



**Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia**

FEUP

**Caracterização Experimental e Numérica de Campos
de Tensões Residuais Provocadas por Processos de
Fabrico**

João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

Dissertação submetida à Universidade do Porto
Para a obtenção do grau de Doutor em
Engenharia Mecânica

Março de 2006

Caracterização Experimental e Numérica de Campos de Tensões Residuais Provocadas por Processos de Fabrico

João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

Orientador: Professor Mário Augusto Pires Vaz

Co-orientador: Professor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Tese submetida em Março de 2006

Agradecimentos

Desejo expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os que possibilitaram a realização deste trabalho. Quero salientar, no entanto, o apoio e incentivo daqueles que mais de perto acompanharam esta dissertação:

Ao Prof. Mário Vaz, orientador desta dissertação e meu amigo pessoal. Por todo o apoio na orientação, idealização e acompanhamento deste trabalho. Agradeço, especialmente pela sua amizade e encorajamento nos momentos mais difíceis que ocorreram no decurso desta caminhada. Sem o seu apoio e orientação não teria sido possível a conclusão desta dissertação..

Ao Prof. Paulo Piloto, meu amigo e co-orientador, pelo apoio, ajuda e participação neste trabalho.

Aos meus amigos, Hernâni Lopes e Jaime Monteiro. O Hernani sempre disposto a ajudar e incentivar-me a levar a bom porto este trabalho. Estou especialmente grato pela sua ajuda no processamento de algumas imagens que são apresentadas nesta dissertação, em que foi utilizado um programa desenvolvido por si. E o Jaime, por todo o apoio, ajuda e colaboração que sempre disponibilizou na parte experimental da dissertação bem como no esclarecimento de dúvidas e na troca de ideias que permitiram uma evolução mais rápida do trabalho.

A todos os colegas do LOME, em especial aos amigos, Dr. Paulo Tavares, sempre colaborante e com ideias úteis para a melhoria deste trabalho, Eng. Nuno Ramos, Dra. Arcelina Marques, Doutor Fernando Ferreira, Prof. Rui Guedes e Dra. Luísa Bastos.

Ao Prof. Paulo Marques, da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, por todo o apoio e disponibilidade que teve durante o processo de revestimento das redes de difracção.

Ao Prof. João Paulo Nobre, da Universidade de Coimbra, pela troca de experiências e pela cedência de alguns provetes utilizados na sua tese de doutoramento e que permitiram que as medições realizadas neste trabalho pudessem ser comparadas e validadas com os resultados obtidos na sua dissertação.

À Prof. Malgorzata Kujawinska, pela oportunidade que me deu de aprender e realizar algumas medições com Moiré interferométrico no seu grupo de investigação, inserido no Departamento de Mecatrónica da *Warsaw University of Technology* na Polónia.

Aos meus colegas da Escola de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, em especial aos do Departamento de Tecnologia Mecânica pelo apoio e incentivo que sempre demonstraram ao longo deste trabalho.

Aos colegas do DEMEGI, em especial a D. Fernanda Fonseca, pela sua amizade, disponibilidade e competência com que gere o secretariado. Ao Sr. José Saldanha pela sua colaboração e experiência transmitida no projecto de alguns equipamentos usados neste trabalho e D. Emília Soares, pela sua disponibilidade e ajuda na utilização do equipamento do LM.

Ao Ministério da Educação pela bolsa de doutoramento concedida ao abrigo do programa PRODEP.

Aos meus amigos, Eng. Álvaro Brito, Eng. João Paulo Carmo e Eng. Paulo Silva pelo apoio, encorajamento, solidariedade e amizade sempre demonstrados ao longo da dissertação.

Agradeço, finalmente, à minha mãe e irmãs, o ambiente de estudo e encorajamento que sempre me proporcionaram ao longo da minha vida académica.

SIMBOLOGIA

φ	Ângulo entre a direcção da medição e a direcção principal máxima; Desfasamento de fase ou <i>phase shifting</i>
γ_2	Ângulo entre o eixo X e o feixe difundido do objecto
γ_1	Ângulo entre o eixo X e o raio incidente no objecto
U_0^*	Conjugada da amplitude do feixe objecto em notação complexa
U_R^*	Conjugada da amplitude do feixe referência em notação complexa
f_σ	Constante de franja característica do material fotoelástico
$\varphi_x(z_1)$	Curvatura da placa na direcção X
$\varphi_y(z_1)$	Curvatura da placa na direcção Y
ε	Deformação
$\Delta\varepsilon_{xx}$	Deformação incremental na direcção X
$\Delta\varepsilon_{yy}$	Deformação incremental na direcção Y
ε_r	Deformação radial
ε_r^i	Deformação radial para o incremento i
$\delta\phi$	Diferença de fase
z_1	Espessura da camada removida
h	Espessura do revestimento fotoelástico; máximo espaçamento entre franjas
ϕ_0	Fase arbitrária atribuída ao feixe que sai da fonte de luz localizada no ponto O
ϕ_1	Fase da luz difundida pelo ponto P antes do deslocamento
ϕ_2	Fase da luz difundida pelo ponto P' após o deslocamento
$F_y(z_1)$	Força resultante devido à camada removida na, direcção Y
$F_x(z_1)$	Força resultante devido à camada removida, na direcção X
$\sigma_{xx}(z)$	Função da tensão normal segundo X na direcção Z
$\sigma_{yy}(z)$	Função da tensão normal segundo Y na direcção Z
I_{def}	Intensidade da imagem após deformação para qualquer posição (x, y) do <i>pixel</i>
I_{ref}	Intensidade da imagem de referência para qualquer posição (x, y) do <i>pixel</i>

I	Intensidade obtida pela diferença entre as intensidades antes e após deformação ($= I_{def} - I_{ref}$)
$\{X^S\}$	Matriz de coordenadas dos pontos correspondentes à superfície livre
$\{\sigma^S\}$	Matriz de tensões residuais que actuam sobre a nova superfície livre
N	Número de ordem da franja
z_0	Origem da coordenada Z
$\{F\}$	Parâmetros das tensões
ρ	Razão da diferença de passos ($= \frac{p-q}{p}$)
\vec{k}_2	Representa o vector de propagação da luz difundido do P para o plano de observação
\vec{k}_1	Representa o vector de propagação da luz que ilumina P
σ_z	Tensão residual para uma profundidade z
$\varepsilon_{\phi\psi}$	Tensor das deformações definido pelos ângulos ϕ e ψ
ε_ψ	Tensor das deformações na direcção ψ
U_S	Valo da amplitude resultando da soma das amplitudes dos feixes objecto e referência ($= U_0 + U_R$)
ε_m	Valor da deformação equivalente
$\Delta\sigma_n$	Variação de tensão criada por um novo incremento
ΔOPL_1	Alterações do comprimento dos caminhos ópticos para o feixe 1
ΔOPL_2	Alterações do comprimento dos caminhos ópticos para o feixe 2
$a'(x, y)$	Amplitude do campo eléctrico do feixe difundido
$a''(x, y)$	Amplitude do campo eléctrico do feixe difundido após deformação do objecto
$a(x, y)$	Amplitude do campo eléctrico do feixe incidente
$A'_1(x, y)$	Campo eléctrico do feixe difundido 1
$A''_1(x, y)$	Campo eléctrico do feixe difundido 1 após deformação do objecto
$A'_2(x, y)$	Campo eléctrico do feixe difundido 2
$A''_2(x, y)$	Campo eléctrico do feixe difundido 2 após deformação do objecto
$A_1(x, y)$	Campo eléctrico do feixe incidente 1

$A_2(x, y)$	Campo eléctrico do feixe incidente 2
$A''(x, y)$	Campo eléctrico resultante
$A^{ij}, B^{ij}, C^{ij}, F^{ij}, G^{ij}$	Coefficientes de calibração da $j^{ésima}$ camada depois de ter sido realizado o $i^{ésimo}$ incremento da furação
$\Delta\varepsilon(\varphi)$	Deformação radial provocada pela furação numa profundidade Δz a partir de z
$\{\Delta\varepsilon(\{X\})\}$	Deformações relaxadas medidas nos extensómetros
$\psi(x, y)$	É a fase e que depende da variação dos comprimentos ópticos
$f(\{X^s\})$	Função das tensões estimadas
$h(\{X\})$	Função de resposta elástica
$I(x, y)$	Intensidade resultante de $A''(x, y)$
$I_1(x, y)$	Intensidades da luz difusa do feixe I_1
$I_2(x, y)$	Intensidades da luz difusa do feixe I_2
$M_x(z_1)$	Momento resultante devido à camada removida, na direcção X
$M_y(z_1)$	Momento resultante devido à camada removida, na direcção Y
$T_a(p, q)$	Transmitância da placa
$\varphi(x, y)$	Variação de fase
$A_0(p, q)$	Vector que especifica a amplitude e plano da onda no feixe objecto
$A_R(p, q)$	Vector que especifica a amplitude e plano da onda no feixe referência
θ	Ângulo de Bragg
θ_0	Ângulo de Bragg num material sem tensões residuais
α	Ângulo de incidência
ν	Coefficiente de Poisson
λ	Comprimento de onda
θ	Rotação entre duas redes de Moiré
σ	Tensão normal
σ_ϕ	Tensor das tensões cujas componentes são σ_{11} , σ_{12} e σ_{22}
$\delta, \Delta\phi$	Deslocamento de fase (<i>phase shift</i>)
θ_1, θ_2	Direcções principais
σ_1, σ_2	Tensões residuais principais
σ_{11}	Tensão uniaxial

