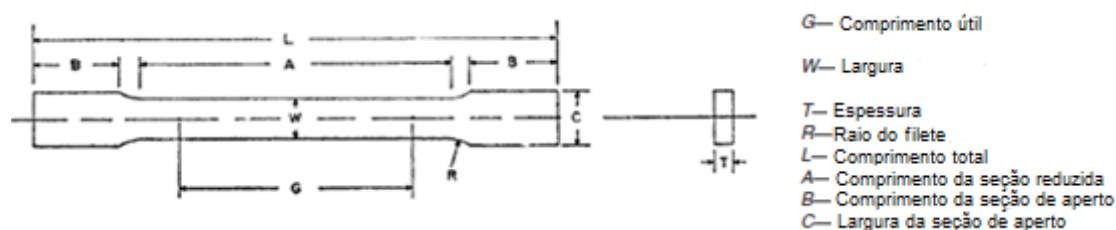


Figura 2.1 - Corpo-de-prova padronizado (formato quadrado).

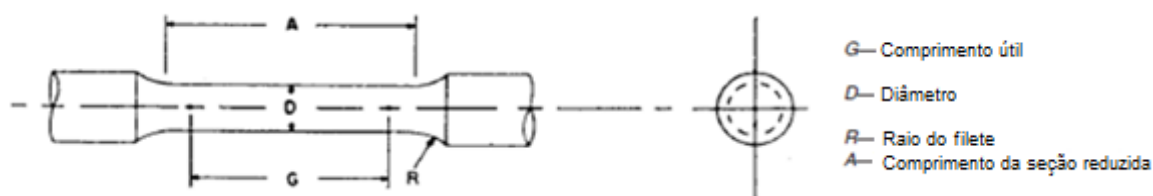


Figura 2.2 - Corpo-de-prova padronizado (formato cilíndrico).

Tabela 2.1 - Relação entre os dimensionais dos corpos-de-prova utilizados em diferentes países.

Tipo de Amostra	Estados Unidos (ASTM)	Grã-Bretanha	Alemanha
Chapa ($L_o / \sqrt{A_o}$)	4.5	5.65	11.3
Haste ($L_o / \sqrt{D_o}$)	4.0	5.0	10.0

Para a realização desse ensaio, é possível empregar desde equipamentos mais simples até outros mais sofisticados, como os controlados por sistemas eletrônicos. Em muitos casos, são utilizadas máquinas de ensaio universal para a realização desse tipo de experimento. Elas são ajustadas por parafusos mecânicos ou sistemas hidráulicos e são denominadas universais, porque também podem ser aplicadas para a realização de ensaios de compressão, flexão e torção. Na figura 2.3 a) pode-se observar um equipamento relativamente simples que usa dois grandes parafusos para aplicar a carga, enquanto a figura b) representa uma máquina de ensaio hidráulica que utiliza a pressão proveniente do óleo em um pistão para realizar a aplicação da carga [3].

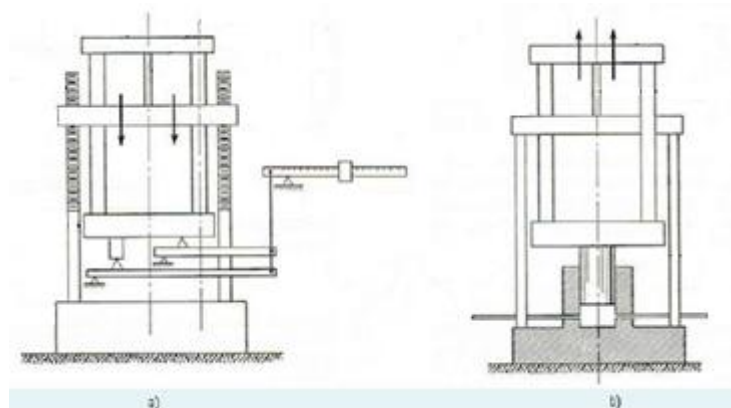


Figura 2.3 - Equipamentos universais a) acionada por parafuso e b) por sistema hidráulico.

Diversas técnicas são utilizadas para medir a carga e o deslocamento durante o ensaio. A mais conhecida e empregada é baseada na utilização de células de

carga, que são sensores que emitem sinais elétricos proporcionais à carga aplicada, e extensômetros que são responsáveis por medirem a deformação.

2.1.1. Curva tensão-deformação

Quando o corpo-de-prova é sujeito a um carregamento externo, o metal sofre deformações que podem ser classificadas como elásticas ou plásticas. Inicialmente, o metal se deforma de maneira elástica, ou seja, é possível observar uma relação linear entre a carga aplicada e a deformação do corpo. Esses dois parâmetros são utilizados para o cálculo da tensão de engenharia e da deformação de engenharia como explicitado nas equações 2.1 e 2.2 [1]:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad \text{Equação 2.1}$$

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde: σ é a tensão de engenharia;

ε é a deformação de engenharia;

P é a carga externa axial;

A_0 é a área da seção transversal inicial do corpo-de-prova;

L_0 é o comprimento útil inicial do corpo-de-prova;

L_f é o comprimento útil final do corpo-de-prova.

A unidade utilizada para a tensão de engenharia é o Pascal (Pa) ou o N/m² de acordo com o SI.

A partir do gráfico gerado por esses dois parâmetros, como mostrado na figura 2.4, obtêm-se diversas propriedades como as que são listadas a seguir.

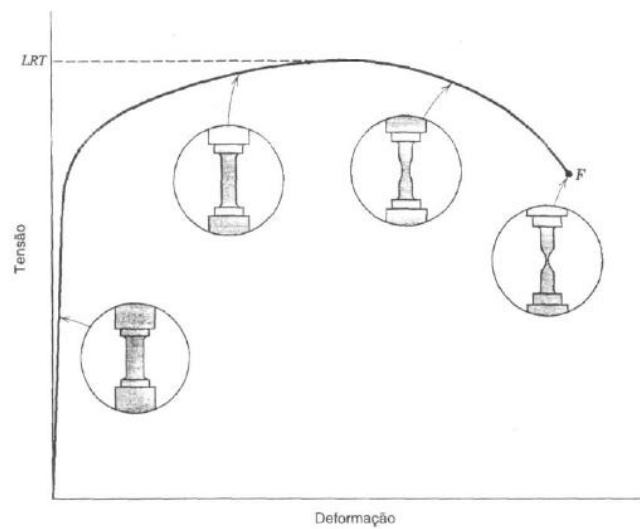


Figura 2.4 - Tensão-deformação relacionadas sob a aplicação de uma carga axial.

2.1.2. Módulo de Young

Durante a deformação elástica, a tensão e a deformação de engenharia se relacionam pela lei de Hooke e o coeficiente angular da curva nos indica o módulo de Young (E), equação 2.3 [1].

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{Equação 2.3}$$

Esse parâmetro é importante para projetos em que o ponto crítico consiste na deflexão do material. Para ilustrar essa influência podemos citar exemplos como: a deflexão de vigas estruturais em pontes, prédios e navios ou em objetos mais simples como equipamentos esportivos para prática de tênis que também devem possuir valores específicos de mola ou módulo de Young [1].

2.1.3. Tensão de Escoamento

Considerando a curva tensão-deformação, caso a aplicação da carga continue após a região elástica, chega-se à tensão de escoamento. Essa tensão representa o momento em que a deformação passa de elástica para plástica. A tensão de escoamento, σ_e , pode ser obtida pela divisão entre a carga de escoamento, P_e , e a área da seção transversal inicial do corpo-de-prova, A_0 , equação 2.4[1].

$$\sigma_e = \frac{P_e}{A_0} \quad \text{Equação 2.4}$$

Esse fenômeno é facilmente observado nas curvas de tensão-deformação de materiais que possuem estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), como o ferro e o aço. Nesse ponto o corpo-de-prova continua a se alongar sem uma mudança significativa da carga que está sendo aplicada. Por outro lado, materiais que possuem estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), como é o caso do alumínio, não apresentam um ponto de escoamento bem definido na curva. Dessa maneira, a tensão de escoamento é comumente calculada a partir da carga que causa uma deformação de 0,2% em relação ao comprimento no início, dividida pela área da seção transversal inicial da amostra conforme equação 2.5. A figura 2.5 exemplifica como obter a referida tensão a partir do traçado de uma reta na curva tensão-deformação obtida do ensaio [1, 4].

$$\sigma_e = \frac{P_{0,2\%}}{A_0} \quad \text{Equação 2.5}$$

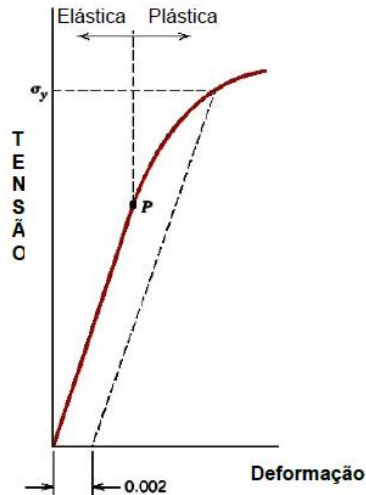


Figura 2.5 - Curva tensão-deformação de uma liga de alumínio.

A tensão de escoamento fornece informações a respeito do momento no qual ocorre a transição da deformação elástica para a deformação plástica e é considerado vital para diversos ramos da engenharia, sobretudo para a engenharia estrutural e de designs de componentes. Devido a essa importância é que em projeto é utilizado um fator de segurança para o cálculo dessa propriedade como mostrado na equação 2.6. Fatores de segurança levam em conta diversas considerações como a acurácia das cargas aplicadas nos componentes, a estimativa da deterioração do material e nas possíveis consequências que uma falha em tais estruturas pode acarretar, desde perdas de vida até no quesito econômico [3]. Geralmente automóveis e edifícios utilizam um fator de segurança igual a dois em seus projetos, enquanto projetos de elevadores empregam um coeficiente de segurança próximo a dez.

$$\sigma_w = \frac{\sigma_e}{\text{Fator de segurança}} \quad \text{Equação 2.6}$$

2.1.4. Limite de resistência

Após o ponto de escoamento do material, percebe-se que o carregamento necessário para que ocorra uma deformação permanente no corpo-de-prova apresenta um valor limitante. Nessas circunstâncias a amostra está encruada e o grau de dureza por deformação depende da natureza da mesma, da estrutura cristalina e da composição química do material ensaiado, fatores que afetam o movimento das discordâncias [1].

Se o carregamento continuar a aumentar, a curva tensão-deformação encontrará seu limite, ou seja, o ponto denominado limite de resistência à tração (equação 2.7). Nesse instante o corpo-de-prova está submetido ao maior esforço que ele pode suportar antes de se dar início à redução local da área da seção transversal no centro do comprimento útil, a estricção ou empescoçamento (figura 2.6) [1].

$$\sigma_{LR} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_0}$$

Equação 2.7



Figura 2.6 - Estringimento de um corpo-de-prova antes da fratura.

2.1.5. Tensão de Fratura

Passado o limite de resistência, a deformação plástica não é mais uniforme e a tensão tende a diminuir até a fratura. Dessa forma a tensão de fratura pode ser calculada pela carga em que o corpo-de-prova falha sobre a área da seção inicial da amostra (equação 2.8)

$$\sigma_{\text{Fratura}} = \frac{P_{\text{Fratura}}}{A_0} \quad \text{Equação 2.8}$$

2.1.6. Outras Propriedades

O ensaio de tração também pode fornecer informações sobre o módulo de resiliência (U_r) que quantifica a energia absorvida pelo corpo-de-prova na região de deformação elástica (equação 2.9) e a tenacidade que representa a energia absorvida pela amostra durante todo o ensaio até sua fratura. Essas duas propriedades também podem ser notadas pela curva tensão-deformação, como na figura 2.7 [1].

$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma \, d\epsilon = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y = \frac{\sigma_y^2}{2E} \quad \text{Equação 2.9}$$

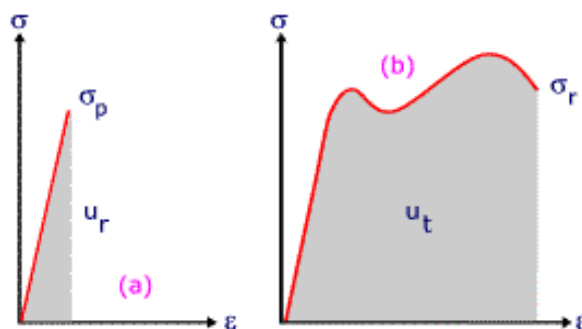


Figura 2.7 - Representação a partir do gráfico de: a) Resiliência e b) Tenacidade

2.2. Extensometria de contato

Transdutores de deformação chamados extensômetros elétricos são dispositivos de medida que transformam pequenas variações das dimensões em variações proporcionais de sua resistência elétrica [5].

Apesar de diversos métodos de inspeção não-destrutivos para medidas de deformações e tensões serem desenvolvidos e explorados, nenhum outro possui tanta aplicação quanto os extensômetros elétricos, pois são precisos nas medidas e de fácil manuseio. Esses dispositivos podem ser colados diretamente na peça a ser medida ou podem estar inseridos em um mecanismo de garras presas ao corpo de prova, como demonstrado na figura 2.8 [5].



Figura 2.8 - Extensômetro eletromecânico do tipo *clip-on gage*.

O princípio de funcionamento dos extensômetros elétricos é a lei de Hooke. Se um dado material é tracionado, a força aplicada ao material é proporcional à deformação causada na região elástica, mantendo uma relação constante entre a magnitude da força externa e a quantidade de deformação, como já visto anteriormente pela equação 2.3. Dessa forma, esse instrumento é baseado no fato de que metais mudam sua resistência elétrica quando sofrem deformação. A figura 2.9 mostra um fio metálico, como os utilizados na fabricação dos extensômetros: a linha contínua representa o fio antes da deformação e que possui uma resistência elétrica R . Já a linha pontilhada exibe o fio metálico alongado com resistência igual

a $R + \Delta R$. Para essa situação, a resistência elétrica é calculada pela equação 2.10 [5].

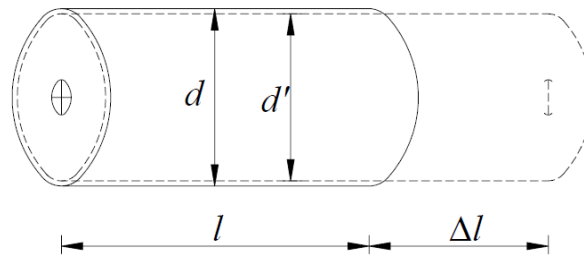


Figura 2.9 - Deformação de um material sob tração.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \text{Equação 2.10}$$

Onde: A é a área da seção transversal do fio;

l é o comprimento do fio;

ρ é a resistividade do material do fio.