β_m	Ângulo da $m^{\text{ésima}}$ ordem de difracção
$\varepsilon_{rr}, \varepsilon_{\theta\theta}, \varepsilon_{r\theta}$	Componentes do tensor das deformações em coordenadas cilíndricas
$\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \tau_{r\theta}$	Componentes do tensor de tensões em coordenadas cilíndricas
ε_s	Menor deformação a medir
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$	Três componentes das tensões residuais
Δz	Incremento de furação
k_1, k_2	Constantes para todos os materiais isotrópicos
\bar{A}, \bar{B}	Parâmetros ou coeficientes de calibração na área do extensómetro
A^{ij}, B^{ij}	Coeficientes de calibração da camada j depois do incremento i ter sido executado
K_1^i, K_2^i	Coeficientes obtidos por calibração experimental ou numericamente.
K_x^0, K_y^0	Componentes do vector sensibilidade no sistema de coordenadas cartesianas
$n^{(1)}, n^{(1')}$	Números de ordem das franjas em pontos diametralmente opostos
h_n, h_{n-1}	Profundidade do incremento actual e do anterior, respectivamente
σ_n, σ_{n-1}	Tensões uniformes equivalentes às profundidades do furo h_n e h_{n-1}
\bar{K}^0, \bar{K}	Vector sensibilidade
$\sigma_{xx}^j, \sigma_{yy}^j, \tau_{xy}^j$	Componentes das tensões residuais da camada j
$\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{22}$	Tensor das tensões para os problemas envolvendo tensões residuais biaxiais
$a^{ij}, b^{ij}, c^{ij}, f^{ij}, g^{ij}$	Coeficientes de calibração adimensionalizados
A, B, C	Coeficientes ou parâmetros de calibração
d	distância entre planos cristalinos consecutivos
d_0	Distância entre planos cristalinos para uma família de planos característica, num material sem tensões residuais
E	Módulo de elasticidade
E_0	Campo eléctrico do feixe objecto
E_R	Campo eléctrico do feixe referência
f	Frequência da rede de referência virtual ou gradiente de franja
F	Razão da abertura da lente (distância focal/abertura)
f_s	Frequência da rede do provete
G	Intervalo entre franjas devidas às interferências construtivas e destrutivas entre as duas ondas
I_S	Intensidade em notação complexa
K	Constante acusto-elástica

k	Diferença de caminho óptico
M	Ampliação da lente
m	Número de ordem da difracção
n	Número da ordem de difracção
N	Número de ordem de franja
N_x	Número de ordem da franja na direcção X
N_y	Número de ordem da franja na direcção Y
p, q	Passos de redes de Moiré
r_0	é o raio do furo
r_1, r_2	Coordenadas radiais das extremidades do extensómetro
Re	Parte real da notação complexa
r_m	raio da circunferência onde se encontra o centro dos extensómetros
S	Nova superfície livre
S_{subj}	Tamanho do <i>speckle</i> subjectivo
U, V	Representam a distribuição espacial dos deslocamentos segundo duas direcções perpendiculares
U_0	Amplitude do feixe objecto em notação complexa
U_R	Amplitude do feixe referência em notação complexa
$u_{rr}, u_{\theta\theta}, u_{r\theta}$	Componentes do campo de deslocamentos em coordenadas cilíndricas
u_x, u_y	Deslocamentos na componente x e y
u_z	Deslocamentos fora do plano
V	Velocidades de propagação da onda sonora num meio com tensões residuais
V_0	Velocidades de propagação da onda sonora num meio sem tensões residuais
x, y	Coordenadas cartesianas
X, Y, Z	Coordenadas cartesianas

ACRÓNIMOS

Al	Alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CCD	<i>Charged Coupled Device</i>
CEMUP	Centro de Materiais da Universidade do Porto
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
DEMEGI	Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
dpi	<i>dot per inch</i>
DRX	Difracção de Raios X
ESPI	<i>Electronic Speckle Pattern Interferometry</i>
FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
FCUP	Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
INESC	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto
l/mm	linhas por milímetro
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission Radiation</i> , normalmente é utilizado o termo “laser” que tem o mesmo significado
LM	Laboratório de Metalografia
LOME	Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental
MAPS	<i>Magnetic Stress Measurement System</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MFI	Método do Furo Integral
NP	Norma Portuguesa
PZT	Piezoeléctrico
SEM	Scan Electronic Microscopy (Microscopia Electrónica de Varrimento).
SHBT	<i>Split Hopkinson Bar Technique</i>
SPOTS	<i>Standartisation Project for Optical Techniques of Strain Measurement</i>
WUT	<i>Warsaw University of Technology</i>

Sumário

Este trabalho teve como principal objectivo desenvolver técnicas para caracterizar campos de tensões residuais. Utilizando técnicas de relaxação baseadas no método do furo e técnicas ópticas para caracterizar deslocamentos no plano, foram desenvolvidas metodologias para obter as tensões residuais. Estudaram-se problemas envolvendo tensões uniformes em profundidade e tensões variáveis. Para ambos os casos desenvolveram-se métodos de calibração e de medida.

Os resultados obtidos nas medições foram comparados com valores provenientes doutros grupos de investigação e resultantes de simulações numéricas realizadas pelo autor. A concordância verificada entre os resultados permite afirmar que as metodologias desenvolvidas constituem importantes ferramentas para a caracterização de tensões residuais. O facto de se tratar de medições de campo permite obter directamente as tensões de corte e desta forma caracterizar completamente o campo de tensões libertadas. A possibilidade de realizar furos a diferentes profundidades de forma contínua ou iterativa permite investigar a variação de tensões em profundidade e medir tensões em profundidades que normalmente estão fora do alcance de outras técnicas.

No desenvolvimento desta dissertação o autor desenvolveu vários algoritmos e programas para utilização nesta técnica de medida. As técnicas de Moiré interferométrico ainda que não sejam novidade em termos internacionais foram aqui aplicadas de forma pioneira no nosso país. Para isso foi necessário desenvolver técnicas de gravação e replicação de redes bem como métodos de calibração e cálculo de tensões que, tanto quanto é do conhecimento do autor, apresentam alguma originalidade e inovação mesmo em termos internacionais.

Durante a realização deste trabalho o autor estabeleceu colaboração com outros grupos de investigação, quer nacionais, quer estrangeiros. Com estas colaborações foi possível otimizar o processo de gravação de redes e desenvolver os métodos de calibração e cálculo de tensões.

Finalmente deve referir-se a colaboração com o único grupo nacional com trabalho relevante na área de medição de tensões residuais. Com esta colaboração foi possível comparar os resultados obtidos neste trabalho com os resultantes da medição com técnicas convencionais; difracção de raios X e extensometria, e verificar a qualidade das medições realizadas.

No capítulo 1, faz-se uma introdução às tensões residuais, sua definição, como ocorrem, quais os problemas decorrentes das tensões residuais, em que situações é que podem ser vantajosas. Abordam-se, sucintamente, as técnicas de medição de tensões residuais convencionais, referindo-se também sobre a possibilidade de utilização de técnicas ópticas para a sua medição.

O capítulo 2 é dedicado à descrição das principais técnicas de medição de tensões residuais, desde as técnicas destrutivas, às não destrutivas passando pelas semi-destrutivas. É, também, feita uma avaliação qualitativa das principais vantagens e desvantagens de cada uma delas. Neste capítulo faz-se, também, uma introdução a algumas técnicas ópticas utilizadas na medição de tensões residuais.

A medição de campos de deslocamentos no plano com técnicas ópticas vem desenvolvida no capítulo 3. Neste capítulo descrevem-se, com algum pormenor, as técnicas ópticas mais

utilizadas na medição de campos de deslocamentos no plano, como é o caso de Moiré, de ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) no plano, da correlação de imagem e de ESPI radial. Estão indicados os princípios de funcionamento de cada uma delas, as suas potencialidades e limitações, bem como a sua sensibilidade e resolução.

O capítulo 4 é dedicado ao método do furo. Neste capítulo é explicado o fenómeno físico do relaxamento de tensões, são desenvolvidas todas as equações utilizadas no método do furo. Numa primeira parte do capítulo faz-se um desenvolvimento analítico para o furo passante baseado na solução de Kirsch e posteriormente faz-se um desenvolvimento a partir das séries de Fourier para aplicação do método aos furos cegos, que é a situação mais próxima da realidade. Também se aborda o problema da determinação dos parâmetros de calibração e desenvolvem-se as equações que relacionam os deslocamentos obtidos nas medições com as tensões residuais relaxadas.

No capítulo 5 abordam-se as principais técnicas de preparação de superfícies. A preparação das superfícies tem uma importância primordial para uma medição eficiente com as técnicas ópticas. Assim, é feita a descrição da preparação das redes a serem usadas em Moiré geométrico, os procedimentos e dificuldades para obter-se a replicação duma rede de difracção eficiente para Moiré interferométrico. É, também, feito um estudo da preparação de superfícies para a correlação de imagem.

O capítulo 6 foi definido para validar as técnicas ópticas para medição no plano. Assim, fizeram-se um conjunto de ensaios com Moiré geométrico e interferométrico, os resultados obtidos foram comparados com simulações numéricas e, em alguns casos, com outras técnicas de medição, nomeadamente com a extensometria. Os resultados obtidos estiveram de acordo com o esperado e na comparação feita com os cálculos numéricos verificou-se que os valores obtidos se encontram muito próximos. Fez-se o mesmo tipo de análise para a correlação de imagem e, da comparação com os resultados numéricos, verificou-se que há boa semelhança entre os valores medidos com os valores determinados numericamente.

No capítulo 7 descrevem-se as medições de tensões residuais executadas com as técnicas ópticas. Fizeram-se a medição de tensões residuais num provete de calibração utilizando o método do furo associado ao Moiré interferométrico e ESPI no plano, os resultados medidos estão próximos dos valores esperados. Um outro ensaio de medição de tensões residuais foi executado numa peça granalhada, utilizando a técnica do furo incremental com o método integral associada ao Moiré interferométrico. Os valores obtidos com estas medições foram comparados com outras técnicas convencionais de medição de tensões residuais e com uma simulação numérica, verificando-se que há uma concordância entre eles.

As conclusões e propostas para futuros trabalhos na sequência desta dissertação estão apresentadas no capítulo 8.

Sommaire

Le but principal de ce travail a été le développement des techniques pour caractériser champs de contraintes résiduelles. En utilisant des techniques de relaxation fondées sur la méthode de perçage du trou, aussi bien que des méthodes optiques pour caractériser les déplacements dans le plan, on a développé des méthodologies pour obtenir les contraintes résiduelles. On a étudié des problèmes avec des contraintes uniformes en profondeur et des contraintes variables. Des méthodes de calibration et mesure ont été développées pour les deux cas.

Les résultats obtenus au cours des mesures effectués ont été comparés avec les valeurs provenant des autres groupes de recherche et avec ceux qui ont résulté des simulations numériques effectués par l'auteur. L'agrément vérifié permet affirmer que les méthodologies développées constituent des importants outils pour la caractérisation des contraintes résiduelles. Le fait de s'agir des mesures de champ permet l'obtention directe des contraintes de cisaillement et ainsi caractériser complètement le champ des contraintes libérées. La possibilité de perçage à différentes profondeurs de façon continue ou bien itérative, permet la recherche sur la variation des contraintes en profondeur aussi bien que la mesure des ces contraintes, normalement hors d'accès aux autres techniques.