Aplicando o logaritmo em ambos os lados da equação 2.10 e depois derivando em relação ao tempo, resultamos em:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} \quad \text{Equação 2.11}$$

Com algumas operações algébricas chegamos a:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon \quad \text{Equação 2.12}$$

O termo K apresentado na equação 2.12 é chamado de sensibilidade à deformação do material metálico, ou seja, ele é uma propriedade intrínseca ao

material resistivo utilizado no extensômetro. Esse parâmetro indica que a mudança relativa na resistência é proporcional à magnitude da deformação medida, logo é desejável que o material utilizado tenha um valor de K constante, isto é, sem depender da deformação, o que torna incremento de resistência uma função apenas da mudança das dimensões do fio.

Um circuito elétrico especial é empregado no sistema do extensômetro de forma que uma pequena alteração na resistência causada pela deformação do fio crie uma instabilidade no sistema elétrico de forma a permitir a medição do alongamento. Este circuito especial é chamado de ponte de *Wheatstone* e é muito utilizado por apresentar uma grande precisão na medida de pequenas variações de resistência elétrica [6].

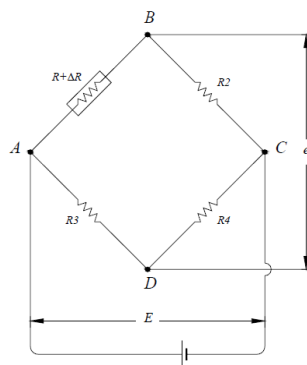


Figura 2.10 - Circuito Especial: Ponte de Wheatstone.

De forma geral, é sabido que resistores em série atuam como divisores de tensão e que a tensão entre resistores em paralelo não é alterada, nesse caso, para a ponte de *Wheatstone*, o único parâmetro variável é a corrente [6]. No circuito mostrado na figura 2.10, tem-se uma fonte aplicando uma tensão elétrica a dois resistores em série. Dessa forma, a tensão no resistor R_3 pode ser calculada da seguinte forma:

$$e_{R3} = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] E \tag{Equação 2.13}$$

De forma análoga para calcular-se a tensão da resistência ligada ao extensômetro aplica-se equação a seguir:

$$e_{AB} = \left[\frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R_2} \right] E \quad \text{Equação 2.14}$$

Andolfato et al. [5] mostram que é necessário o cálculo da tensão do circuito (e) para que seja possível calcular a deformação, portanto:

$$e = e_{R_3} - e_{AB} = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R_2} \right] E \quad \text{Equação 2.15}$$

Considerando que $R = R_2 = R_3 = R_4$ e assumindo que $2R \gg \Delta R$ tem-se que:

$$e \cong + \frac{E}{4} \frac{\Delta R}{R} \quad \text{Equação 2.16}$$

Dessa forma, a voltagem de saída da ponte (e) é proporcional a variação relativa na resistência do extensômetro. Substituindo a equação 2.12 na equação 2.16, tem-se:

$$e \cong \pm \frac{E}{4} K \varepsilon \quad \text{Equação 2.17}$$

Assim, percebe-se de forma explícita que a voltagem de saída do circuito (e) é proporcional à deformação ε . Logo, para o cálculo da deformação do fio, basta calcular a voltagem de saída da ponte. Ou, como em muitos casos, o *strain-gauge* é feito de um material piezelétrico que ao sofrer deformação e conseqüentemente ter sua resistência elétrica variada, tem o valor da corrente elétrica proporcional a essa

deformação, ou seja, a piezoelectricidade é interpretada como a produção de energia elétrica devido a deformação do material [7].

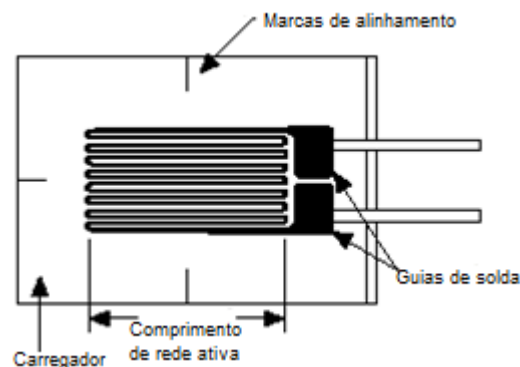


Figura 2.11 - *Strain-gauge* de ligação metálica.

Os sistemas de medições que utilizam extensometria de contato no corpo de prova possuem uma tecnologia bastante conhecida, por conseguinte, fornecem resultados confiáveis com alta resolução o que permite medir mesmo as menores deformações durante o ensaio; além disso, são leves e de fácil manuseio. Porém, estes extensômetros são sensíveis apenas às deformações na direção paralela ao enrolamento principal, dessa forma ele deve ser fixado à peça de forma coerente à medida desejada.

Para a obtenção da deformação em várias direções, devem-se utilizar múltiplos *strain-gauges*. Outra desvantagem é que estes dispositivos fornecem apenas a deformação local da amostra e, dessa forma, em grandes peças, é necessário o uso de diversos *strain-gauges* em série de forma a medir a deformação total do objeto.

2.3. Extensometria óptica

Embora conceitos como difração e interferência sejam relativamente antigos, eles só tiveram utilização em aplicações ligadas à engenharia nas décadas de 50 e 60 com o surgimento do laser. Indústrias e universidades investem na pesquisa e

desenvolvimento de instrumentos baseados nos princípios ópticos com o objetivo de melhorar as informações obtidas nos ensaios, pois a extensometria de contato apresenta limitações, como a submissão.

Esse limitante corresponde a uma leve deformação do sistema mecânico devido à atuação de uma carga, que pode acarretar erros significativos nos resultados dos ensaios, especialmente em experimentos de alta capacidade com exigências de grande deslocamento, pois a saída do deslocamento registrada pelo sistema é a soma da submissão do sistema de medição com a deformação do corpo-de-prova. Dessa forma, naqueles ensaios nos quais são necessárias medições muito precisas da deformação do corpo-de-prova, o uso de extensômetros ópticos evita totalmente os erros acarretados pela submissão do sistema.

A extensometria óptica também apresenta vantagem, pois não exerce influência sobre o corpo-de-prova do ensaio, não apresenta problemas de deslizamento em situações extremas e erros causados pela inércia de peças móveis.

Em razão de existirem diversos métodos de medição, muitos critérios podem ser considerados na escolha de qual técnica deve-se utilizar como: custo, tamanho da região de interesse, grandeza a medir, sensibilidade às vibrações, o intervalo esperado de variação da medição e a simplicidade de execução [15].

A seguir serão descritos alguns dispositivos de medição existentes no mercado que se utilizam de princípios ópticos para seu funcionamento.

2.3.1. Grades de Bragg

Os sensores com grade de Bragg são utilizados em fibras ópticas para quantificar e medir vários parâmetros como: temperatura, pressão, tensão, corrente elétrica e outros relacionados à termodinâmica, com grande precisão e resolução.

Devido ao fato de que, do ponto de vista técnico-científico, sensores baseados em fibras ópticas ainda sejam classificados como uma tecnologia de ponta, é que grande parte dos sensores atuais são baseados nesse tipo de material.

As grades de Bragg são estruturas simples presentes no núcleo das fibras ópticas e possuem um elevado potencial para serem produzidas em grande escala, como pode ser observado na figura 2.12.

Com o surgimento das grades de Bragg, observou-se que elas podem apresentar excelentes resultados quando aplicadas como sensores de grandezas físicas, estáticas e dinâmicas. Observa-se uma grande vantagem em sua utilização, pois a grandeza a ser medida está contida no comprimento de onda refletida. Essa característica torna o sistema auto referenciável, independente de flutuações da luz e imune a perdas causadas ao sensor e à fonte óptica [10,11].

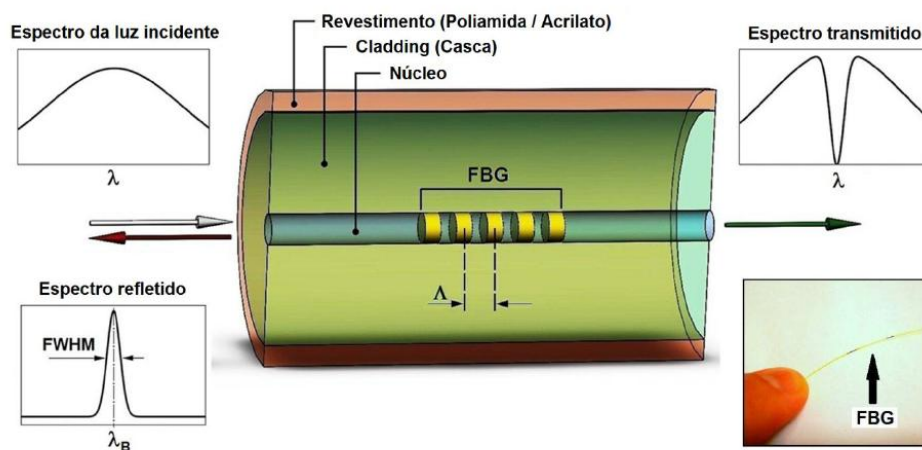


Figura 2.12 - Vista em corte de uma fibra óptica com uma grade de Bragg gravada em seu núcleo.

A baixa perda de inserção e pequena largura de faixa permitem a fácil multiplexação de sensores baseados em grades de Bragg através de técnicas como multiplexação em comprimento de onda no domínio do tempo e espacialmente [10]. Ou seja, essa técnica consiste em que usando-se apenas uma fonte de luz, vários

sensores possam ser colocados em uma mesma fibra realizando a leitura de uma grande variedade de sinais conforme mostrado na figura 2.13 [10].

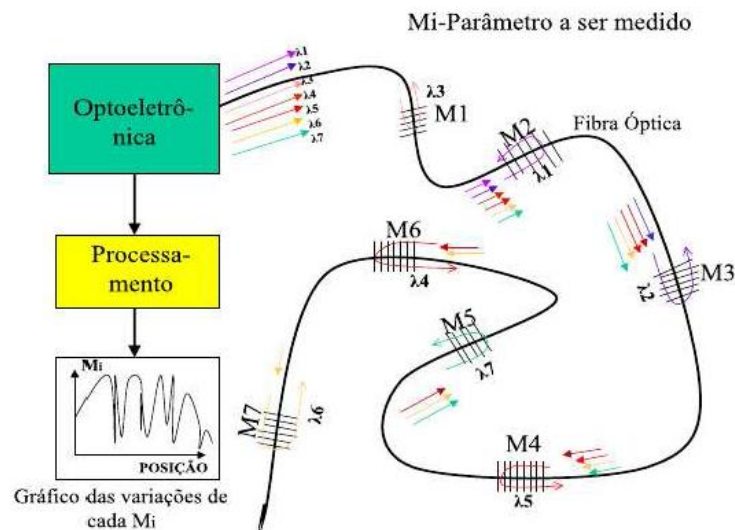


Figura 2.13 - Princípio de operação de um sistema de sensoriamento distribuído utilizando uma rede óptica com grades de Bragg.

Como vantagens desse tipo de sensor pode-se citar a resposta linear que ele apresenta em relação à deformação aplicada, em contraste com muitos outros sensores elétricos. Outros aspectos vantajosos apresentados por essa técnica são devidos às fibras ópticas serem imunes à interferência eletromagnética, possuírem baixo peso, pequenas dimensões, estabilidade e resistência à radiação. Porém, como as dimensões da grade são pequenas, elas funcionam apenas como sensores pontuais, e se encaixam facilmente nas estruturas cujas características desejam-se medir. Por exemplo, sensores de deformação com grades de Bragg foram utilizados em uma ponte em Las Cruces, Novo México, para monitorar as condições desta ponte, conforme pode ser visto na figura 2.14 [10,12].

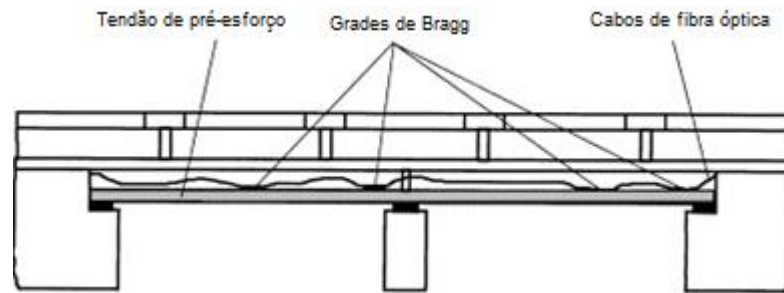


Figura 2.14 - Diagrama com os sensores para monitoramento de tensões em uma ponte.

De acordo com a Lei de Bragg, o comprimento de onda do pico da reflexão de uma grade de Bragg (λ_B) será dado pela equação 2.18.

$$\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \Lambda \quad \text{Equação 2.18}$$

Onde: n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo;

Λ é o período de modulação do índice de refração.

Tanto Λ quanto n_{eff} podem variar, de acordo com os estímulos que a grade receber, levando o comprimento de onda λ_B a nos fornecer a intensidade de tais estímulos [10].

Como visto na equação 2.2, a deformação é definida pela variação do comprimento da fibra (Δl) pelo comprimento original da fibra (l). A elongação de uma fibra contendo uma grade de Bragg irá variar Λ proporcionalmente à deformação que a fibra foi submetida. Além do mais, por efeito fotoelástico, tem-se uma variação do índice de refração, também proporcional à deformação. Levando em conta todas essas variáveis, a expressão para a variação do comprimento de onda de Bragg (λ_B) em função da deformação é dada pela equação 2.19.

$$\Delta \lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial l} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l \quad \text{Equação 2.19}$$

Considerando a temperatura constante, uma vez que o foco está na variação do comprimento de onda de Bragg em função da deformação da fibra, temos que a equação 2.19 pode ser reescrita como a equação 2.20.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - p_e)\varepsilon_z \quad \text{Equação 2.20}$$

Onde p_e é uma constante óptico-mecânica definida pela equação 2.21.

$$p_e = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad \text{Equação 2.21}$$

Sendo que p_{11} e p_{12} são componentes do tensor óptico-mecânico, e ν é a razão de Poisson [10].

Na figura 2.15 podem-se observar os efeitos que uma carga alternada de tração e compressão acarreta à fibra óptica. A figura mostra a atuação da grade como sensor e pode-se observar o deslocamento no comprimento de onda de Bragg ao ser submetido à tração ou à compressão. A tração apresenta uma variação de comprimento de onda positivo, pois está relacionada com o aumento na periodicidade espacial da rede de Bragg. Enquanto que, quando submetida à compressão, a periodicidade espacial diminui e assim temos uma variação do comprimento de onda negativo [14]. Sendo assim, é possível afirmar que as redes de Bragg podem ser utilizadas como sensores de deformação, uma vez que se pode observar qualquer alteração através da variação do comprimento da onda de Bragg [14].

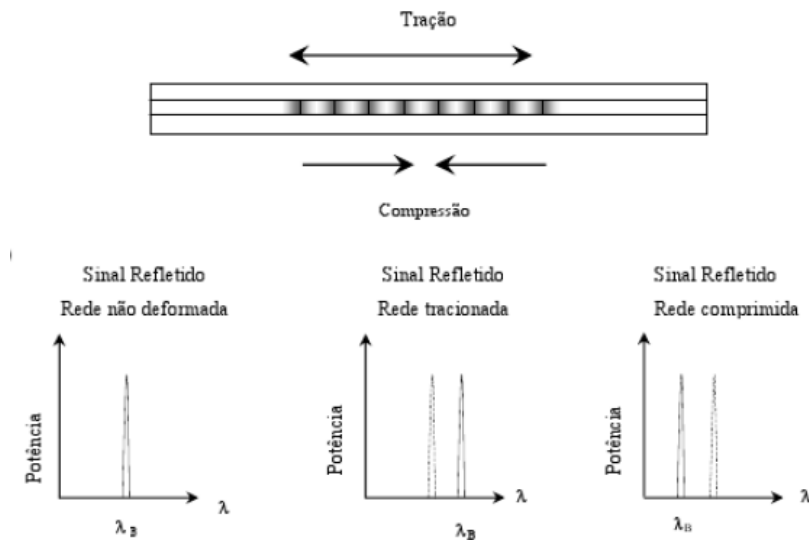


Figura 2.15 - Deslocamento espectral de uma rede de Bragg submetida à tração e compressão.

2.3.2. Técnica de Moiré

Entre as técnicas ópticas utilizadas para se obter os campos de tensões de estruturas complexas, a de Moiré é a que se destaca por apresentar os menores índices relativos de ruídos. Baixo custo e capacidade de fazer medições na superfície plana de diversos materiais estruturais sem aparelhos que requerem grandes investimentos, também são algumas das vantagens dessa técnica. Um fato curioso é que, controversamente, esse efeito é considerado um ruído indesejável para profissionais que trabalham com fotografia.

Moiré é uma palavra de origem francesa e se refere ao brilho úmido da seda, onde se percebe bandas brilhantes e escuras alternadamente, figura 2.16. O fenômeno acontece quando dois padrões uniformes de linhas ou pontos repetidos de mesmo espaçamento são superpostos, como acontece quando duas cercas de arame paralelas são vistas uma através da outra [16].

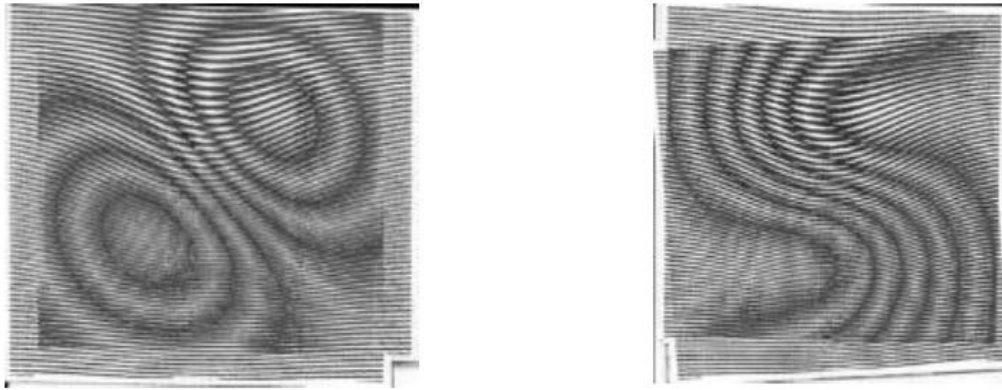


Figura 2.16 - Padrões de franjas de moiré

As informações que regem o comportamento geral do fenômeno provêm do estudo das relações entre os espaçamentos e inclinações das franjas de moiré e da geometria dos retículos que as originaram. Essas franjas são utilizadas como um método experimental para determinar deslocamentos ou deformações na superfície de corpos sujeitos a carregamentos [16].

Para a medição da deformação, os retículos são projetados no corpo e essa imagem é gravada fotograficamente. Em seguida, com o objeto deformado devido ao carregamento, uma nova imagem é capturada e então sobreposta àquela obtida anteriormente à deformação, como esquematizado na figura 2.17. Os retículos utilizados para projeção podem ser estruturas periódicas ou quase periódicas de vários formatos tais como: linhas paralelas, cruzadas ou pontos, cuja constituição pode ser física ou virtual. E a análise do padrão de interferência gerado permite a quantificação das diferenças de passo e orientação dessas estruturas superpostas [16].

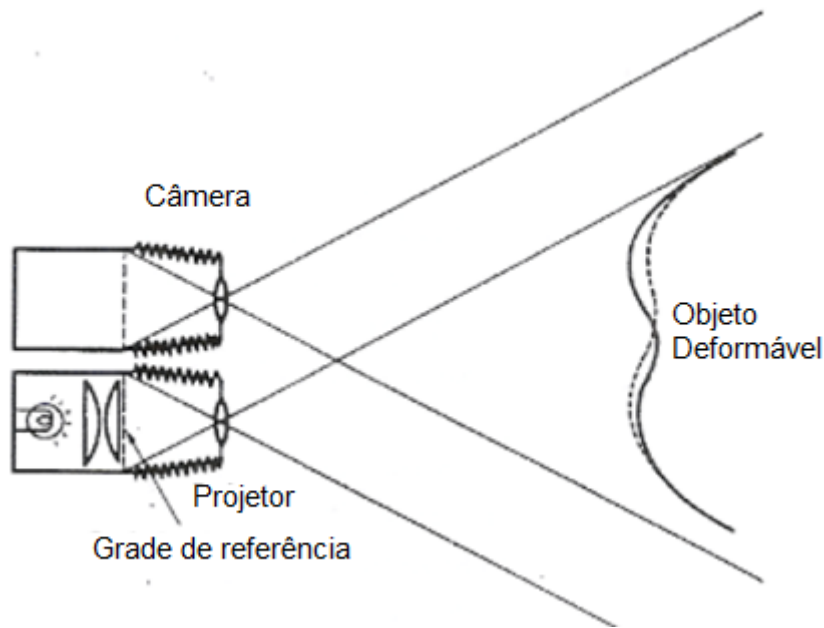


Figura 2.17 - Medição de deformações utilizando a Técnica de Moiré.

A superposição dos retículos produz um efeito óptico por interferência mecânica que são as franjas e que podem ser descritas a partir da equação 2.22 que representa o relacionamento contínuo entre intensidades e deslocamentos [17].

$$\begin{aligned}
 I_m = & I_0 + b_1 \cos \left[2\pi \frac{u}{g} + \alpha \right] \\
 & + b_2 \cos \left[2\pi \frac{2u}{g} + 2\alpha \right] \\
 & + b_3 \cos \left[2\pi \frac{3u}{g} + 3\alpha \right] + \dots = I_0 + \sum_{k=1}^K b_k \cos \left[k \left(2\pi \frac{u}{g} + \alpha \right) \right]
 \end{aligned}$$

Equação 2.22

Onde: I_0 representa as variações de intensidade do fundo;

b_k e k descrevem o perfil das franjas de *moiré*;

α é o deslocamento das franjas;

g é o passo (período) do retículo aderido ao corpo-de-prova (retículo do corpo).

Da equação 2.22 resulta que quando existir uma máxima intensidade de luz transmitida através do conjunto, tem-se uma coincidência perfeita entre a posição das linhas do retículo de referência e o do corpo. Vale lembrar que o retículo do corpo indeformado é igual ao retículo de referência. De forma similar, quando existir uma mínima intensidade de luz transmitida, significa que não há coincidência entre os retículos. As franjas são visíveis a olho nu, não exigindo câmera de alta resolução, porém os retículos normalmente não são visíveis. Tal relação de intensidade das franjas pode ser observada na figura 2.18 [16].

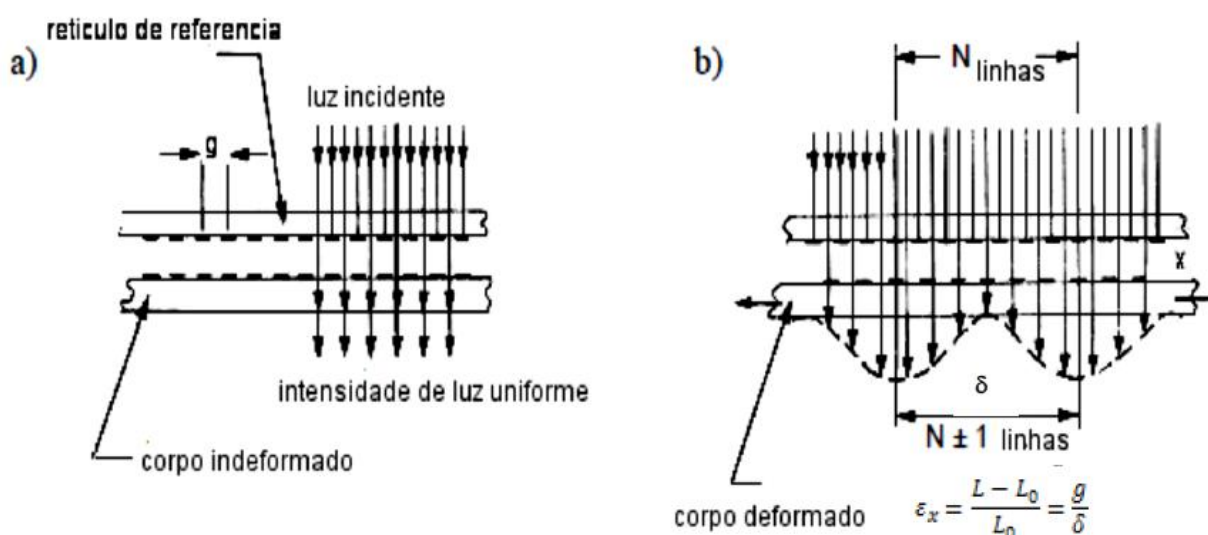


Figura 2.18 - Interação entre o retículo de referência e o retículo do corpo: a) corpo indeformado; b) corpo deformado.

Técnicas de análise de imagem são comumente utilizadas para medir as mudanças ocorridas entre os retículos pré e pós-carregamento e os valores para os deslocamentos e as deformações são fundamentados nesses dados encontrados. É importante ressaltar que ao longo da franja o valor do deslocamento é considerado constante. A sensibilidade da técnica de moiré é dependente principalmente do

período do retículo. Um período menor fornece uma sensibilidade maior, o que é desejável quando se necessita medir pequenos deslocamentos.

Na figura 2.19, tem-se um exemplo da sobreposição de dois retículos, um de referência (linha azul) e outro que foi submetido a um alongamento na direção x (linha preta). Considera-se que a coordenada x seja medida a partir do ponto onde as linhas dos dois retículos estejam alinhadas. Ao longo do eixo x percebe-se que quando os dois retículos estão alinhados, novamente corresponde ao local onde o deslocamento relativo é igual ao período g do retículo deformado. Por definição, as franjas de moiré correspondem ao lugar geométrico onde o espaço entre as linhas escuras dos retículos estão alinhadas. Numerando as franjas algebricamente começando com N=0 na franja de referência, então a franja N= +1 é o lugar geométrico dos pontos nos quais o deslocamento relativo é igual a +1 g, e respectivamente a franja N=-1 corresponde ao deslocamento relativo -1 g, e assim sucessivamente [16].

De uma maneira geral, pode-se afirmar que o deslocamento relativo (u) é dado por:

$$u = N g \quad \text{Equação 2.23}$$

Onde: u é o deslocamento relativo na direção considerada x;

N é a ordem da franja;

g é o período do retículo.

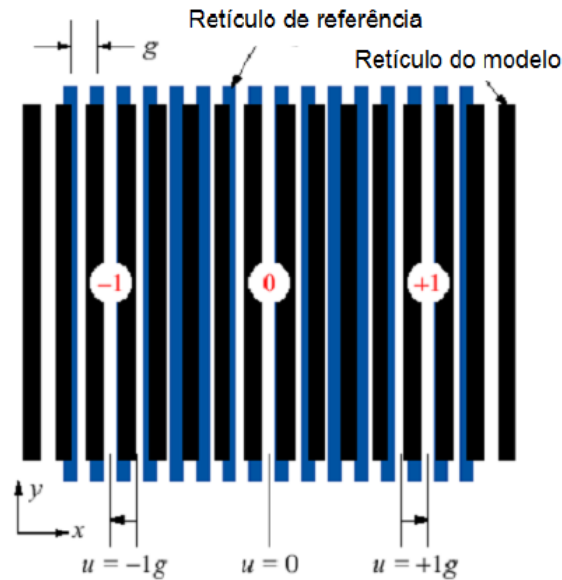


Figura 2.19 - Sobreposição de retículos para o cálculo do deslocamento

2.3.3. Interferometria Eletrônica de Padrões (*Electronic Speckle Pattern Interferometry - ESPI*)

Um fenômeno óptico de franjas de interferência de ondas eletromagnéticas que geram padrões de aspecto granuloso é a principal característica dessa técnica, a ESPI. A partir desse efeito, é possível realizar medições de deslocamento de diversas regiões de interesse no material ensaiado e a partir dessas medições, determinar-se os mapas de tensões e deformações. Na figura 2.20 pode-se observar a configuração básica de um sistema ESPI [18].

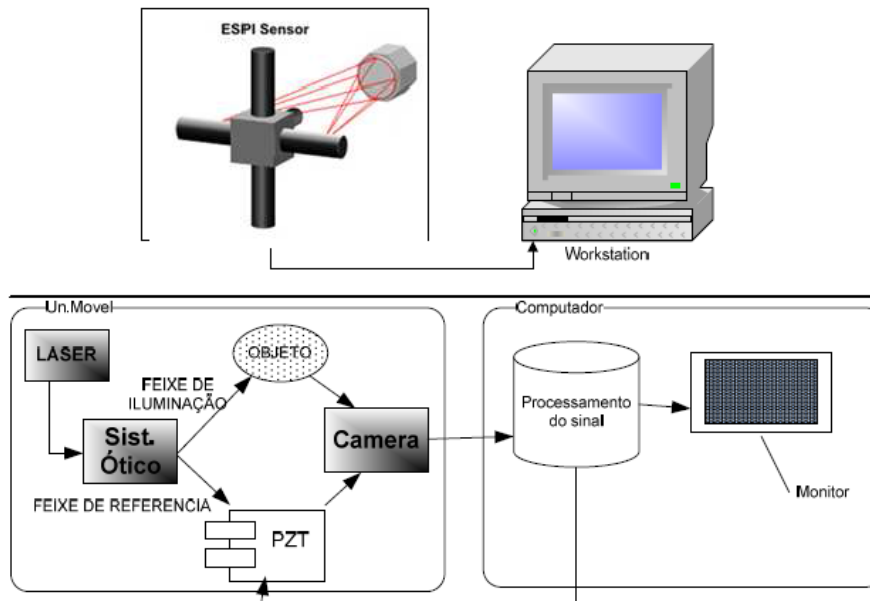


Figura 2.20 - Configuração básica do sistema ESPI.

Essa técnica pertence à metodologia dos ensaios não-destrutivos, sensível a pequenos deslocamentos, não apresenta contato com a peça a ser ensaiada e disponibiliza um campo de informações completo da superfície em análise.

Com o sistema mostrado, podem ser realizados tanto ensaios com carregamento estático quanto dinâmico, apresentando resultados similares aos resultados fornecidos pelas simulações de FEA em um rápido diagnóstico, ou seja, com significativa redução dos custos de análise.