Au cours de ce travail, l'auteur a développé des algorithmes et programmes d'ordinateur pour l'utilisation avec cette méthode de mesure. Les techniques de Moiré interférométrique, bien que connues à l'étranger, ont été appliquées ici de façon pionnière dans notre pays. Pour cela, il a été nécessaire de développer des techniques d'enregistrement et copie des réseaux et des méthodes de calibration et calcul des contraintes que, tant que l'auteur sache, présentent quelque originalité et innovation, même internationalement.

Pendant ce travail, l'auteur a établi des collaborations avec d'autres groupes de recherche nationales et étrangers qui s'ont révélées précieuses dans l'optimisation du procès d'enregistrement des réseaux et du développement des méthodes de calibration et calcul des contraintes.

Enfin, on doit aussi mentionner la collaboration avec le seul groupe national d'importance reconnue dans ce champ. Cette collaboration a permis la comparaison des résultats obtenus dans ce travail avec ceux résultants de l'application des techniques conventionnelles, telles que la diffraction des Rayons-X et l'extensométrie, et vérifier la qualité des mesures effectuées.

Abstract

The main subject of the present work was the development of techniques for the characterization of residual stress fields. To this end, a set of methodologies was developed by using the hole drill relaxation technique together with in plane displacements optical characterization methods. Several physical problems involving depth uniform as well as variable stresses were subject to analysis. Calibration and measurement methods were developed in all cases.

The results obtained on this work were compared both to the results from other research groups and to those obtained by numerical simulation by the author. The agreement between all results supports the statement that the developed methodologies remain as important tools for the characterization of residual stress fields. The fact these are full field methods enables the direct acquisition of shear stresses, thus completely characterizing the released stress field. The capacity to drill a hole at different depths either continuously or iteratively, makes it possible to study and measure depth stresses which are normally out of reach for other techniques.

In the course of this thesis, the author developed several algorithms and computer programs to support the measurement techniques. Moiré Interferometry, while not being a novelty in foreign research centers, was applied here for the first time in our country. In order to do so, grating recording and replication techniques had to be developed, as well as calibration and stress calculation methods which bear some innovation and originality, to the author's knowledge.

The author has also established a number of collaborations with other research groups, both national and foreigner. The grating recording process was dully optimized due to these collaborations, and the calibration and stress calculation methods were further improved.

Finally, but not less important, the collaboration with the soul national research group of relevance in the area of residual stress calculation must be referred. This collaboration made it possible to compare the results obtained during this work with those resulting from the application of conventional techniques such as X-Ray diffraction and strain gauging, and further enabled the verification of the quality of the performed measurements.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO.....	3
Referências.....	6

CAPÍTULO 2 TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

2. TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS.....	9
2.1 Introdução.....	9
2.2 Métodos destrutivos.....	9
2.2.1 Método de remoção por camada.....	9
2.2.2 Método de seccionamento.....	11
2.3 Método não destrutivos.....	13
2.3.1 Método de difracção de raios X.....	13
2.3.2 Método de difracção de neutrões.....	16
2.3.3 Método de ultra-sons.....	17
2.3.4 Método de magnético.....	18
2.4 Método semi-destrutivos.....	18
2.4.1 Método do furo com extensómetros eléctricos.....	18
2.4.2 Métodos ópticos combinados com a técnica do furo.....	24
2.4.2.1 Método do furo sobre um verniz frágil.....	24
2.4.2.2 Método do furo sobre um revestimento fotoelástico.....	24
2.4.2.3 Método do furo com holografia interferométrica.....	25
2.4.2.4 Método do furo com ESPI radial.....	27
2.4.2.5 Método do furo e a Interferometria de Moiré.....	28
Referências.....	29

CAPÍTULO 3 TÉCNICAS ÓPTICAS PARA MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS NO PLANO

3. TÉCNICAS ÓPTICAS PARA MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS NO PLANO.....	37
3.1 Introdução.....	37
3.2 Técnicas de Moiré.....	38
3.2.1 Moiré Geométrico.....	38
3.2.1.1 Oclusão por sobreposição de redes: descrição paramétrica.....	38

3.2.1.2 Franjas de Moiré – deslocamentos e deformações.....	40
3.2.1.3 Análise da deformação.....	42
3.2.1.4 Análise de campos de deformação bi-dimensionais.....	43
3.2.1.5 Sensibilidade do Moiré geométrico.....	45
3.2.1.6 Efeitos da utilização de passos diferentes.....	46
3.2.2 Moiré Interferométrico.....	48
3.2.2.1 Princípios da interferometria de Moiré.....	49
3.2.2.1.1 Planos de interferência (<i>walls of interference</i>).....	49
3.2.2.1.2 Redes de difracção.....	50
3.2.2.1.3 Relações de base da interferometria de Moiré.....	51
3.2.2.1.4 Obtenção de deslocamentos.....	53
3.2.2.2 Limite teórico.....	55
3.2.2.3 Sensibilidade e resolução.....	55
3.2.2.4 Sistemas ópticos para a interferometria de Moiré.....	56
3.2.2.4.1 Sistema de dois feixes.....	56
3.2.2.4.2 Sistema de quatro feixes.....	57
3.2.3 Vantagens e desvantagens da técnica de Moiré.....	59
3.3 Interferometria Holográfica.....	60
3.3.1 Fundamentos básicos de holografia.....	60
3.3.2 Obtenção dum holograma de transmissão.....	61
3.3.3 Reconstrução duma imagem holográfica.....	64
3.3.4 Vector sensibilidade.....	65
3.4 ESPI – <i>Electronic Speckle Pattern Interferometry</i>	67
3.4.1 Efeito <i>speckle</i>	67
3.4.2 Efeitos da polarização.....	69
3.4.3 Descorrelação dos padrões de <i>speckle</i>	70
3.5 Medição no plano com ESPI.....	70
3.6 Medição com ESPI radial.....	73
3.7 Correlação de imagem digital.....	75
Referências.....	78
 CAPÍTULO 4 MÉTODO DO FURO	
4. MÉTODO DO FURO.....	83
4.1 Introdução.....	83
4.2 Solução analítica	83
4.2.1 Solução analítica, na ausência do furo, para uma placa isotrópica	

fina, sujeita a uma tensão biaxial uniforme.....	84
4.2.2 Solução de Kirsch.....	85
4.2.3 Solução do furo.....	87
4.3 Solução da série de Fourier para o caso do método do furo.....	91
4.3.1 Série de Fourier de primeira ordem.....	91
4.3.2 Determinação dos coeficientes de calibração para a medição de tensões residuais médias.....	92
4.3.3 Determinação dos coeficientes de calibração para a medição de tensões residuais não uniformes em profundidade.....	93
4.4 Determinação de tensões residuais.....	94
4.4.1 Determinação de tensões residuais médias.....	94
4.4.1.1 Determinação das tensões residuais a partir deslocamentos u_x e u_y em interferometria de Moiré.....	94
4.4.1.2 Determinação das tensões residuais a partir dos deslocamentos uniaxiais u_x e u_y na interferometria de Moiré.....	95
4.4.2 Determinação das tensões residuais não uniformes em profundidade.....	96
4.4.2.1 Características dos campos de deslocamento na superfície devidos à relaxação de tensões residuais não uniformes.....	96
4.4.2.2 Determinação das tensões residuais não uniformes pelo método integral.....	98
4.5 Determinação do sinal das tensões residuais.....	98
4.5.1 Método de modulação temporal de fase ou <i>phase shift</i>	99
4.5.1.1 Método da perturbação da carga.....	99
4.5.1.2 Método da perturbação do caminho óptico.....	99
4.5.2 Método das franjas portadoras.....	100
4.6 Escolha dos pontos de medição.....	100
4.7 Conclusões.....	101
Referências.....	102
CAPÍTULO 5 TÉCNICAS DE PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIES	
5. TÉCNICAS DE PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIES.....	105
5.1 Preparação de superfícies para a técnica de Moiré.....	105
5.1.1 Preparação de superfícies para Moiré geométrico.....	105
5.1.1.1 Criação da rede utilizando um programa CAD.....	106
5.1.1.2 Transferência da rede para a superfície a analisar.....	110
5.1.2 Preparação de superfícies para Moiré interferométrico.....	112
5.1.2.1 Rede intermédia de silicone.....	114

5.1.2.2 Rede intermédia de epóxico.....	125
5.2 Preparação de superfícies para a técnica de Correlação de Imagem.....	126
Referências.....	128
CAPÍTULO 6 MEDIÇÃO DE CAMPOS DE DESLOCAMENTOS NO PLANO COM TÉCNICAS ÓPTICAS	
6. MEDIÇÃO DE CAMPOS DE DESLOCAMENTOS NO PLANO COM TÉCNICAS ÓPTICAS.....	131
6.1 Moiré geométrico.....	131
6.1.1 Ensaio de tracção dum provete de alumínio com furo central.....	131
6.1.1.1 Ensaio experimental.....	131
6.1.1.2 Análise de resultados experimentais.....	135
6.1.1.3 Simulação numérica do ensaio.....	138
6.1.1.4 Conclusões.....	140
6.1.2 Ensaio de tracção a elevadas velocidades de deformação.....	140
6.2 Montagem óptica para Moiré interferométrico.....	143
6.3 Ensaio de Tracção.....	146
6.3.1 Ensaio experimental.....	147
6.3.2 Simulação numérica.....	150
6.3.2.1 Cálculo das deformações e deslocamentos.....	151
6.3.3 Discussão de resultados.....	153
6.3.4 Conclusões.....	153
6.4 Estudo de um problema de Mecânica da Fractura.....	154
6.4.1 Ensaio experimental.....	154
6.4.2 Simulação numérica.....	158
6.4.3 Discussão de resultados.....	160
6.4.4 Conclusões.....	161
6.5 Juntas Coladas.....	161
6.5.1 Ensaio experimental.....	162
6.5.2 Simulação numérica.....	165
6.5.3 Discussão de resultados.....	168
6.5.4 Conclusões.....	168
6.6 Ensaio de Compressão num Disco (<i>Brazilian Disc</i>).....	168
6.6.1 Ensaio experimental.....	169
6.6.2 Simulação numérica.....	174
6.6.3 Discussão de resultados.....	175