A interferometria holográfica apresenta vantagens sobre a aplicação de técnicas clássicas como a de moiré, pois permite a utilização de equipamentos ópticos de qualidade inferior, como espelhos com acabamento superficial mediano. Porém, essa técnica está sujeita a diversas fontes de interferência que podem poluir a imagem, acarretando resultados errôneos devidos às más interpretações das franjas [18, 19].

Para que as medições sejam realizadas, é necessário que a superfície rugosa da peça seja iluminada por dois feixes de Laser coerente provenientes de uma mesma fonte, como esquematizado na figura 2.21 b). Com auxílio de uma câmera

de alta resolução faz-se a aquisição da imagem da peça livre. Essa imagem apresenta “manchas” (*speckles*) que são padrões de interferência que aparecem devido à reflexão aleatória do feixe incidente, gerando um espalhamento da luz coerente, como visualizado na figura 2.21 a) [18].

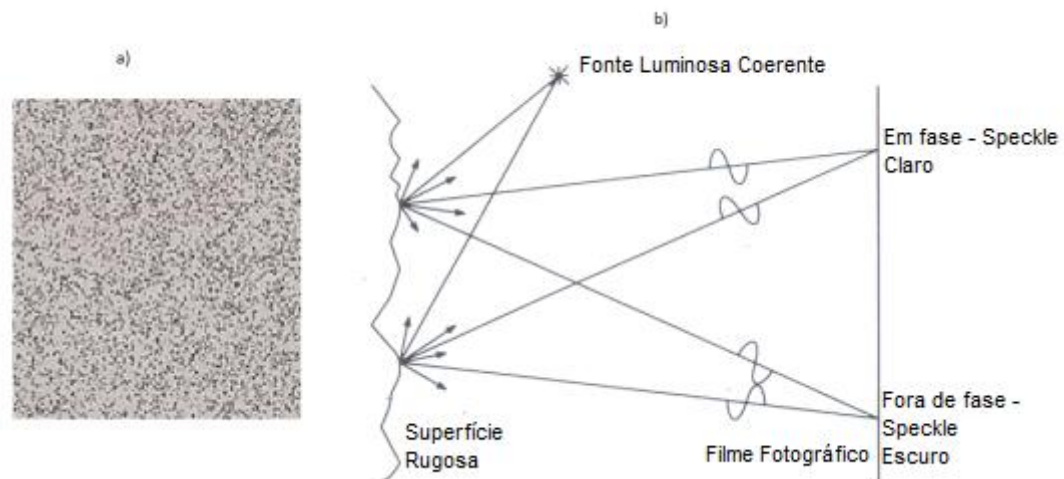


Figura 2.21 - a) Efeito speckle b) Esquema para iluminação da superfície rugosa.

Quando a peça é submetida a um carregamento, a superfície que está sendo analisada se deforma, alterando também a interferência das ondas. Comparando as imagens da amostra livre de carga com a imagem da amostra tracionada obtém-se o chamado padrão de franjas. A partir desse padrão, é possível analisar-se o deslocamento da superfície durante o carregamento. A essa sequência de figuras obtidas durante o andamento do ensaio é aplicado um procedimento denominado troca de fases, no qual cada imagem representa um estado de superfície e as diversas imagens obtidas são utilizadas para o cálculo de um mapa de fases qualitativo. Esse mapa traz também informações direcionais que podem ser transformadas em valores de deslocamento que relacionam a intensidade a esses valores [18, 19].

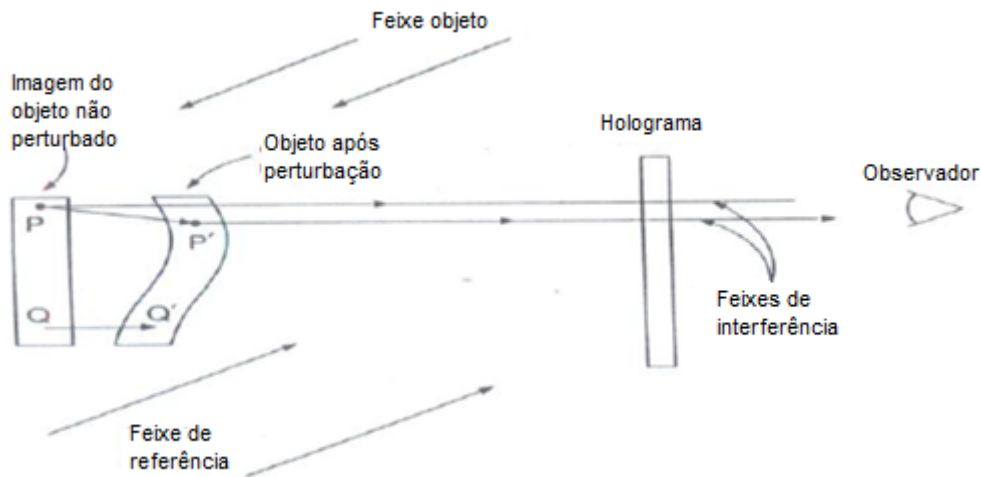


Figura 2.22 - Formação de franjas no objeto a ser ensaiado.

No entanto, a análise que é feita nesse mapa de franjas é muito qualitativa para a obtenção de dados quantitativos, de modo que algumas manipulações devem ser feitas. Para o cálculo de tensões, medem-se as deformações associadas ao movimento do objeto e em seguida faz-se os cálculos de tensões. Considere-se L_x , L_y e L_z como sendo as componentes x , y e z , respectivamente, da variação de posição do objeto. As componentes normais da deformação são dadas pela equação 2.24.

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial L_x / \partial x \\ \partial L_y / \partial y \\ \partial L_z / \partial z \end{bmatrix} \quad \text{Equação 2.24}$$

A partir da equação 2.24, podem-se calcular as deformações tangenciais com auxílio da equação 2.25.

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial L_x}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial L_y}{\partial x} \right) \\ \left(\frac{\partial L_y}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial L_z}{\partial y} \right) \\ \left(\frac{\partial L_z}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial L_x}{\partial z} \right) \end{bmatrix} \quad \text{Equação 2.25}$$

Resumidamente, para a aplicação da técnica ESPI faz-se necessária a aquisição de uma imagem de referência, da peça sem nenhum carregamento. Em seguida, uma carga conhecida deve ser aplicada resultando na formação de franjas de interferência.

A partir dessa imagem e das outras obtidas devido ao aumento da carga o sistema calcula um mapa de fases. Posteriormente ao mapa de fases, ocorre uma varredura na imagem resultando em um mapa de franjas. Com as informações anteriores é possível identificar os deslocamentos da superfície gerando o mapa de deslocamentos e conseqüentemente o mapa de deformações. Por fim, as tensões são calculadas a partir do gráfico de deslocamentos, resultando no mapa de tensões [18, 19]. A figura 2.23 ilustra esse procedimento.

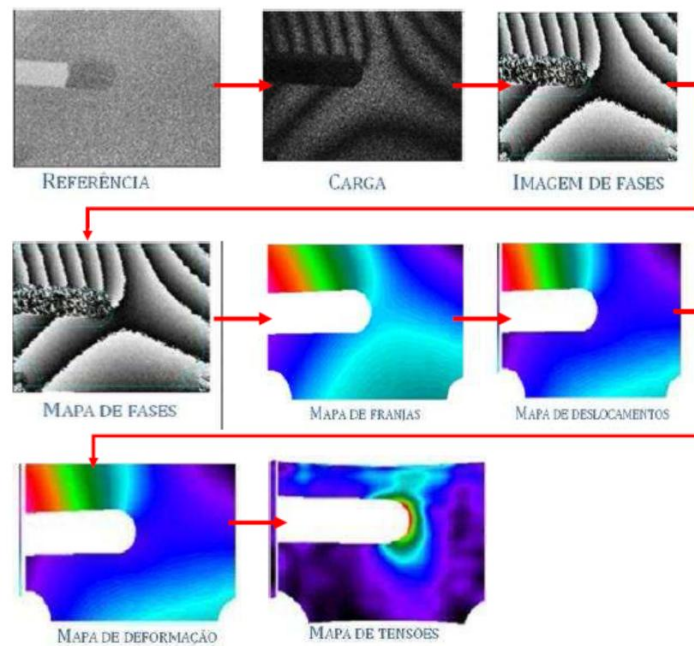


Figura 2.23 - Resumo da aplicação ESPI.

2.3.4. Correlação de Imagens Digitais (*Digital Image Correlation - DIC*)

O uso de técnicas baseadas na correlação de imagens digitais se torna mais comum à medida que computadores e câmeras digitais melhoram suas características de processamento com o avanço da tecnologia. Esse método de medição também é classificado como uma técnica óptica sem contato que apresenta alta sensibilidade e precisão de resultados, auxiliando na determinação das propriedades verdadeiras da mecânica do material para um melhor entendimento do comportamento do material [20, 21].

O princípio dessa técnica consiste em obter campos de deslocamento e deformação da região de interesse (ROI) da amostra sob deformação utilizando técnicas de processamento de imagens [22].

Basicamente, imagens de um corpo-de-prova são feitas enquanto esse é deformado por ação de uma carga. Este método é comumente usado para determinação de campos de deformação em uma escala macroscópica, isto é,

amostras sujeitadas a uma determinada carga em um ensaio de tração. Todavia, esta técnica também vem sendo usada em escala microscópica, onde um microscópio é empregado para realizar a captura das imagens da microestrutura. Essas imagens obtidas durante o ensaio são utilizadas como entrada para um *software* baseado nessa técnica [21, 22].

A ideia é, de alguma maneira, obter uma correspondência entre os pontos do material na imagem de referência, corpo de prova livre de carga, e as imagens das configurações seguintes, fotos subsequentes do ensaio com carga crescente aplicada à amostra.

O programa computacional faz isso por meio de pequenas subseções da imagem-referência denominadas *subsets*, e determinando suas respectivas localidades nas imagens seguintes por meio de diferenças na escala de cinza de cada *subset* que são processados por algoritmos avançados de correlação. Para cada *subset*, obtêm-se informações sobre o deslocamento e a deformação. Isso é possível, pois cada *pixel* possui um valor de intensidade e um *subset* é formado de diversos pixels permitindo que, estatisticamente, um *subset* seja diferente de outros [20, 22].

Para executar uma análise em 2D é necessária uma câmera. Essa é direcionada perpendicularmente à superfície do corpo de prova, o qual estará devidamente acoplado à máquina de tração, figura 2.24. Com isso, torna-se possível ler três diferentes deformações: as normais ε_{xx} , ε_{yy} e a cisalhante ε_{xy} [21].



Figura 2.24 - Esquema para obtenção das imagens DIC.

Pode-se considerar que as vantagens da DIC são semelhantes às da ESPI acrescentando-se o fato de que a DIC pode ser usada com qualquer fonte de luz, eliminando a necessidade do laser. Porém, as dificuldades desse método devem-se à sensibilidade ao contraste que é extremamente afetado por vibrações, tanto da máquina de tração quanto da câmera digital, por superfícies brilhantes e superfícies que apresentem pequena diferença de contraste [21].

O resultado final obtido por esse método é uma grade que contém os deslocamentos e deformações em relação à imagem de referência inicial, figura 2.25 [22].

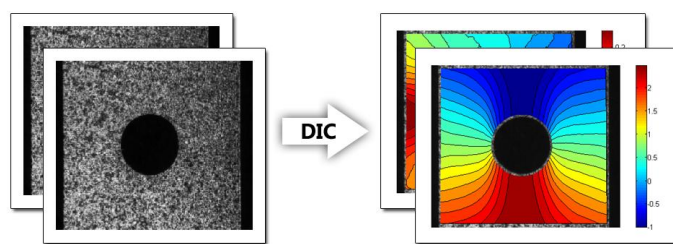


Figura 2.25 - Resultado final da técnica de DIC.

Capítulo 3 – Método de Medição

Como mencionado anteriormente, este trabalho teve como propósito o desenvolvimento de um sistema proprietário baseado na extensometria óptica para substituição da extensometria convencional, com execução de ensaios para validação de um programa de acesso livre, ou seja, sem a necessidade de licenças ou permissões para seu uso.

A priori, a técnica selecionada foi a ESPI devido à disponibilidade do equipamento no Laboratório de Ensaios do DEMM-FEM-Unicamp, porém, por questões burocráticas, não foi possível sua utilização neste trabalho. Dessa forma, encontrou-se um caminho ainda melhor para o projeto que foi a escolha da técnica DIC, pois se trata de uma técnica que tem mostrado um grande potencial na análise de deslocamentos e deformações, além de apresentar diversas vantagens quando comparada aos outros métodos, como discutido nos tópicos anteriores.

O sistema sugerido é baseado na aquisição, por meio de uma câmera digital, de uma sequência de imagens captadas durante a ocorrência do ensaio de tração. Essas imagens são inseridas em um *software* que tem seu algoritmo baseado na técnica DIC que fornece como resultados os campos de deslocamentos e deformações. Esses dados serão utilizados para uma análise comparativa com as informações obtidas durante os ensaios de tração com o uso do extensômetro de contato, como mostrado no fluxograma da figura 3.1.

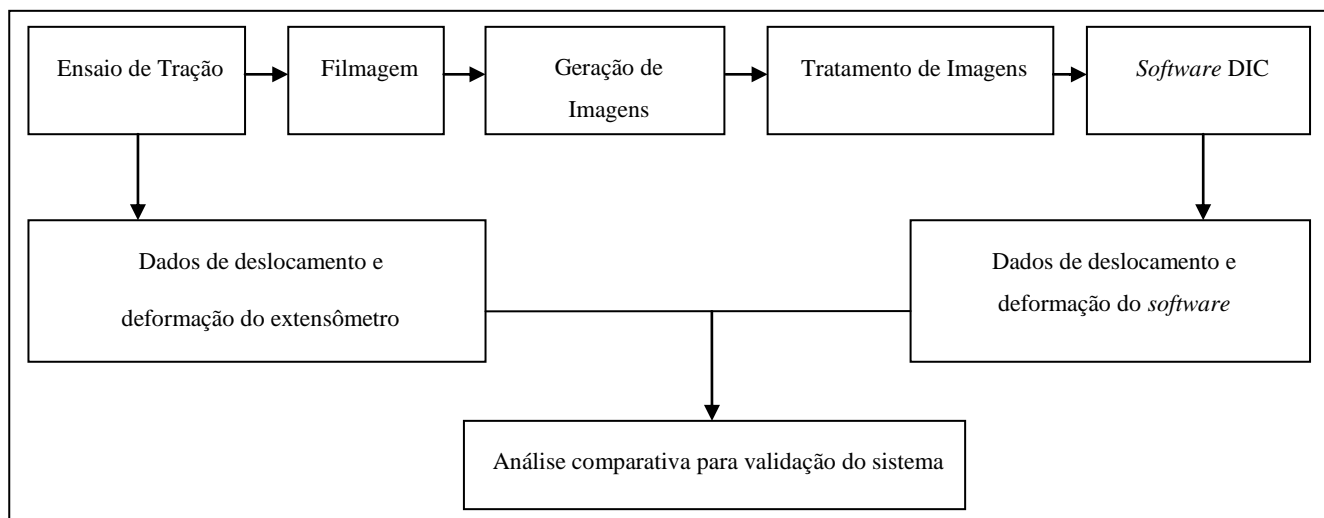


Figura 3.1 – Sequência de etapas para uso do sistema proposto.

Nesse capítulo são descritos os componentes que constituem o sistema proposto, *software* e equipamentos auxiliares e o procedimento utilizado para validação do conjunto.

3.1. Software DIC

O elemento chave do sistema é o *software* que irá processar as imagens capturadas. Para isso, o programa selecionado foi o Ncorr®. Esse utilitário de correlação de imagem digital em 2D possui código aberto e foi totalmente desenvolvido no ambiente MATLAB® por alunos do Instituto de Tecnologia da Georgia – Estados Unidos.

3.1.1. Funcionamento do *software*

O *software* precisa de três entradas, descritas a seguir, para que ele inicie o processo de análise:

1 - Imagem de referência: figura do corpo-de-prova no início do ensaio, sem sofrer carregamento.

2 – Imagem atual: é possível carregar no *software* uma imagem ou uma sequência de imagens que relatam a deformação que o corpo-de-prova sofre ao longo do ensaio.

3- Região de interesse (ROI): imagem que indica ao programa qual é a região a ser analisada e processada para o cálculo dos deslocamentos e deformações.

Provido desses itens, o usuário seleciona o local do *subset* referência e o espaçamento entre dois *subsets* vizinhos. *Subsets* são, essencialmente, um grupo de pontos coordenados e a idealização de alocar esses grupos nas imagens carregadas é exemplificada na figura 3.2 [22].

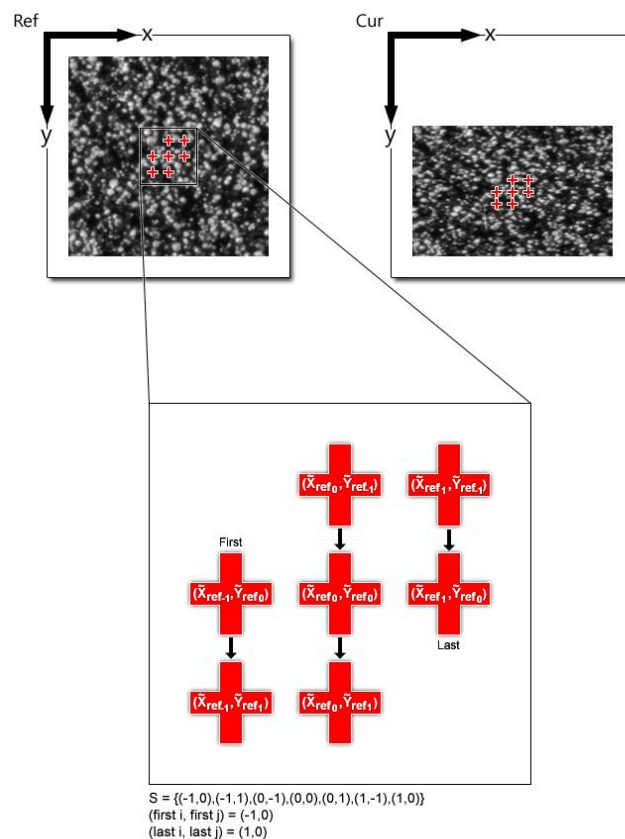


Figura 3.2 – Imagens e *subsets*.

Como explicitado no t3pico *Digital Image Correlation* do cap3tulo 2, a t3cnica trabalha fundamentada na compara33o digital de imagens. A correla33o 3 um par3metro que indica se duas vari3veis possuem depend3ncia linear e serve para determinar o grau de similaridade entre elas. Ou seja, o m3todo consiste em localizar na imagem subsequente a posi33o de um determinado *subset* da imagem refer3ncia a partir de pontos que possuam um alto valor de correla33o.

A transforma33o de um ponto no *subset* inicial para o mesmo subconjunto da figura seguinte 3 tipicamente restringida a uma transforma33o linear de primeira ordem, conforme pode ser observado nas equa333es 3.1 e 3.2.

$$\tilde{x}_{cur_i} = x_{ref_i} + u_{rc} + \frac{\partial u}{\partial x_{rc}} (x_{ref_i} - x_{ref_c}) + \frac{\partial u}{\partial y_{rc}} (y_{ref_j} - y_{ref_c})$$

Equa333o 3.1

$$\tilde{y}_{cur_j} = y_{ref_j} + v_{rc} + \frac{\partial v}{\partial x_{rc}} (x_{ref_i} - x_{ref_c}) + \frac{\partial v}{\partial y_{rc}} (y_{ref_j} - y_{ref_c})$$

$$\mathbf{p} = \left\{ u \quad v \quad \frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{\partial u}{\partial y} \quad \frac{\partial v}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial y} \right\}^T$$

Equa333o 3.2

Onde X_{ref_i} e Y_{ref_j} s3o o x e o y das coordenadas de um ponto do *subset* inicial, X_{ref_c} e Y_{ref_c} s3o o x e o y das coordenadas do centro do *subset* da refer3ncia inicial, \tilde{X}_{cur_i} e \tilde{Y}_{cur_j} s3o o x e o y das coordenadas de um *subset* final de uma figura atual, i e j s3o 3ndices usados para a localiza33o relativa dos pontos do *subset* com respeito ao centro do *subset*, assim como para correspond3ncias entre os pontos do *subset* da imagem atual com a configura33o refer3ncia. O subscrito rc significa que a transforma33o 3 da refer3ncia para o sistema de coordenadas da figura atual. E a equa333o 3.2 3 a forma geral de um vetor de deforma33o.

O *software* leva em conta, para localizar um mesmo *subset* de uma imagem em outra, dois crit3rios baseados nos tons de cinza das imagens, o *cross correlation*

criterion (C_{cc}) que indica uma boa correspondência quando seu valor é próximo de 1 e o *least squares criterion* (C_{LS}) que satisfaz a combinação com um valor próximo à 0. A figura 3.3 mostra o funcionamento desse critério. Os valores de escala de cinza da figura à esquerda são comparados com os valores das duas figuras à direita. Então, os índices de correlação mostram que a melhor correlação da figura à esquerda é com a figura superior da direita [22].

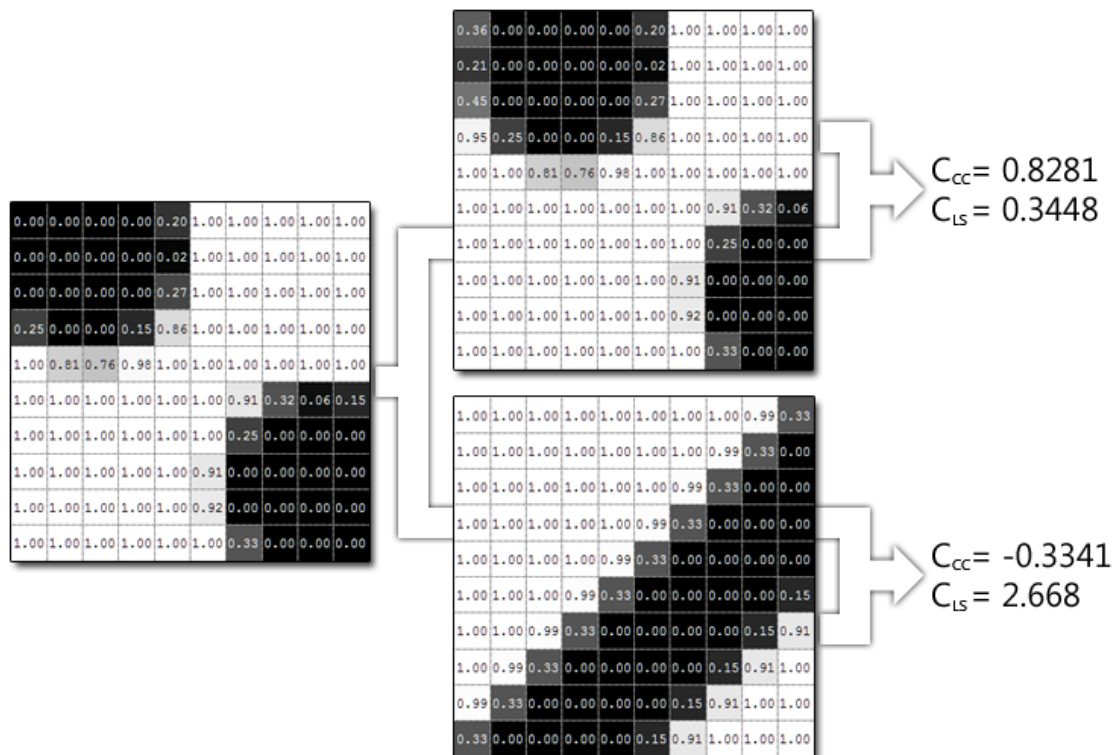


Figura 3.3 - Critérios para localização de *subsets*.

Em razão do fato de que o *subset* inicial pode se deslocar para n posições, o programa possui uma rotina para determinar e estabelecer a melhor solução para a posição final do *subset*. O *software* opera com uma estimativa inicial que funciona como alimentação para o método de Gauss-Newton e depois é aplicada uma interpolação aos resultados a fim de fornecer a melhor resposta. Essa sequência de processamento é exemplificada na figura 3.4 [22].

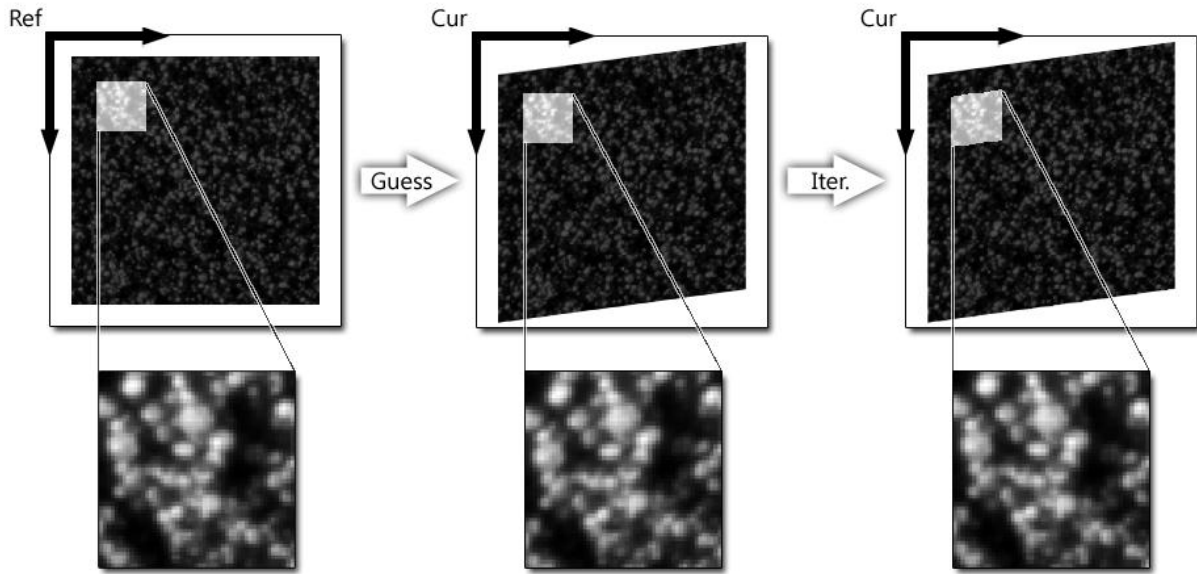


Figura 3.4 - Rotina que estabelece o melhor posicionamento do *subset*.

As deformações são calculadas a partir dos dados de deslocamento, por meio de um plano de ajuste pelo método dos mínimos quadrados, para um grupo local de pontos. Os gradientes de deslocamentos são então encontrados a partir de um plan-parâmetro e esses gradientes são então utilizados para calcular as deformações Green-Lagrangianas, equação 3.3.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad \text{Equação 3.3}$$

onde ε_{ij} são as componentes do tensor de deformação, também denominado de tensor de *Cauchy*. Também pode ser apresentado de forma matricial como na equação 3.4.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) & \frac{\partial u_y}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) & \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Equação} \\ 3.4 \end{array}$$

3.2- Descrição dos ensaios de tração

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP com auxílio de um equipamento servo-hidráulico universal para ensaios mecânicos da MTS®, modelo 810-Flex Test 40 com capacidade para carga de até 100kN, um extensômetro do tipo *clip-on gage* da MTS®, modelo 632.24C-50 com comprimento útil de 25 mm e uma câmera fotográfica Sony Cyber-shot® DSC-HX20V para a captura das imagens durante o ensaio (Figura 3.5).

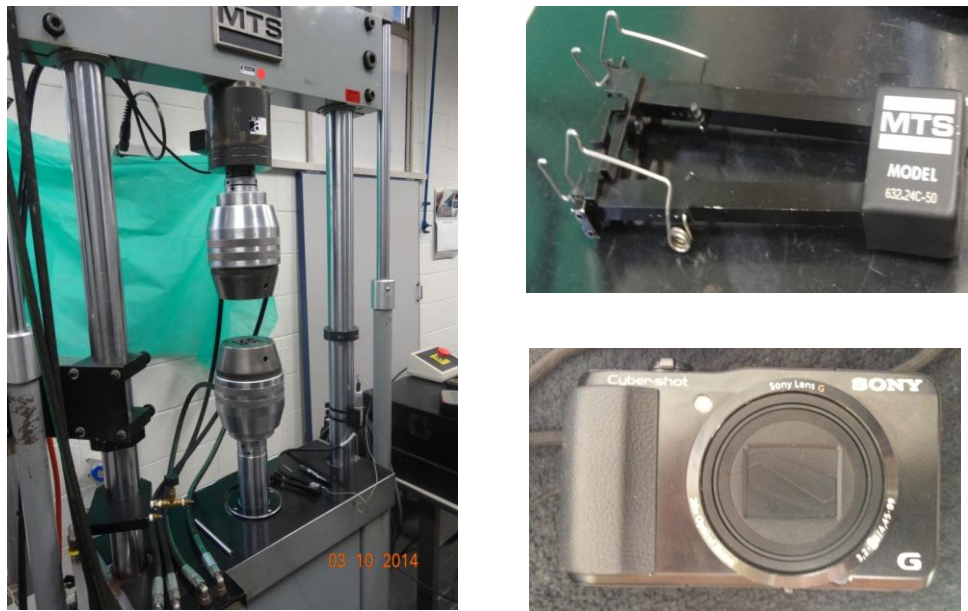


Figura 3.5 - Equipamento servo-hidráulico para ensaios mecânicos, extensômetro e câmera fotográfica.

3.3- Procedimentos de Validação

Neste tópico é descrito e mostrado passo a passo o procedimento utilizado para a validação do sistema em questão.