6.6.4 Conclusões.....	176
6.7 Correlação de Imagem.....	177
6.7.1 Ensaio de tracção num provete de borracha com furo central.....	177
6.7.1.1 Ensaio experimental.....	177
6.7.1.2 Simulação numérica.....	179
6.7.1.3 Discussão de resultados.....	181
6.7.1.4 Conclusões.....	181
6.7.2 Ensaio de flexão de madeira.....	182
Referências.....	187
CAPÍTULO 7 MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	
7. MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS.....	191
7.1 Determinação dos coeficientes de calibração.....	191
7.2 Medição de tensões residuais num provete de calibração.....	199
7.2.1 Medição de tensões residuais com ESPI no plano.....	202
7.2.2 Medição de tensões residuais com Moiré interferométrico.....	208
7.3 Medição de tensões residuais não uniformes ao longo da espessura.....	211
7.3.1 Montagem e procedimentos experimentais.....	212
7.3.2 Resultados obtidos.....	214
7.3.3 Comparação de resultados.....	215
7.3.3 Conclusões.....	216
7.4 Automatização do processo de medição de tensões residuais.....	217
Referências.....	221
CAPÍTULO 8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTURO	
8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTURO.....	225
8.1 Conclusões.....	225
8.2 Trabalhos futuros.....	227
ANEXO A DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO.....	229
ANEXO B MECANISMO DE TRACÇÃO.....	235
ANEXO C DIMENSÕES E GEOMETRIA DO PROVETE.....	243
ANEXO D INTERFERÓMETRO DE MOIRÉ.....	247
ANEXO E DIMENSÕES E GEOMETRIA DO <i>BRAZILIAN DISC</i>	253

ANEXO F	DISPOSITIVO DE FLEXÃO ESTÁTICA PARA MADEIRA.....	257
ANEXO G	CALIBRAÇÃO EXPERIMENTAL.....	265
ANEXO H	SISTEMA DE FURAÇÃO.....	273

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

As tensões residuais podem ser definidas como aquelas que se mantêm no material ou componente após o processo de fabrico e na ausência de forças externas ou gradientes térmicos [1]. Os processos de fabrico são a causa mais comum de tensões residuais, pois praticamente todos eles (fundição, soldadura, maquinagem, tratamentos térmicos, etc.) introduzem tensões residuais nos componentes fabricados. No entanto, as tensões residuais podem surgir também de operações de manutenção ou reparação. Por vezes, estas tensões podem também ser induzidas em serviço, durante o processo de instalação ou por sobrecargas ocasionais.

As tensões residuais podem classificar-se em macro ou micro tensões e qualquer dos tipos, em combinação ou individualmente, poderá aparecer num componente. As macro tensões residuais, frequentemente designadas por tensões residuais do Tipo I, variam ao longo do componente numa escala muito superior à do tamanho do grão. As micro tensões, que resultam de diferenças no interior da micro estrutura do material, podem ser classificadas em Tipo II ou III. As tensões residuais do Tipo II são micro tensões que operam ao nível do tamanho do grão e as tensões do Tipo III são geradas a nível atómico [1].

Os efeitos das tensões residuais podem ser tanto benéficos como prejudiciais, dependendo da sua magnitude, sinal, e da sua distribuição. Na maior parte dos casos as tensões residuais são prejudiciais, pois sobrepõem-se às tensões de serviço. Existe muita documentação relativa a casos em que estas tensões se consideram o factor predominante em falhas estruturais. Um exemplo do efeito das tensões residuais e propriedades dos materiais no comportamento de estruturas pode encontrar-se no trabalho realizado por Paulo Piloto *et al* sobre o comportamento de estruturas sob a acção do fogo [2]. Contudo, podem também ser benéficas, especialmente por permitirem o aumento da tensão limite de fadiga em componentes solicitados dinamicamente. Nestes casos são propositadamente provocadas tensões residuais de compressão à superfície, como é o caso do *shot peening*, [3, 4], aplicado em superfícies e do *cold work* [5], aplicado em furos para rebites. Ambas as técnicas são muito utilizados em construção aeronáutica. Outro aspecto particularmente importante a propósito das tensões residuais é que a sua presença geralmente passa despercebida até que o mau funcionamento ou falhas ocorram [6].

Existem actualmente diferentes técnicas para a medição de tensões residuais, tais como: remoção de camada e curvatura, método do furo com extensometria ou com processos ópticos em que a radiação se encontra no visível, difracção de raios X e de neutrões, técnicas magnéticas e de ultras sons, etc. Em algumas delas são utilizados processos mecânicos de libertação de tensões para poder medi-las enquanto noutras se detecta a sua presença pelos efeitos nas propriedades dos materiais. No entanto, nenhuma delas é de aplicação geral e

permite uma fácil utilização. Por isso justifica-se a necessidade de investigar novas técnicas e aplicações que permitam caracterizar os campos de tensões residuais.

O Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) não dispunha à data de início deste trabalho de meios para poder caracterizar tensões residuais. A vasta experiência do Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME) na utilização de técnicas ópticas, com possível aplicação para este fim, nunca tinha sido utilizada para caracterizar os campos de deslocamentos que resultam da libertação de tensões residuais, como acontece, por exemplo, no método do furo. Dada a importância deste tema foi decidido desenvolver um trabalho de investigação que permitisse adaptar técnicas ópticas para medir tensões residuais pela técnica do furo.

Tanto quanto é conhecimento do autor, a investigação na caracterização de tensões residuais em Portugal, apenas é realizada pelo grupo de investigação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC) liderado pelo Prof. Mourão Dias. Este grupo, que está integrado no Departamento de Engenharia Mecânica da FCTUC, dispõe de meios e experiência na medição de tensões por difracção de raios X e por extensometria, com a utilização do método do furo. Desta forma, o desenvolvimento de técnicas ópticas para esta aplicação permitiu tornar disponíveis técnicas alternativas que poderão evidenciar vantagens em certas situações.

A utilização da técnica do furo implica o recurso a técnicas experimentais para obter as deformações à superfície provocadas pela libertação das tensões. Estas deformações podem ser medidas utilizando transdutores de medição discreta ou calculadas a partir dos deslocamentos da superfície. As técnicas ópticas utilizadas para a medição de deslocamentos apresentam grandes vantagens, quando comparadas com outras técnicas, salientando-se a possibilidade de realizar uma medição de carácter global ou de campo, permitir uma medição sem contacto no plano e fora dele e ainda por serem técnicas cuja resolução pode ser variável, podendo ir desde uma resolução baixa (décimas de milímetro) até muito elevada, da ordem de grandeza do comprimento de onda da luz coerente utilizada, (algumas décimas de micrómetro) [7].

Como o princípio de utilização destas técnicas baseia-se na comparação entre dois estados de uma superfície (antes e após a deformação) há sempre a necessidade da criação de padrões de referência diferentes, dependendo da técnica utilizada, que podem ser classificados em dois grupos: padrões aleatórios e padrões regulares (linhas e quadriculas). Os padrões aleatórios permitem a medição dos deslocamentos em diferentes direcções. Estes padrões podem ser criados artificialmente no caso de superfícies uniformes. Para isso são aplicadas gotículas de tinta sobre a superfície utilizando a pintura por *spray*. Podem também ser utilizadas tintas granitadas, já disponíveis no mercado, ou então aproveitar a rugosidade microscópica natural da superfície como padrão aleatório de referência. Ao primeiro caso é aplicada uma técnica denominada correlação de imagem. Como estes padrões têm dimensões bastante elevadas, comparando com o comprimento de onda da luz, a técnica só é utilizada para a medição de deslocamentos quando a resolução exigida não é muito elevada. O segundo caso permite a medição com uma elevada resolução. Contudo, é necessário utilizar sempre iluminação com luz coerente, de um *laser* por exemplo. Uma das técnicas ópticas que utiliza este tipo de referência é o ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*).

É ainda possível recorrer à utilização de padrões regulares gravados sobre a superfície para caracterizar o campo de deslocamentos. Estas técnicas são designadas por técnicas de Moiré e podem ser utilizadas com luz branca, em padrões cuja frequência espacial não ultrapassa as 40

linhas/mm, ou necessitam de iluminação coerente, sempre que são utilizados padrões com maior frequência espacial, técnica designada por Moiré interferométrico.

Neste trabalho foram desenvolvidas algumas técnicas ópticas para a medição de campos de deslocamentos baseados nos padrões de referência indicados nos parágrafos anteriores, nomeadamente a técnica de Moiré (geométrico e interferométrico). A resolução destas técnicas é igual ao passo da rede, pelo que é possível ajustá-la de acordo com a aplicação em estudo. Utilizando redes com elevada frequência espacial, obtidas a partir de hologramas, é possível obter resoluções próximas das obtidas com técnicas de interferometria holográfica, como são as técnicas de ESPI. Quando comparadas com o ESPI estas técnicas apresentam vantagens quando se pretendem medir deslocamentos no plano, pois são insensíveis a movimentos de corpo rígido e apenas medem na direcção perpendicular à rede. Apresentam contudo uma importante desvantagem que se prende com a gravação das redes na superfície dos objectos. Dado tratar-se de uma técnica nova para o LOME o autor realizou alguns contactos com outros grupos de investigação para poder desenvolvê-la com sucesso.

Durante o desenvolvimento do Moiré Interferométrico o autor visitou a Universidade de Bristol no Reino Unido para participar num *workshop* sobre técnicas de medição de deslocamentos no plano e foi investigador visitante no Departamento de Mecatrónica da *Warsaw University of Technology* (WUT) na Polónia. Durante a permanência do autor no grupo liderado pela Prof. Malgorzata Kujawinska teve oportunidade de realizar algumas medições com Moiré interferométrico. Para a obtenção de redes Moiré de elevada frequência especial o autor realizou vários contactos com grupos de investigação nacionais nas Universidades de Coimbra, Aveiro e Minho além do grupo de Optoelectrónica da Faculdade de Ciências/INESC da Universidade do Porto. Este último grupo prestou uma inestimável colaboração ao ajustar convenientemente os parâmetros do revestimento por vaporização com alumínio de forma a permitir a obtenção das redes que foram utilizadas ao longo deste trabalho.

Referências:

- [1] James, M. R., Lu, J., *Handbook of Measurement of Residual Stresses*, Edit. Jian Lu, The Fairmont Press, Inc. United States, 1996.
- [2] Piloto, P.A.G; Vila Real, Paulo; Mesquita, Luís; Vaz, M.A.P., *Steel Mechanical Properties Evaluated At Room Temperature After Being Submitted At Fire Conditions*, Proc., XXX IAHS - World Congress on Housing Construction, 2002, pg. 1545-1553
- [3] Nobre, J. P., *Sobre o comportamento mecânico de camadas superficiais dos materiais: estudo do contacto no impacto elasto-plástico; determinação do estado de tensões residuais pela técnica do furo incremental*, tese de doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2000.
- [4]] Nobre, J. P., Kornmeier, M., Dias, A. M., Scholtes, B., *Use of the Hole-drilling Method for Measuring Residual Stresses in Highly Stressed Shot-peened Surfaces*, Experimental Mechanics, 40 (3), 2000, pg. 289-297.
- [5] Papanikos, P., *Mechanics of Mixed Mode Fatigue Behaviour of Cold Worked Adjacent Holes*, thesis for Doctor of Philosophy, University of Toronto, Toronto, 1997.
- [6] Ribeiro, J., Vaz, M. e Piloto, P., *Medição de Campos de Tensões Residuais – Estudo Preliminar*, nos Proc., VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional, Évora, 2003.
- [7] Ribeiro, J., Vaz, M. e Piloto, P., *Medição de Campos de Deslocamentos Recorrendo à Técnica de Moiré*, V Encontro Nacional da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET), nos Proc., Coimbra, 2004.