3.3.1. As amostras

As configurações finais das amostras para os ensaios foram aperfeiçoadas em função de várias simulações proporcionadas a partir de ensaios de tração disponíveis no Youtube® juntamente com o *software* selecionado, o Ncorr®. Nessas tentativas foi verificada a distância de filmagem da câmera à peça, aspectos da superfície da amostra, como o brilho ou marcações que pudessem auxiliar na interpretação do *software* durante a análise para o cálculo dos deslocamentos e deformações. Esse trabalho foi necessário, pois essas variáveis afetam de maneira significativa a qualidade das imagens obtidas e, conseqüentemente, a qualidade dos resultados. A imagem 3.6 apresenta alguns destas simulações executadas.

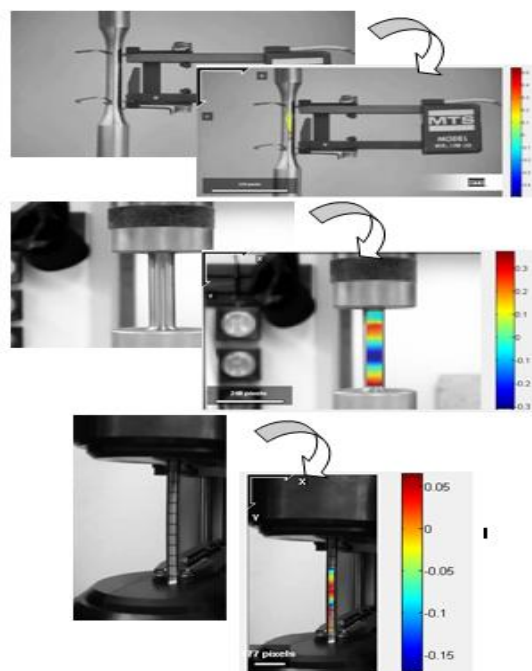


Figura 3.6 - Ensaios utilizados para calibração da aparência da amostra.

Após a calibração descrita anteriormente constatou-se que o *software* apresentava melhores resultados para os vídeos nos quais a amostra estava mais próxima da câmera. Também ficou evidente que marcações no corpo-de-prova, como pequenas faixas, auxiliavam o *software* a encontrar potenciais soluções com um menor esforço computacional. O software alerta, nas instruções de uso, um cuidado especial com a superfície sugerindo o uso de tintas para alguns materiais que não apresentam uma variabilidade de contrastes natural na superfície. Para esses casos, a tinta atua de forma a modificar a aparência da peça e facilitar a análise do programa devido à criação de uma aleatoriedade dentre os *subsets*. Como essa variável não foi ensaiada devido à indisponibilidade de vídeos com essa particularidade na internet, foi decidido avaliar amostras caracterizadas de duas maneiras: uma sem o uso de tinta e com marcações feitas com caneta de tinta preta e na outra situação as amostras seriam revestidas com tinta vermelha de pincel para quadro branco com marcações feitas por um altímetro. Tais configurações podem ser visualizadas na figura 3.7.

Devido à disponibilidade, os corpos-de-prova foram feitos de uma liga de alumínio da série 3000, material que apresenta características apropriadas para o ensaio e verificação do sistema. As amostras possuíam diâmetro de 5 mm e comprimento de 25 mm na região, figura 3.8.

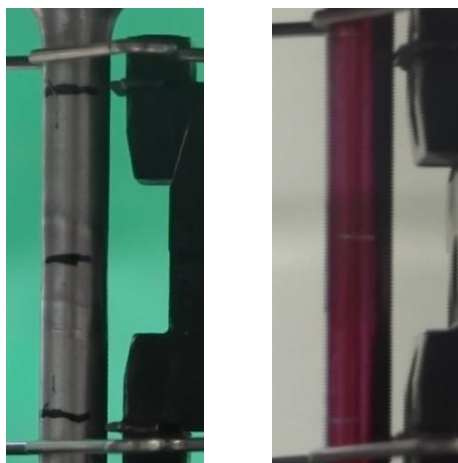


Figura 3.7 - Configurações das amostras de ensaio. A esquerda: amostra sem tinta com marcações feita à caneta e a direita: amostra com tinta vermelha e marcações feitas pelo altímetro.

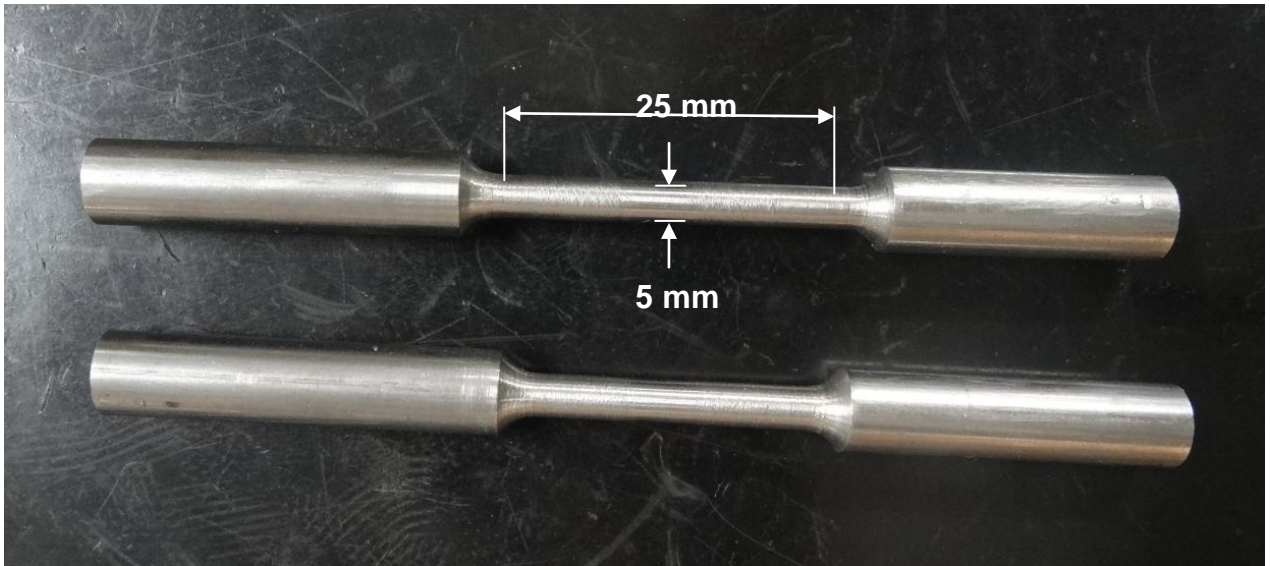


Figura 3.8 - Dimensões dos corpos-de-prova.

3.3.2. Tratamento de imagens e utilização do *software*

Os ensaios foram realizados e filmados utilizando as amostras definidas no tópico anterior. Posteriormente à execução do ensaio, fez-se a transformação do vídeo em *frames* com auxílio de ferramentas computacionais destinadas para esse fim. O último estágio do processamento das imagens foi o tratamento dessas imagens deixando-as em escala de cinza, conforme requisição do *software* selecionado, para analisar os campos de deslocamento e deformação, figura 3.9.

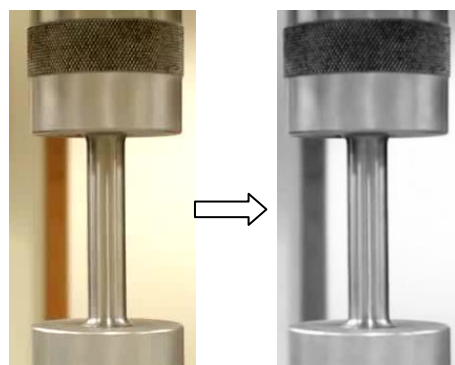


Figura 3.9 - Exemplo da transformação da imagem colorida para escalas de cinza.

Com as imagens tratadas, inicia-se a utilização do *software* Ncorr® a partir da alimentação do mesmo com as figuras obtidas e tratadas do ensaio de tração conforme roteiro a seguir

1 - Inserção da imagem de referência;

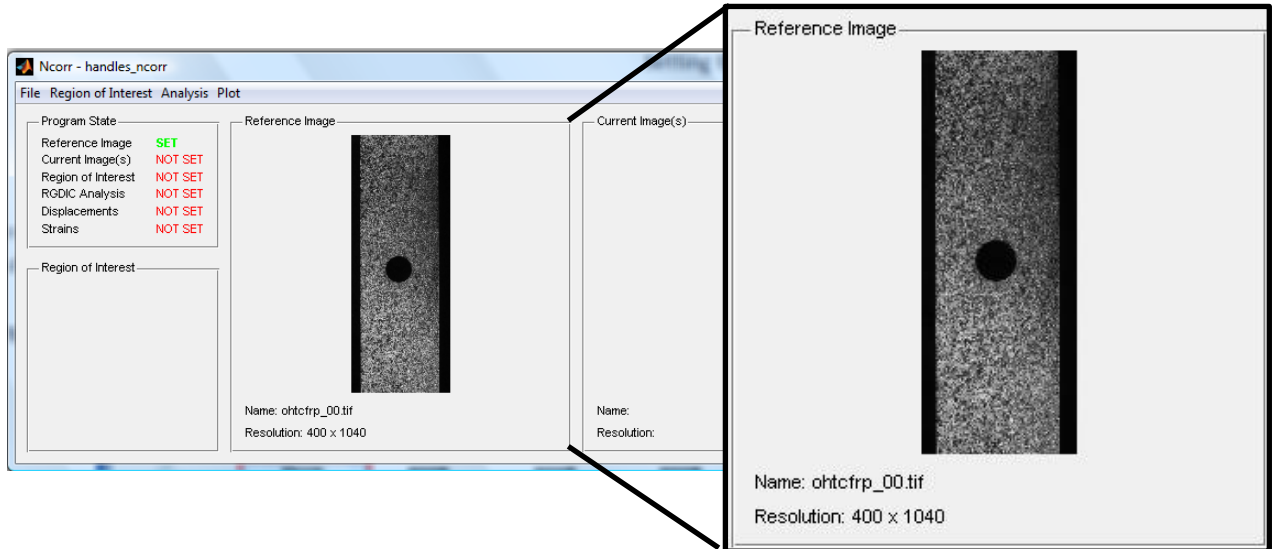


Figura 3.10 - Imagem de referência.

2 - Inserção do conjunto de imagens atuais;

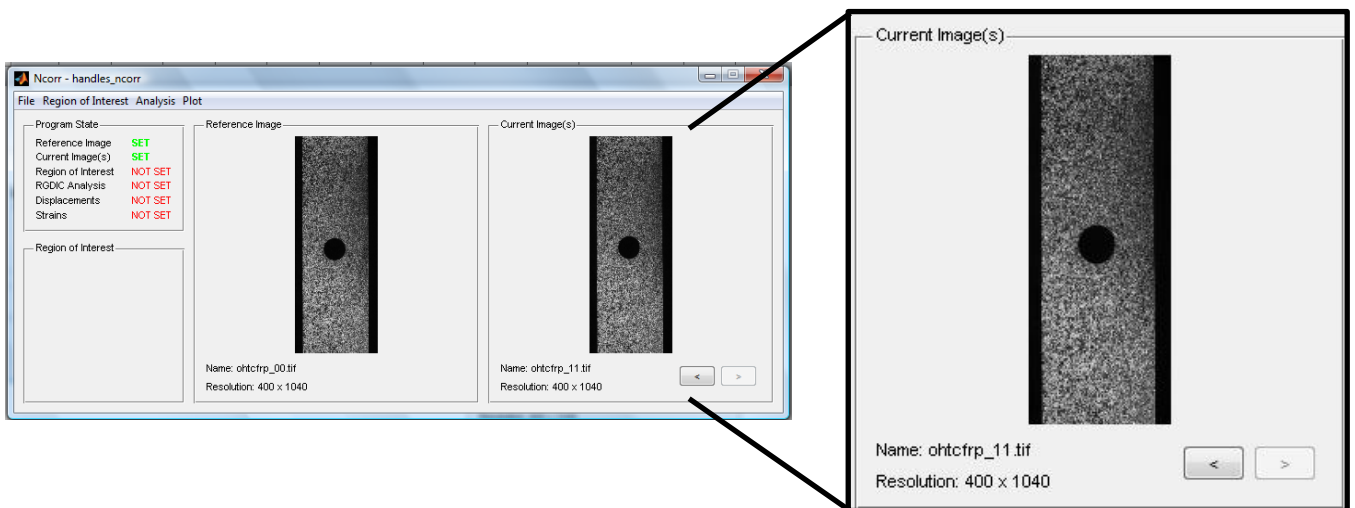


Figura 3.11 - Imagem atual.

3 - Inserção da imagem que representa a região de interesse (ROI);

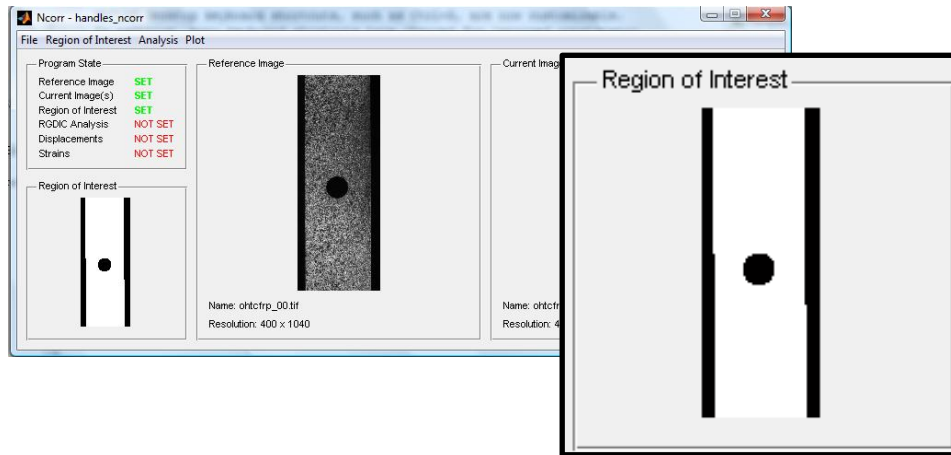


Figura 3.12 - Região de interesse.

4 - Definição dos parâmetros para início das análises;

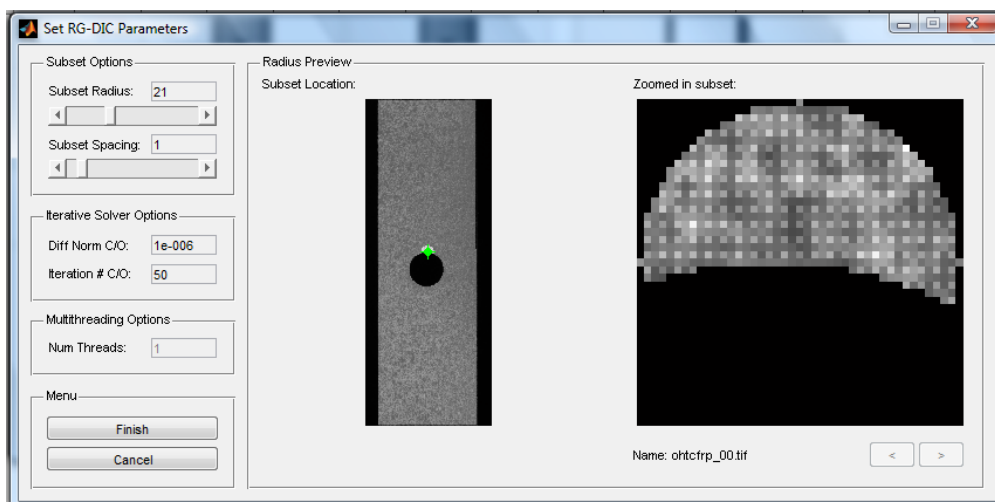


Figura 3.13 - Parâmetros para análise.

No menu à esquerda dessas figuras, existem opções para configurar os *subsets* da melhor maneira possível em função da imagem e sua resolução, da qualidade dos resultados esperada e dos recursos computacionais disponíveis. Essas opções vão ditar quão largos serão os *subsets* e o quão espaçado eles estarão uns dos outros.

Do lado direito, o ponto verde na imagem da esquerda da figura 3.13 representa o *subset* referência e esse ponto é apresentado com zoom na imagem à direita. O zoom dá a ideia de como os subconjuntos estão espaçados.

São necessárias algumas iterações nessa etapa, em função da qualidade da imagem, até encontrar a seleção ótima.

5 - Verificação da análise:

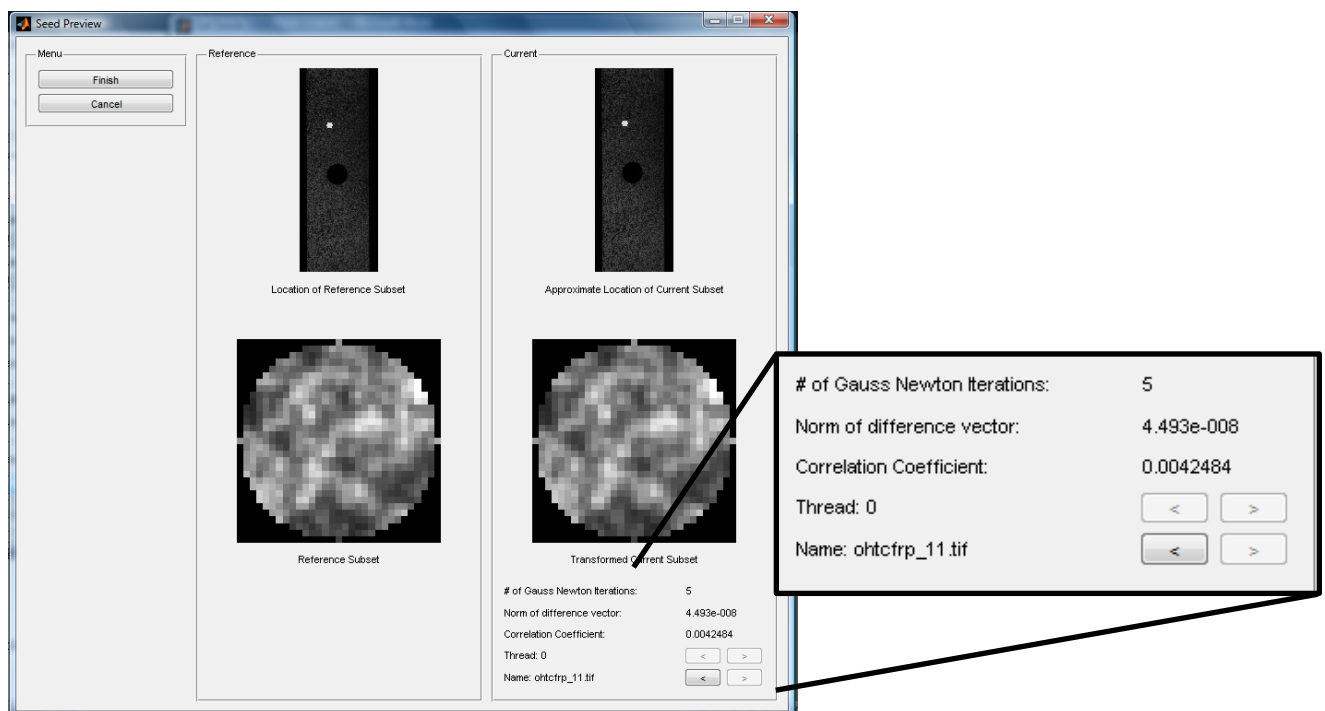


Figura 3.14 - Verificação da análise.

Essa etapa é a última e tem a função de verificar se a análise foi feita corretamente. Conclui-se que o processamento ocorreu sem problemas a partir de três observações:

1 – A marcação presente na imagem referência (imagem superior da esquerda) encontra-se localizada apropriadamente na imagem atual (imagem superior da direita);

2 – O *subset* referência e o *subset* atual transformado são visualmente muito similares;

3 – O número de iterações para convergir em um resultado foi bem baixo, assim como o coeficiente de correlação.

Capítulo 4 – Resultados e Discussão

Quatro corpos-de-prova com as características descritas no capítulo anterior foram preparados para os ensaios e separados em 2 grupos: Grupo 1 – sem cobertura de tinta e marcação feita com tinta preta (Ensaio 1 e 2) e Grupo 2 – amostras revestidas com tinta vermelha e marcação feita pelo altímetro (Ensaio 3 e 4). Todos os corpos-de-prova foram ensaiados com o uso do extensômetro de contato acoplado de forma a gerar resultados que foram utilizados para a comparação com os resultados do sistema proposto, para sua validação.

Em média, um ensaio de tração de uma amostra feita de liga de alumínio tem duração de 40 segundos. Dessa forma, decidiu-se dividir o ensaio em seis estágios representativos, de forma a contemplá-lo inteiramente na análise das imagens.

Os estágios escolhidos foram: 6 segundos, 12 segundos, 17 segundos, 22 segundos, 28 segundos e 33 segundos. Para esses instantes, são apresentados na tabela 4.1 os valores de deslocamento e deformação obtidos com o extensômetro de contato, assim como a média e o desvio padrão.

Tabela 4.1 – Dados obtidos com o extensômetro de contato

		Extensômetro					
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Média	Desvio Padrão
6 s	Deslocamento [mm]	0,0812	0,0814	0,0825	0,0814	0,0816	0,0006
	Deformação [%]	0,3248	0,3259	0,3299	0,3257	0,3266	0,0023
12 s	Deslocamento [mm]	0,3803	0,3779	0,3166	0,3967	0,3679	0,0352
	Deformação [%]	1,5212	1,5116	1,2667	1,5868	1,4716	0,1406
17 s	Deslocamento [mm]	0,6583	0,6745	0,6288	0,7072	0,6672	0,0327
	Deformação [%]	2,6334	2,6982	2,5153	2,829	2,6690	0,1308
22 s	Deslocamento [mm]	0,9434	0,9621	0,9607	1,0074	0,9684	0,0273
	Deformação [%]	3,7736	3,8485	3,8427	4,0295	3,8736	0,1094
28 s	Deslocamento [mm]	1,5087	1,5358	1,5687	1,5973	1,5527	0,0386
	Deformação [%]	6,0350	6,1434	6,2749	6,3892	6,2106	0,1543
33 s	Deslocamento [mm]	1,8539	1,8805	1,9185	1,9429	1,8990	0,0395
	Deformação [%]	7,4154	7,5221	7,6741	7,7716	7,5958	0,1581

O *software* apresenta como resultados os campos de deslocamento e deformação na região de interesse definida no início do processo. Porém, o resultado de deslocamento é dado em pixels. Assim, é necessário transformá-lo em milímetros a partir de relações matemáticas de grandezas proporcionais em função da barra de escala destacada na figura 4.1.

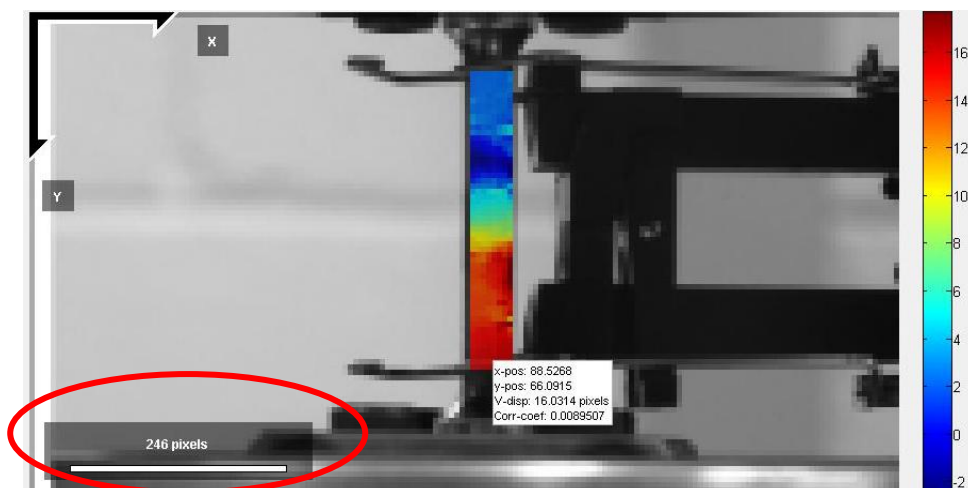


Figura 4.1 - Resultado do *software*: campo de deslocamento

Os ensaios foram totalmente documentados a partir da filmagem e as imagens dos instantes definidos para representação de todo o ensaio foram extraídas e tratadas de forma a atingirem os requisitos do *software* conforme explicado no capítulo anterior. Uma imagem do laboratório no momento da execução dos ensaios com o equipamento adquirindo as imagens pode ser observada na figura 4.2.



Figura 4.2 – Arranjo experimental durante a documentação dos ensaios.

As figuras tratadas foram utilizadas como *input* e uma amostra dos resultados obtidos pode ser observada na figura 4.3. O *software* fornece um campo de deslocamentos e deformações, ou seja, muitos resultados. Dessa maneira, para critérios de comparação, como o extensômetro fornece resultados de apenas um ponto, seria necessário definir um local que representasse essas medidas.

A região de fixação do braço inferior do extensômetro foi selecionada para exercer essa função, pois é apenas o braço inferior do equipamento servo-hidráulico que se movimenta durante o ensaio, conseqüentemente é esse o local do extensômetro e do corpo-de-prova que mais se move. Desse modo, para calcular as deformações, coletaram-se dados da região que, visualmente, apresentou as maiores deformações.

Como foram calculados e disponibilizados pelo programa um grande número de dados de deslocamento e deformação, optou-se por não incluí-los neste texto e sim disponibilizá-los no endereço: www.fem.unicamp.br/~sergio1/AnexoTG-GuilhermeLima.pdf.

A tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos após a compilação e o tratamento de todos os dados obtidos.

Como a população de amostras é pequena, em um primeiro momento decidiu-se não fazer distinção entre os grupos definidos anteriormente de forma a verificar a robustez do sistema.

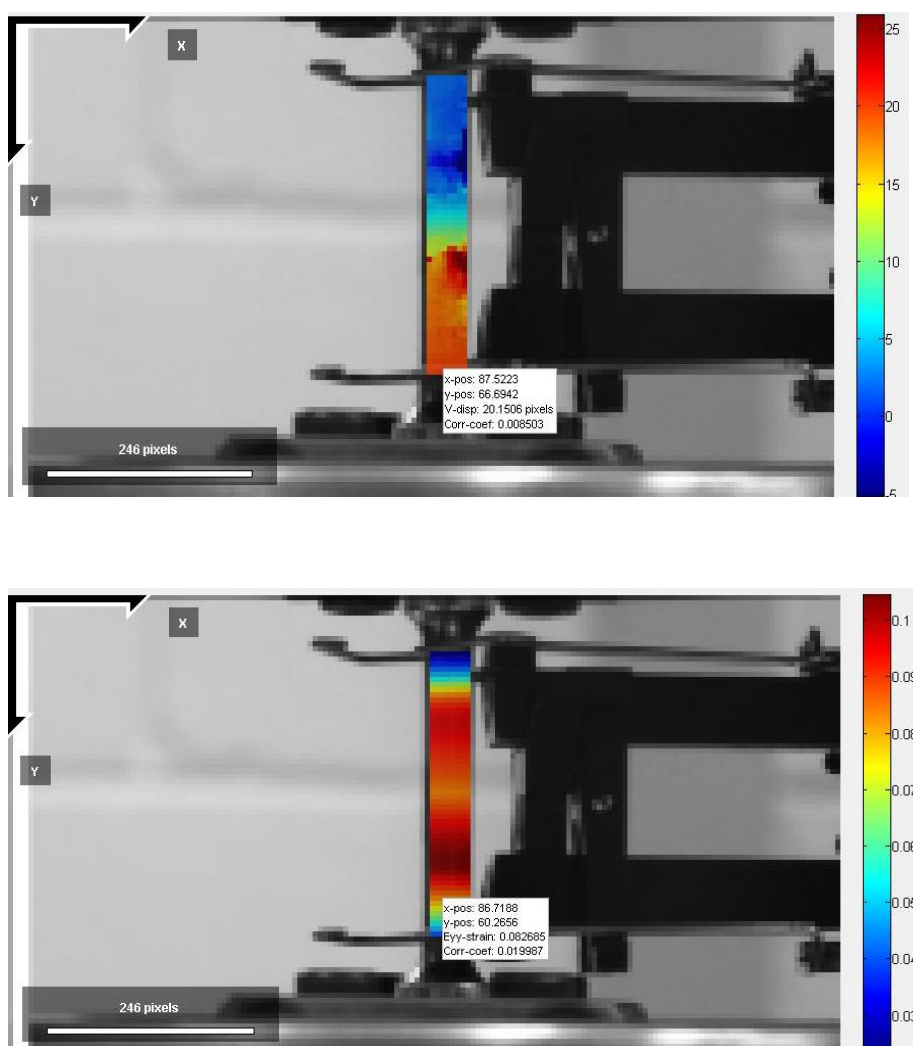


Figura 4.3 - Exemplo dos resultados obtidos pelo *software*: campo de deslocamento (superior) e campo de deformação (inferior).