CAPÍTULO 2

TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

2 TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

2.1 Introdução

Por tensões residuais designam-se aquelas que permanecem nas estruturas e componentes após terem sido removidas todas as cargas aplicadas. Durante as últimas décadas foram utilizadas praticamente todas as técnicas de mecânica experimental no estudo das tensões residuais, tendo algumas sido especialmente desenvolvidas para esta aplicação. A maioria das técnicas de análise experimental de tensões é baseada na medição das deformações provocadas por cargas externas. Contudo, as tensões residuais existentes num material ou estrutura são internas e auto-equilibrantes. Na medição por métodos mecânicos provoca-se uma perturbação ao estado de equilíbrio inicial e estabelece-se um novo estado de equilíbrio. Estes métodos são denominados por técnicas de relaxação de tensões residuais. Algumas destas técnicas podem provocar a inutilização do componente ou estrutura enquanto noutras a alteração pode ser tão pequena que não provoca a sua inutilização. Existem também técnicas que permitem a sua medição a partir da variação de características físicas alteradas pelas tensões residuais. Por isso, as técnicas de medição de tensões residuais podem ser classificadas em três tipos: técnicas destrutivas, semi-destrutivas e não destrutivas.

As técnicas de relaxação necessitam sempre de uma medição das deformações superficiais após libertação das tensões instaladas. As técnicas de extensometria inicialmente utilizadas para este fim limitam-se a medir pontualmente o estado de deformação e recorrem a uma formulação analítica para calcular as tensões residuais. Com o desenvolvimento das técnicas ópticas ficaram disponíveis meios para caracterizar de forma contínua os campos de deformação obtidos após relaxação. Técnicas como Moiré interferométrico, ESPI ou a correlação de imagem estão hoje disponíveis e podem ser utilizadas para este fim.

2.2 Métodos destrutivos

2.2.1 Método de remoção por camada

O método da remoção por camada, dada a sua simplicidade, é um dos métodos destrutivos mais antigos. O processo de medição é elaborado por etapas e em cada etapa é removida uma camada fina de material. A remoção pode ser realizada por maquinagem ou por ataque químico. As primeiras aplicações deste método remontam ao início do século XX, e são atribuídas a Heyn [1]. Este investigador utilizou nos seus estudos uma barra na qual foram progressivamente retiradas finas camadas de material. As tensões residuais longitudinais da barra foram correlacionadas com a variação do seu comprimento. Foram posteriormente

realizados outros estudos teóricos na aplicação do método a campos de tensões axissimétricos em barras cilíndricas, Masgnar [2] e Sachs [3]. O método foi também aplicado com sucesso em placas por Treuting e Read [4]. Neste caso, os autores introduziram a teoria de placas em flexão. A título de exemplo faz-se uma apresentação sucinta do princípio do método da remoção por camadas desenvolvido por estes dois últimos investigadores.

Para uma placa fina com tensões residuais biaxiais, uniformes no plano e com um gradiente ao longo da espessura, o processo de medição por remoção da camada está representado na Figura 2.1 (a)-(d). Quando é removida uma camada, a tensão residual que ela contém é relaxada e destruído o estado de equilíbrio inicial. Para conseguir o estado de equilíbrio na parte restante, produzem-se deflexões e deformações.

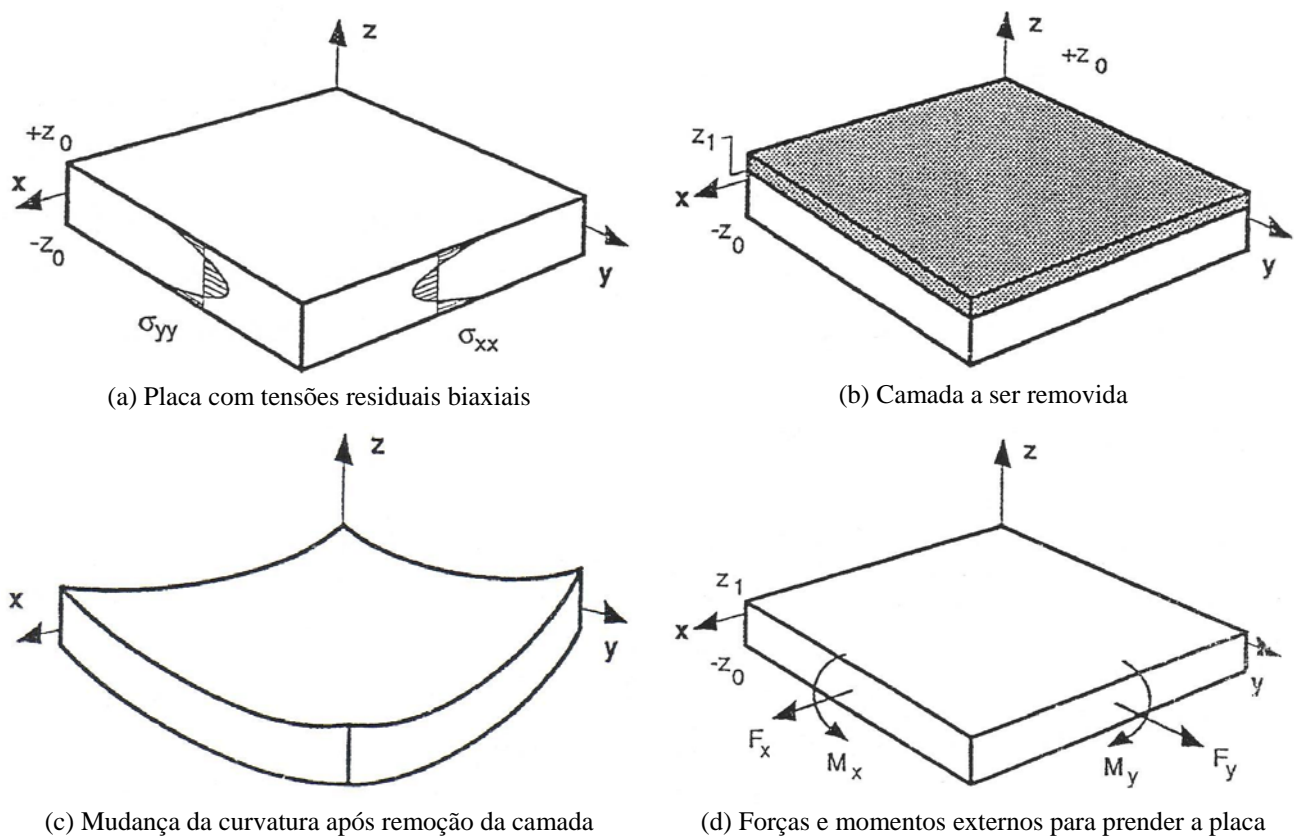


Figura 2.1 Método da remoção por camada aplicada na medição de tensões residuais biaxiais após Treuting e Read [4].

No início, as tensões residuais encontram-se num estado de equilíbrio estático independentemente da secção interior em que se encontram. As equações de equilíbrio, nas direcções X e Y, para as forças e para os momentos podem ser descritas, respectivamente por:

$$\int_{-z_0}^{z_0} \sigma_{xx}(z) dz = 0 \quad \int_{-z_0}^{z_0} \sigma_{xx}(z) z dz = 0 \quad (2.1)$$

$$\int_{-z_0}^{z_0} \sigma_{yy}(z) dz = 0 \quad \int_{-z_0}^{z_0} \sigma_{yy}(z) z dz = 0 \quad (2.2)$$

Por sua vez, a força resultante e o momento da camada removida na direcção X e Y podem ser expressos, respectivamente pelas seguintes expressões:

$$F_x(z_1) = \int_{z_0}^{z_1} \sigma_{xx}(z) dz \quad M_x(z_1) = \int_{z_0}^{z_1} \sigma_{xx}(z) \left[z + \frac{z_0 - z_1}{2} \right] dz \quad (2.3)$$

$$F_y(z_1) = \int_{z_0}^{z_1} \sigma_{yy}(z) dz \quad M_y(z_1) = \int_{z_0}^{z_1} \sigma_{yy}(z) \left[z + \frac{z_0 - z_1}{2} \right] dz \quad (2.4)$$

Os momentos das equações (2.3) e (2.4) podem também ser obtidos em função das curvaturas da placa:

$$M_x(z_1) = -\frac{E}{12(1-\nu^2)} (z_0 - z_1)^3 [\varphi_x(z_1) + \nu\varphi_y(z_1)] \quad (2.5)$$

$$M_y(z_1) = -\frac{E}{12(1-\nu^2)} (z_0 - z_1)^3 [\varphi_y(z_1) + \nu\varphi_x(z_1)] \quad (2.6)$$

onde $\varphi_x(z_1)$ e $\varphi_y(z_1)$ são as curvaturas da placa nas direcções X e Y quando é removida uma camada de espessura z_1 . Substituindo as equações (2.5) e (2.6) nas equações (2.3) e (2.4) as componentes das tensões residuais nas direcções X e Y podem ser determinadas em função da curvatura da placa:

$$\sigma_{xx}(z_1) = -\frac{E}{6(1-\nu^2)} \left\{ \begin{aligned} & (z_0 + z_1)^2 \left[\frac{d\varphi_x(z_1)}{dz_1} + \nu \frac{d\varphi_y(z_1)}{dz_1} \right] + \\ & 4(z_0 + z_1) [\varphi_x(z_1) + \nu\varphi_y(z_1)] - 2 \int_{z_1}^{z_0} [\varphi_x(z) + \nu\varphi_y(z)] dz \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

$$\sigma_{yy}(z_1) = -\frac{E}{6(1-\nu^2)} \left\{ \begin{aligned} & (z_0 + z_1)^2 \left[\frac{d\varphi_y(z_1)}{dz_1} + \nu \frac{d\varphi_x(z_1)}{dz_1} \right] + \\ & 4(z_0 + z_1) [\varphi_y(z_1) + \nu\varphi_x(z_1)] - 2 \int_{z_1}^{z_0} [\varphi_y(z) + \nu\varphi_x(z)] dz \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

2.2.2 Método de seccionamento

Os métodos de seccionamento são totalmente destrutivos e necessitam de muito tempo para a sua execução. Eles são frequentemente utilizados para determinar as tensões residuais tridimensionais em componentes de grandes dimensões, como é o caso de peças soldadas. Num componente espesso a variação de curvatura por remoção duma camada é muito pequena e, por isso, de difícil medição. Assim sendo, a relaxação de tensões residuais pode ser determinada a partir da medição das deformações que ocorrem no plano que contém a superfície superior da camada removida.

Para medir tensões residuais tridimensionais, são colados extensómetros na superfície da peça antes desta ser cortada. Durante o corte da peça as tensões residuais que actuam sobre a superfície cortada são libertadas e as correspondentes deformações elásticas relaxadas são medidas pelos extensómetros. A distribuição das tensões que actuam sobre as novas superfícies livres é estimada a partir das tensões relaxadas após o seccionamento. Esta distribuição de tensões é, geralmente, expressa por uma função contínua, podendo esta ser

substituída por uma série finita (ou aproximação por discretização) para qualquer grau de precisão desejado, a qual contém um número q de parâmetros $\{F\} = [F_1 \ F_2 \ \dots \ F_q]^T$, tal como se pode ver na representação esquemática da Figura 2.2. Que pode ser expressa da seguinte forma:

$$\{\sigma^S\} = [f(\{X^S\})]\{F\} \quad (2.9)$$

onde $\{\sigma^S\}$ é a matriz de tensões residuais que actuam sobre a nova superfície livre S , $\{X^S\}$ é a matriz de coordenadas dos pontos correspondentes à superfície S , $f(\{X^S\})$ é a função das tensões estimadas e $\{F\}$ representa os parâmetros das tensões.

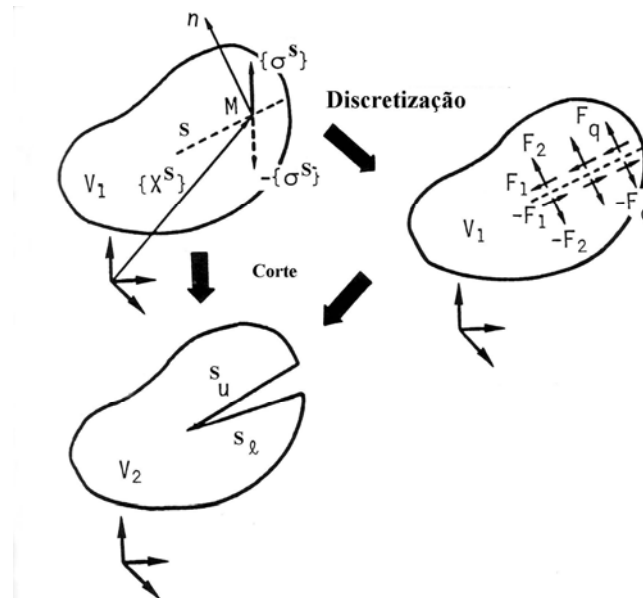


Figura 2.2 Secção de libertação tensões e sua discretização (método de relaxação de tensões).

As deformações relaxadas que foram medidas nos extensómetros podem ser expressas pelos parâmetros de deformação indicadas abaixo quando uma função de resposta elástica $h(\{X\})$ é introduzida:

$$\{\Delta\varepsilon(\{X\})\} = [h(\{X\})]\{F\} \quad (2.10)$$

A matriz dos parâmetros de tensões $\{F\}$ foi determinada na equação (2.10) e as tensões residuais podem ser determinadas na equação (2.9).

O procedimento de seccionamento está esquematicamente descrito na Figura 2.3.

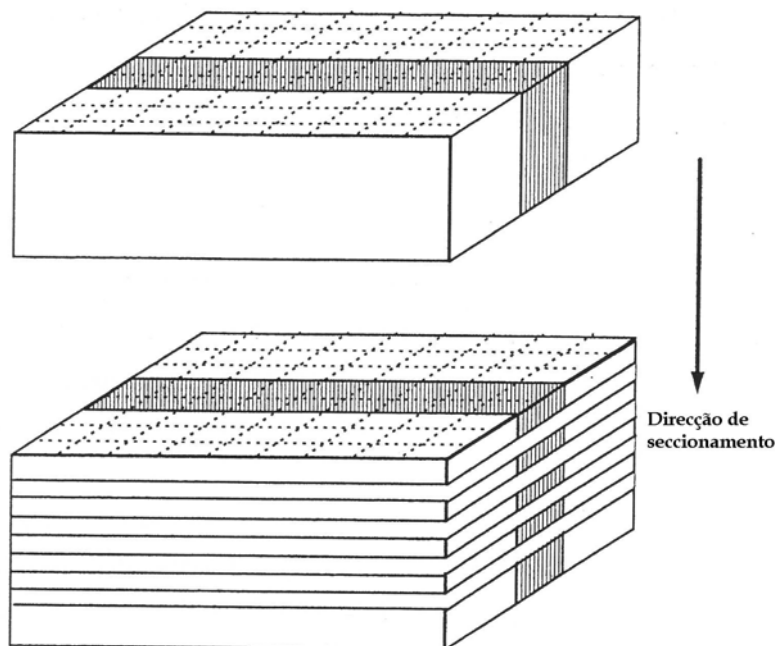


Figura 2.3 Representação esquemática do princípio da técnica de seccionamento. Os extensómetros estão posicionados na intersecção das linhas ponteadas.

Nos primeiros trabalhos com este método, a reconstrução das tensões residuais foi baseada em teorias simples [5]. Nos anos 70, com a utilização dos métodos de elementos finitos, a precisão deste método sofreu grandes melhorias. Muitos problemas práticos tridimensionais puderam ser resolvidos, como por exemplo os problemas colocados pelas juntas soldadas [6].

Uma descrição dos métodos tradicionais de seccionamento foi apresentada por Ueda e Fukuda [7]. Nestes métodos as deformações intrínsecas (deformações plásticas no interior da peça) foram escolhidas em substituição das deformações residuais. As deformações intrínsecas, que não são afectadas pelo processo de seccionamento, são determinadas directamente a partir das medições da deformação à superfície. O campo de tensões residuais é, então, estimado a partir da determinação das deformações intrínsecas. Apesar da precisão deste método ser substancialmente inferior ao método de seccionamento convencional, apresenta a vantagem de simplificar consideravelmente o processo de corte.

2.3 Métodos não destrutivos

2.3.1 Método de difracção de raios X

O método de difracção de raios X é um método não destrutivo que permite a medição de tensões residuais superficiais em materiais cristalinos. Com o apoio duma técnica de remoção por camada, é também possível realizar medições em profundidade.

Num material perfeitamente cristalino os átomos estão regularmente dispostos de acordo com um arranjo tridimensional periódico. Uma das características físicas dum material deste tipo é a sua distância entre planos cristalinos. Quando os raios X monocromáticos incidem na superfície dum material cristalino são difractados segundo a lei de Bragg [8]. Neste caso, o

raio difractado e o raio incidente são simétricos, relativamente ao plano de difracção, e respeitam a seguinte equação (2.11).

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.11)$$

onde, d é a distância entre planos cristalinos consecutivos; θ é o ângulo de Bragg; n é número da ordem de difracção e λ , por sua vez, representa o comprimento de onda dos raios X.

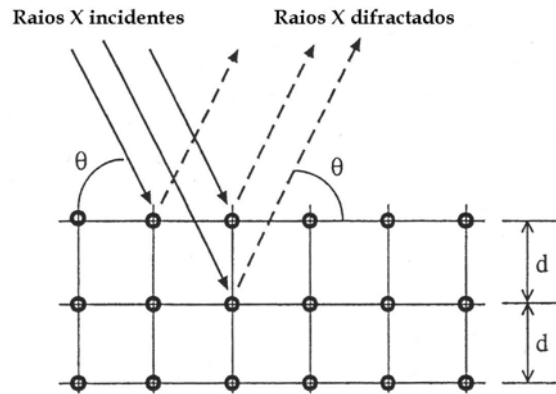


Figura 2.4 Princípio do método de difracção de raios X de acordo com a lei de Bragg.

Num material sem tensões residuais a distância entre planos cristalinos é d_0 para uma família de planos característica e não varia com a orientação dos planos. Quando o material sofre uma deformação, provocada por uma carga externa ou por tensões residuais, a distância entre planos cristalinos varia. De acordo com a lei de Bragg a posição do pico de difracção é igualmente modificada. A deformação pode então ser simplesmente expressa por:

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta} - 1 \quad (2.12)$$

A deformação elástica do cristal pode, assim, ser obtida a partir da gravação dos picos de difracção, antes e após a deformação.

A equação (2.12) foi desenvolvida recorrendo à definição de deformação convencional, contudo, para uma maior precisão pode ser utilizada a definição da deformação rotacional:

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.13)$$

Todavia, para pequenas deformações ($<0.2\%$), o valor da deformação rotacional está muito próximo do da deformação convencional.

É muito comum fazer-se uma aproximação à deformação rotacional à expansão da série de $\ln(x)$ truncada à primeira ordem,

$$\ln(x) = \left(\frac{x-1}{x} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{x-1}{x} \right)^2 + \dots$$

Se $\frac{d}{d_0}$ for substituído por x , então

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sin \theta}{\sin \theta_0} \quad (2.14)$$

Para os materiais isotrópicos, com a introdução da lei de Hooke generalizada, o tensor das deformações, ε nas equações anteriores, pode ser relacionado com o tensor das tensões. Para os problemas envolvendo tensões residuais uniaxiais essa relação pode ser descrita pela seguinte equação:

$$\varepsilon_\psi = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{11} \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} \sigma_{11} \quad (2.15)$$

onde ψ representa a direcção do tensor das deformações ε (Figura 2.5).

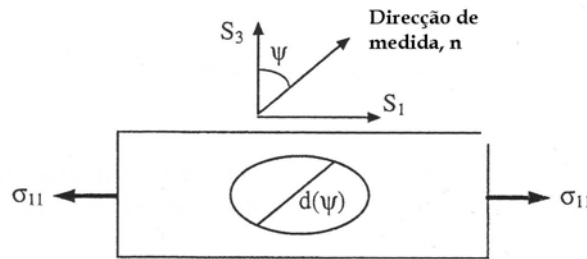


Figura 2.5 Tensor das deformações na direcção de medida do pico de difracção para a determinação duma tensão uniaxial.