Tabela 4.2 – Resultados obtidos com o *software* DIC

Ncorr [®]							
		Ensaio1	Ensaio 2	Ensaio3	Ensaio4	Média	Desvio Padrão
6 s	Deslocamento [mm]	0,0134	0,1407	0,0978	0,1395	0,0979	0,0597
	Deformação [%]	0,2024	0,1925	0,3559	0,3170	0,2669	0,0819
12 s	Deslocamento [mm]	0,1660	0,3973	0,2933	0,4045	0,3153	0,1117
	Deformação [%]	0,7235	1,0606	1,1176	1,5075	1,1023	0,3213
17 s	Deslocamento [mm]	0,3702	0,6064	0,5342	0,6948	0,5514	0,1375
	Deformação [%]	1,6559	2,3403	1,7214	2,3196	2,0093	0,3713
22 s	Deslocamento [mm]	0,5487	0,8738	0,8953	1,1902	0,8770	0,2622
	Deformação [%]	2,4240	3,7909	3,1205	3,8902	3,3064	0804
28 s	Deslocamento [mm]	1,0291	1,3405	1,1766	1,4111	1,2393	0,1712
	Deformação [%]	5,7151	6,2061	6,8559	6,6048	6,3454	0,4982
33 s	Deslocamento [mm]	1,4015	1,6111	1,4790	1,6980	1,5474	0,1326
	Deformação [%]	7,2915	7,6724	7,3503	7,8311	7,5363	0,2582

De posse dos resultados de deslocamento e deformação obtidos com o extensômetro de contato e dos calculados pelo *software* a partir das imagens dos quatro ensaios realizados, fez-se uma análise relativa entre as médias de cada estágio com a média das medidas obtidas pelo extensômetro de contato, para

aquele dado instante, de forma a verificar, para cada uma delas, o quão próximo as medidas do sistema proposto nesse trabalho estavam das medidas do extensômetro, tomadas como referência. A equação 4.1 foi utilizada para o cálculo e os resultados para cada tempo foram plotados em 2 gráficos disponíveis nas figuras 4.4 e 4.5.

$$Precisão_{x \text{ segundos}} = \frac{\text{média resultados } N_{corr} \text{ @ } x \text{ segundos}}{\text{média resultados extensômetro } x \text{ segundos}} \quad \text{Equação 4.1}$$

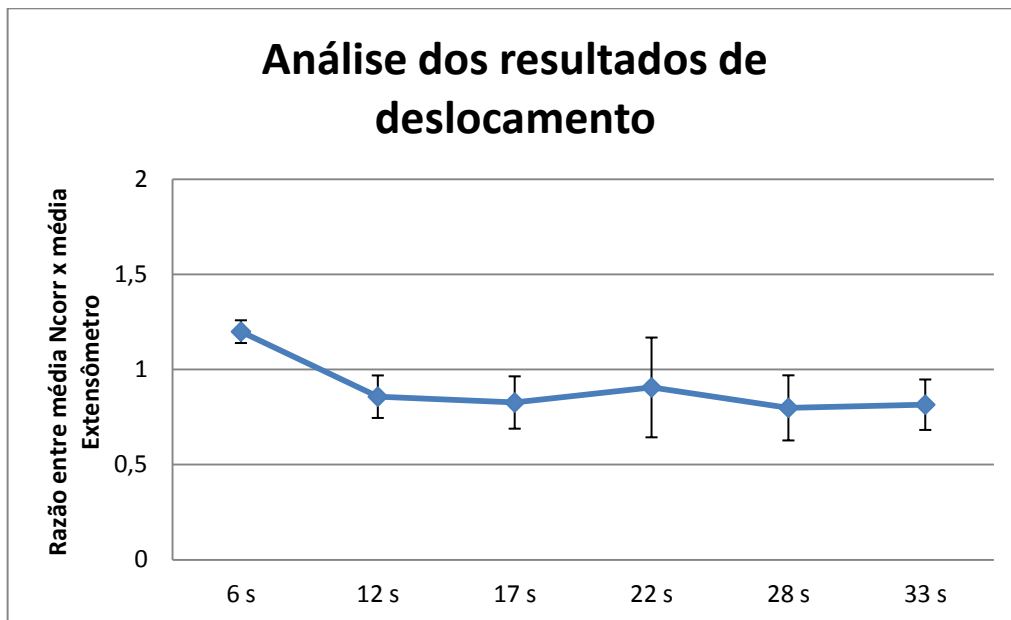


Figura 4.4 - Gráfico da razão das medidas para os deslocamentos.

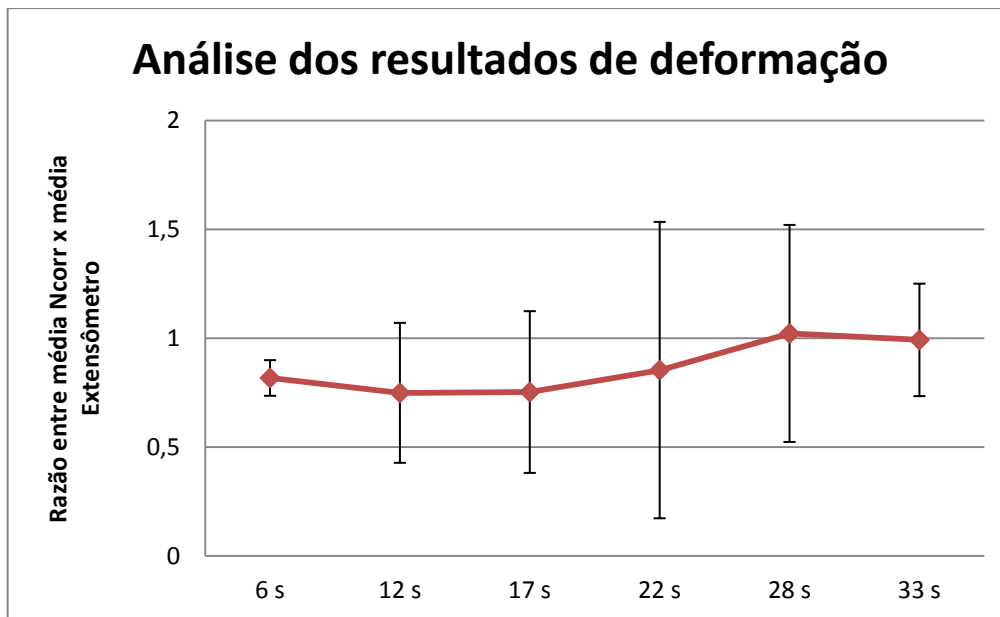


Figura 4.5 - Gráfico da razão das medidas para as deformações.

Nesses gráficos, quanto mais próximo de 1 o ponto estiver melhores são os resultados. Fazendo uma média com todas as razões calculadas e plotadas nos gráficos temos que os resultados de deslocamento emitidos pelo *software* apresentaram uma proximidade de 90% aos resultados do extensômetro e os de deformação tiveram uma acurácia de 86%. Esses valores representam um resultado muito bom considerando-se a simplicidade do sistema desenvolvido, seu baixo custo agregado e o fato de ele ser aberto, ou seja, não requerer qualquer tipo de licença ou permissão para ser utilizado.

Também se pode concluir, que o sistema apresenta melhores resultados quando o corpo-de-prova apresenta maiores deslocamentos e deformações, ou seja, da metade para o fim do ensaio, visto que para esses tempos a razão encontrada foi próxima a 1. Para certos materiais, esse momento é crítico para o extensômetro de contato, pois ele atinge seu limite de abertura e necessita ser retirado para não sofrer avarias. Ou seja, nessas situações ele não faz as medições desse período de tempo.

Porém, como pode ser observado nas tabelas 4.1 e 4.2, o sistema de medição proposto apresenta dispersões de resultados superiores àqueles

apresentados pelo extensômetro de contato, principalmente por volta do 22º segundo, agregando aos resultados muitas incertezas e variabilidade. Esses desvios são justificados por uma série de fatores que influenciam na análise do *software*. Alguns desses fatores, que também podem ser classificados como ruídos, foram apresentados na revisão bibliográfica do capítulo 2 e são novamente listados a seguir:

- Brilho do material
- Qualidade da câmera
- Luz
- Vibrações da máquina e da câmera fotográfica
- Superfície do material não propicia
- Perda de qualidade nos tratamentos das imagens

Como o foco deste trabalho era propor um sistema para análise dos deslocamentos e deformações sem o uso de um extensômetro de contato e verificar seu desempenho pela comparação dos resultados, a eliminação desses fatores não foi levada em conta já que dessa forma trabalhar-se-ia o mais fielmente possível com as condições atuais de ensaio no laboratório. Porém, é notória a grande influência que esses fatores exercem nos resultados quando os ensaios são avaliados separadamente considerando-se os grupos 1 (ensaio 1 e 2) e grupo 2 (ensaio 3 e 4). Procedendo a análise da mesma maneira forma feita anteriormente, mas considerando a diferença entre os grupos, a partir da média das razões encontradas entre as medidas fornecidas pelo Ncorr® com as do extensômetro de contato para todos os estágios, obtêm-se os resultados mostrados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Análise dos resultados considerando separadamente os dois grupos de ensaios

Grupo 1 (natural + marcações a caneta)		Grupo 2 (tinta vermelha + marcações altímetro)	
	Média das razões		Média das razões
Deslocamento [mm]	79%	Deslocamento [mm]	101%
Deformação [%]	78%	Deformação [%]	95%

Analisando-se a tabela 4.3, pode-se concluir que a alteração da condição de superfície das amostras utilizadas nos ensaios de número 3 e 4, devido à pintura com tinta vermelha e a marcação feita com auxílio do altímetro, fez com que o sistema na média das razões entre as medidas do software com as medidas do extensômetro tivessem uma excelente resposta, porém o desvio padrão dos resultados obtidos com a análise das imagens continua a apresentar-se maior do que o desvio dos resultados obtidos com o extensômetro, ou seja, o software não apresenta uma grande precisão.

Capítulo 5 – Conclusão

Este trabalho teve como objetivo principal pesquisar e avaliar métodos de extensometria óptica disponíveis no mercado que pudessem ser aplicados ao ensaio de tração devido à limitação apresentada pelo processo convencional de extensometria de contato.

A partir dessa pesquisa, selecionou-se a técnica de *Digital Image Correlation* (DIC) para o desenvolvimento de um sistema próprio para medição de deslocamentos e deformações. Deu-se preferência a esse sistema em relação às outras técnicas, pois o método tem mostrado um grande potencial quando aplicado a esse tipo de análise.

O sistema proposto foi constituído de um equipamento servo-hidráulico para ensaios mecânicos, uma câmera fotográfica, *software* para tratamento de imagens e *software* de processamento de imagens baseado na técnica da DIC. O conjunto foi testado e apresentou bons resultados chegando a 90% de acurácia para a determinação dos deslocamentos e 86% para a deformação quando comparados aos dados base obtidos pelo extensômetro de contato, técnica atualmente utilizada no Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEMM na FEM/UNICAMP.

Dessa forma, o sistema proposto possui um grande potencial para uso futuro no laboratório em substituição à técnica atual, pois além de ser simples, exige um baixo custo agregado, devido a não necessidade de licenças ou permissões para a utilização.

5.1 – Sugestões de melhoria

Apesar dos bons resultados apresentados na média pelo sistema proposto, existem alguns pontos que podem possuir um melhor desenvolvimento. Dentre esses pontos pode se citar a automatização do processo de transformação do vídeo em frames e desses em imagens com escalas de cinza de forma a tornar o procedimento mais rápido e fácil, uma vez que, nesse trabalho, ele foi realizado de maneira manual e lenta.

Outro importante ponto é um estudo sobre os itens que causam ruídos na captação da imagem e que acarretam erros aos resultados. Essa melhoria pode ser feita através da criação de um dispositivo de iluminação, variação da pintura/desenhos na superfície das peças, dentre outros possíveis estudos e análises que têm como objetivo reduzir a variabilidade e incertezas apresentadas pelo sistema. Essas pesquisas trarão a esse sistema uma maior robustez e confiabilidade nas medidas. Essa sugestão é baseada no fato de que, quando as amostras foram analisadas em grupos separados, apresentaram diferenças significativas das médias das razões dos resultados obtidos pelo extensômetro e pelo método proposto nesse projeto.

Referências Bibliográficas

- [1] CALLISTER, W. D. Fundamental of materials science and engineering: an interactive. 5th edition, 2001, John Willey & Sons, Inc., New York.
- [2] ASTM E8/E8M. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]. USA: American Society for Testing and Materials, 2011.
- [3] DIETER, G. E. Mechanical Behavior of Materials Under Tension. University of Maryland, USA: Dean of Engineering, 1981.
- [4] SOUZA, S. A. Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 5ª edição, 1982.
- [5] ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.;BRITO, G. A. Extensometria Básica. UNESP, 2004.
- [6] JR, Y. B.; LYRA, A. C. C. Circuitos Elétricos. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2006.
- [7] Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3642/pt/>>. Acesso em 23/02/2014.
- [8] Disponível em: <<http://www.zwick.net.br/br/produtos/extensometros/sistemas-de-medicao-com-contato/extensometro-clip-on.html>>. Acesso em: 24/02/2014.
- [9] Biblioteca, disponível em: <<http://www.instron.com.br/>>. Acesso em: 24/02/2014.
- [10] BARBOSA, C. L.; LISBÔA, O.; RABELO, R. C.; CAZO, R. M.; HATTORI, H. T. Sensor de deformação usando grades de bragg. Revista Científica Periódica Telecomunicações, 03, 2000.
- [11] KERSEY, A. D.; DAVIS, M. A.; PATRICK, H. J.; LEBLANC, M.; KOO, K. P.;ASKINS, C. G.; PUTNAM, M. A.; FRIEBELE, E.J. Fiber Grating Sensors, Journal of Lightwave Technology, vol 15, pág. 1442-1463, 1997.
- [12]FRIEBELE, E. J. Fiber Bragg Grating Strain Sensors: Present and Future Applications in Smart Structures, Optics and Photonics News, Agosto de 1998 , pág. 33-39.

- [13] SILVA, R. G. R. Uma nova técnica para interrogação de sensores à fibra ótica com grades de Bragg. UNICAMP, Campinas, 2009.
- [14] QUINTERO, S. M. M. Aplicações de Sensores a Rede de Bragg em Fibras Ópticas na Medição de pH e Deformação de Filmes Finos de Alta Dureza. PhD thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2006.
- [15] GRÉDIAC, M. et al. The Virtual Fields Method for Extracting Constitutive Parameters From Full-Field Measurements: a Review. *Strain*, 2006. pág 233–253.
- [16] AFFONSO, E. A. Extensometria Óptica Por Moiré Geométrico Digital Para Análise De Tensões no Plano, UNICAMP, Campinas, 2011.
- [17] DURELLI, A. J.; PARKS, V. J. Moiré Analysis of Strain. Prentice Hall, 1970.
- [18] VAZ, B. F. Medida de Tensões em Bielas Utilizando Interferometria Laser. UNICAMP, Campinas, 2012.
- [19] SAITO, E. H. Medição de Tensões em Componentes Mecânicos utilizando a Técnica ESPI. UNICAMP, Campinas, 2010.
- [20] T.C. Chu et al. Applications of Digital Image Correlation Techniques to Experimental Mechanics. *Journal: Experimental Mechanics* , Volume 25, Issue 3 , pp 232-244. 1985.
- [21] Samala, P., Wang, Y., Zhu, Z., Zhou, D. et al., "Measurement of Strain Localization in a Tensile Test Using Full Field Optical Technique - Digital Speckle Correlation," SAE Technical Paper 2008-01-0682, 2008.
- [22] Disponível em: < <http://ncorr.com/index.php/dic-algorithms/>>. Acesso em 01/06/2014.