Como se pode ver na equação (2.15), ε_ψ varia linearmente com $\sin^2 \psi$ e a inclinação é proporcional à tensão uniaxial σ_{11} que deverá ser determinada.

Para os problemas envolvendo tensões residuais biaxiais, as componentes diferentes de zero do tensor das tensões são σ_{11} , σ_{12} e σ_{22} . O problema torna-se tridimensional e é necessário medir as deformações ao longo da direcção n descrita pelos dois ângulos ϕ e ψ (Figura 2.5). As componentes do vector n são $(\sin\psi\cos\phi, \sin\psi\sin\phi, \cos\psi)$. A relação entre tensão – deformação pode ser descrita pela equação:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_\phi \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} Tr(\sigma) \quad (2.16)$$

onde $\sigma_\phi = \sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{12} \sin 2\phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi$; $Tr(\sigma) = \sigma_{11} + \sigma_{22}$; a direcção de medida do tensor $\varepsilon_{\phi\psi}$ é definido pelos ângulos ϕ e ψ (Figura 2.6).

Como se pode ver na equação (2.16), $\varepsilon_{\phi\psi}$ varia linearmente com $\sin^2 \psi$. A inclinação é proporcional ao tensor das tensões σ_ϕ e as componentes deste tensor de tensões são σ_{11} , σ_{12} e σ_{22} que podem ser determinados a partir σ_ϕ em três direcções de medida.

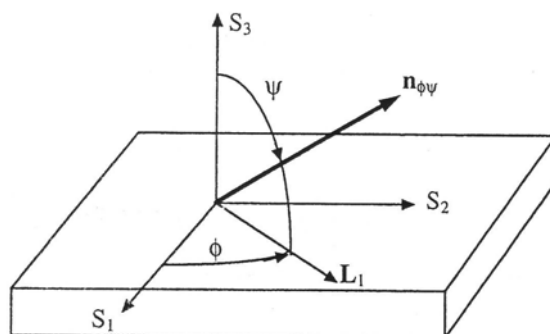


Figura 2.6 Tensor das deformações para a determinação das tensões biaxiais para a difração de raios X.

De forma similar poderiam determinar-se as componentes tridimensionais do tensor das tensões. Este método não será apresentado aqui podendo encontrar-se uma boa descrição num trabalho publicado por Lu [9].

O método de difracção de raios X tem sido utilizado com muita frequência nos últimos cinquenta anos. Para os materiais policristalinos convencionais este método tem uma excelente precisão. Contudo, com o desenvolvimento rápido da ciência dos materiais, o método de difracção de raios X tem encontrado muitos problemas novos, como por exemplo: a influência do tamanho do grão [10], os problemas de micro-tensões [11], a deformação plástica [12] e a anisotropia dos materiais [13]. Para colmatar algumas das suas limitações a técnica de difracção de raios X tem sido alvo de intensa investigação que tem conduzido a alguns avanços.

2.3.2 Método de difracção de neutrões

O método de difracção de neutrões é um método não destrutivo de medição de tensões residuais. Os seus princípios são idênticos aos da difracção de raios X. Contudo, os feixes de neutrões incidentes têm uma maior capacidade de penetração, que pode atingir 50 mm num material cristalino. Esta é a razão pela qual este método pode ser utilizado para medir tensões residuais tridimensionais num componente espesso como é, por exemplo, um cordão de soldadura (Figura 2.7).

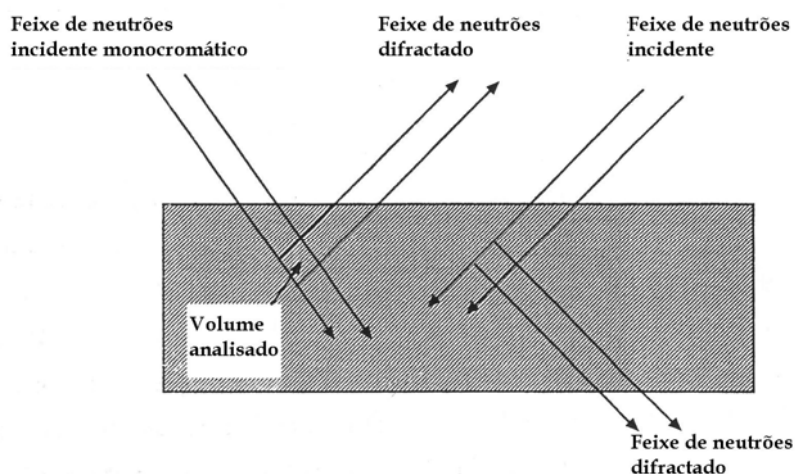


Figura 2.7 O efeito de Bragg no método de difracção de neutrões.

Como o domínio definido pelo volume explorado por um feixe de neutrões é relativamente grande, este método indica apenas o valor médio das macro-tensões residuais no volume em análise. Apesar do método de difracção de neutrões necessitar de muito tempo e de ser dispendioso, o facto de ser não destrutivo torna-o muito interessante em muitas aplicações como: na soldadura [14], nos tratamentos térmicos [15], nos materiais compósitos à base de metal [16], etc.

2.3.3 Método dos ultra-sons

Os ultra-sons são muito utilizados em Engenharia como uma técnica não destrutiva para a detecção de defeitos internos. Uma outra aplicação desta técnica consiste na medição não destrutiva de tensões residuais. Quando as ondas de ultra-sons se propagam através do material, a velocidade de propagação é função do seu estado de tensão. Para um campo de tensões uniforme instalado num material isotrópico e contínuo a variação da velocidade é proporcional à tensão residual, relação definida pela acusto-elasticidade, e pode ser determinada por:

$$V - V_0 = K\sigma \quad (2.17)$$

onde V e V_0 são as velocidades de propagação da onda sonora num meio com e sem tensões, respectivamente, σ é a tensão, K é a constante acusto-elástica.

Quando se pretende medir um campo uniforme de tensões residuais ao longo da espessura duma placa, pode ser concebida uma experiência semelhante às esquematicamente descritas na Figura 2.8 (a) e (b). Se for necessário medir as tensões residuais uniformes na superfície utiliza-se a configuração descrita na Figura 2.8 (c).

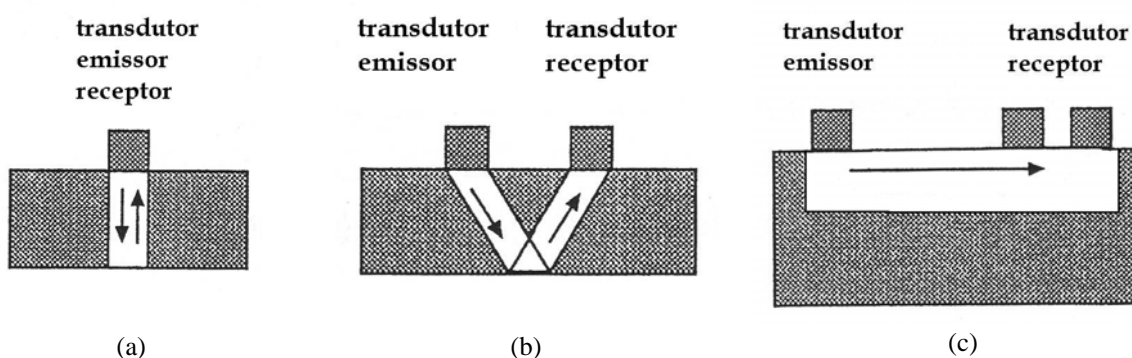


Figura 2.8 Representação esquemática da utilização de ultra-sons para a medição de tensões residuais [9].

Na medição com ultra-sons a variação da velocidade provocada pelas tensões é frequentemente muito fraca. A precisão destas técnicas depende essencialmente do rigor na determinação da velocidade. Geralmente é necessário, no mínimo, efectuar medições com precisão de 1 ns. Tal como acontece com outras técnicas não destrutivas, deverá continuar-se a investigação sobre as consequências na medição, das alterações na micro-estrutura e da plastificação do material. Os estudos teóricos e as aplicações das técnicas de ultra-sons são apresentados em diversa bibliografia [17, 18].

2.3.4 Método magnético

O método magnético é também um método não-destrutivo de medição de tensões residuais que apenas pode ser utilizado com materiais ferromagnéticos. Quando um componente de material ferromagnético é magnetizado observa-se uma deformação inter-reticular natural denominada magnetoestricção. A deformação magnetoestrictiva provoca variações dimensionais do material. O método magnético pode ser subdividido em dois métodos: o método do ruído magnético de Barkhausen [19, 20] e o método da magnetoestricção [21]. No primeiro é colocada uma bobina próxima do provete e quando este sofre uma deformação é medido um sinal de indução electromagnético que se denomina como ruído de Barkhausen. A calibração da experiência é realizada sobre um provete calibrado, e nesta calibração medem-se os parâmetros característicos do ruído de Barkhausen e obtém-se uma função para a compressão e tracção. No método da magnetoestricção a relação entre a magnetização e a tensão aplicada é também determinada por uma técnica de calibração. Nestes dois métodos as curvas de calibração dependem de vários parâmetros como o material e a microestrutura, o tamanho e a forma do provete, etc. Por essa razão, o provete de calibração deverá estar o mais próximo possível do provete real a testar. Com esta técnica pode atingir-se uma profundidade de medição entre 0.1 a 1 mm. Nos últimos anos têm vindo a ser desenvolvidos sistemas baseados em métodos magnéticos para a medição de tensões residuais *in situ*, nomeadamente na indústria ferroviária, permitindo a medição de tensões residuais em carris. Sendo, um dos mais conhecidos, o sistema MAPS (*Magnetic Stress Measurement System*) [22, 23] – este sistema permite a medição, *in situ*, de tensões residuais nos carris em duas direcções ortogonais.

2.4 Métodos semi-destrutivos

2.4.1 Método do furo com extensómetros eléctricos

Os métodos de medição de tensões residuais com o furo remontam aos anos 30 do século passado. Mathar [24] propôs um método para a determinação de tensões residuais uniaxiais medindo as variações do diâmetro de um furo maquinado num provete. Em 1937 foram inventados os extensómetros eléctricos e Soete utilizou-os para medir as deformações superficiais provocadas pela relaxação de tensões residuais em torno de um furo maquinado [25, 26]. Neste método, o campo de tensões residuais é considerado uniforme ao longo de toda a espessura duma placa, isotrópica e com dimensões infinitas, de forma a poder aplicar-se a solução de Kirsch [27].

Para um campo de tensões residuais com as direcções principais conhecidas, a deformação medida num extensómetro segundo a direcção radial é provocada pelo relaxamento de tensões residuais. Quando se efectua um pequeno furo passante para realizar esse relaxamento a deformação radial pode ser expressa por:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} \frac{2r_0^2}{r_1 r_2} \cos 2\theta \left[-1 + \frac{1+\nu}{4} \frac{r_0^2 (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)}{r_1^2 r_2^2} \right] (\sigma_1 - \sigma_2) - \frac{(1+\nu)r_0^2}{2Er_1 r_2} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2.18)$$

onde r_0 é o raio do furo e r_1 e r_2 são as coordenadas radiais das extremidades do extensómetro eléctrico;

$$\varepsilon_m = \frac{1}{r_1 - r_2} \int_{r_1}^{r_2} \varepsilon_r dr \text{ é o valor da deformação equivalente (Figura 2.9).}$$

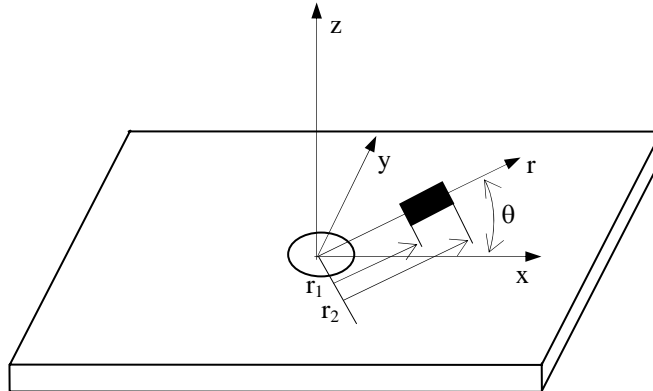


Figura 2.9 Representação esquemática do método do furo desenvolvido por Soete.

A equação (2.18) pode ser reescrita:

$$\varepsilon_m = A(\sigma_1 + \sigma_2) + B(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \quad (2.19)$$

onde A e B são coeficientes que se podem calcular com as seguintes expressões;

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \frac{r_0^2}{r_1 r_2} \quad B = \frac{1}{E} \frac{2r_0^2}{r_1 r_2} \left[-1 + \frac{1+\nu}{4} \frac{r_0^2 (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)}{r_1^2 r_2^2} \right]$$

Na equação (2.19), onde r_0 , r_1 , r_2 , E e ν estão definidos, as tensões residuais principais σ_1 e σ_2 podem ser determinados a partir das deformações radiais nas direcções θ_1 e θ_2 . Se as direcções principais são desconhecidas, é necessário utilizar três extensómetros, localizados sobre a circunferência de raio r_m , com diferentes direcções para determinar as três componentes das tensões residuais, σ_{xx} , σ_{yy} e τ_{xy} (Figura 2.10).

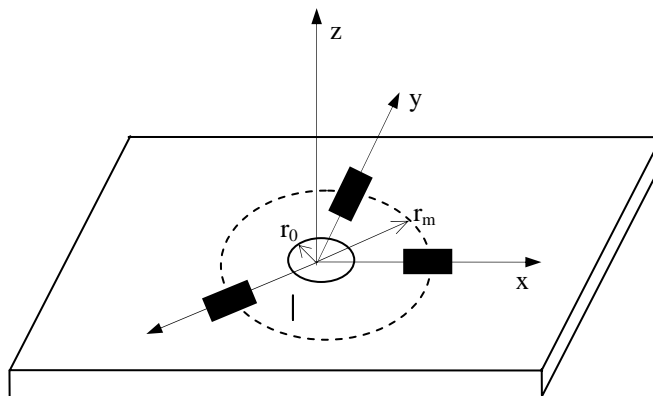


Figura 2.10 Roseta de extensómetros para a determinação das tensões residuais no plano, usando o método de Soete.

O método do furo passante possui algumas limitações intrínsecas. Em primeiro lugar, admite que as tensões residuais são tensões que se auto-equilibram. No entanto, esta situação só

ocorre se a distribuição das tensões for uniforme ao longo da espessura da placa. Em segundo lugar um furo passante pode provocar a inutilização da estrutura ou peça em muitas das aplicações industriais onde é necessário medir tensões residuais. Em qualquer caso, as tensões residuais encontram-se nas camadas superficiais pelo que uma medição pelo método do furo passante origina resultados pouco significativos. A fim de adaptar a medição por extensometria à técnica do furo cego, foi introduzido por Soete e Vancombrugge [26] e posteriormente desenvolvido por Kelsey [28] um método de medição experimental, designado por método da deformação incremental, que permite determinar as tensões residuais no caso duma distribuição não-uniforme das tensões residuais ao longo da espessura. Neste método os coeficientes A e B da equação (2.19) são considerados como constantes de calibração que variam ao longo da espessura. Quando se realiza um furo com pequenos incrementos de profundidade, a variação da deformação na superfície é supostamente proporcional à tensão residual média na camada incremental. Isto significa que, se a tensão média ao longo dum incremento de profundidade é a mesma para o estado de tensão uniforme e para um não uniforme, a deformação superficial nos dois casos deve ser igual. Com base na lei de Hooke, Kelsey [28] propôs que a deformação incremental se poderia calcular considerando:

$$\Delta\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} (K_1^i \sigma_{xx} - \nu K_2^i \sigma_{yy}) \quad \Delta\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} (K_1^i \sigma_{yy} - \nu K_2^i \sigma_{xx}) \quad (2.20)$$

As tensões residuais médias na espessura do furo podem ser determinadas pela equação (2.20) sendo;

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{(K_1^i)^2 - (K_2^i)^2} [K_1^i (\Delta\varepsilon_{xx}) + \nu K_2^i (\Delta\varepsilon_{yy})] \quad (2.21)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E}{(K_1^i)^2 - (K_2^i)^2} [K_1^i (\Delta\varepsilon_{yy}) + \nu K_2^i (\Delta\varepsilon_{xx})]$$

Os coeficientes K_1^i e K_2^i são obtidos por calibração experimental ou determinados numericamente. O material do provete usado na calibração deverá ser o mesmo do componente onde se pretende medir as tensões residuais. Para isso é colada uma roseta de extensómetros na superfície do provete de calibração com a qual se medem as deformações superficiais. Na abertura do furo e na medição das deformações são utilizados os procedimentos convencionais.

O método de Kelsey necessita duma calibração para cada medição realizada. Rendler e Vigness [29] propuseram uma função para descrever a variação da deformação da superfície com a profundidade do furo, a variação da deformação quando ocorre um incremento de furação duma profundidade z para uma de $z + \Delta z$, é:

$$\Delta\varepsilon(\varphi) = [K_z(\varphi)] \sigma_z \Delta z \quad (2.22)$$

onde σ_z é a tensão residual para uma profundidade z , φ é o ângulo entre a direcção da medição e a direcção principal máxima, $\Delta\varepsilon(\varphi)$ é deformação radial para uma determinada distância radial causada pela furação duma profundidade Δz a partir de z , $K_z(\varphi)$ é um parâmetro que é constante para qualquer z , Δz e φ dados. Por simplicidade, pode ser

considerado o caso em que o valor de z corresponde à profundidade total do furo e que neste caso é:

$$\varepsilon(\varphi) = [K(\varphi)]\sigma, \text{ e } K(\varphi) = A + B \cos 2\varphi \quad (2.23)$$

onde A e B são coeficientes que podem ser expressos por:

$$A = \frac{1}{2E}(k_1 - \nu k_2) \text{ e } B = \frac{1}{2E}(k_1 + \nu k_2)$$

onde k_1 e k_2 são as constantes para todos os materiais isotrópicos. Por consequência, para todos os materiais isotrópicos só é necessário fazer-se a calibração uma única vez.

Os métodos de Kelsey e de Rendler, bem como outros trabalhos realizados neste período, são denominados como métodos de calibração incremental. Um método de aproximação alternativo foi introduzido por Nickola [30] e é denominado por método das tensões médias. Neste método, foi desenvolvido o conceito de tensão uniforme equivalente: é a tensão uniforme que existiria ao longo da profundidade total do furo e que produziria a mesma relaxação de deformação que a distribuição real não uniforme de tensão. A variação de tensão criada por um novo incremento de profundidade do furo pode ser calculado pela seguinte relação:

$$\Delta\sigma_n = \frac{1}{\Delta h_n} [\sigma_n h_n - \sigma_{n-1} h_{n-1}] \quad (2.24)$$

onde $\Delta h_n = h_n - h_{n-1}$; σ_n e σ_{n-1} são as tensões uniformes equivalentes às profundidades do furo h_n e h_{n-1} (Figura 2.11).

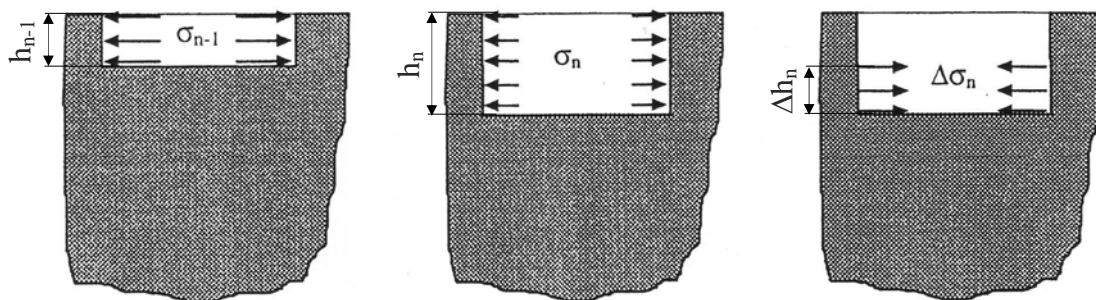


Figura 2.11 Tensões uniformes equivalentes no método da tensão média.

No método da deformação incremental e no método da tensão média, as calibrações experimentais são extremamente morosas e torna-se muito difícil preparar os provetes de calibração com as tensões residuais adequadas porque a deformação superficial em torno dum furo cego causado pela relaxação de tensões não uniformes em profundidade pode não ser equivalente aquela que é causada pelas cargas externas aplicadas nas extremidades do

provete. Quando a tensão residual varia em profundidade, as tensões calculadas, com estes métodos, nas profundidades intermédias, não representam a tensão residual actual, mas a tensão equivalente uniforme (da superfície até à profundidade h) que produziria a mesma relaxação de deformação aquela profundidade. Esta situação é referida por Schajer [31], tal como se encontra demonstrado esquematicamente na Figura 2.12.

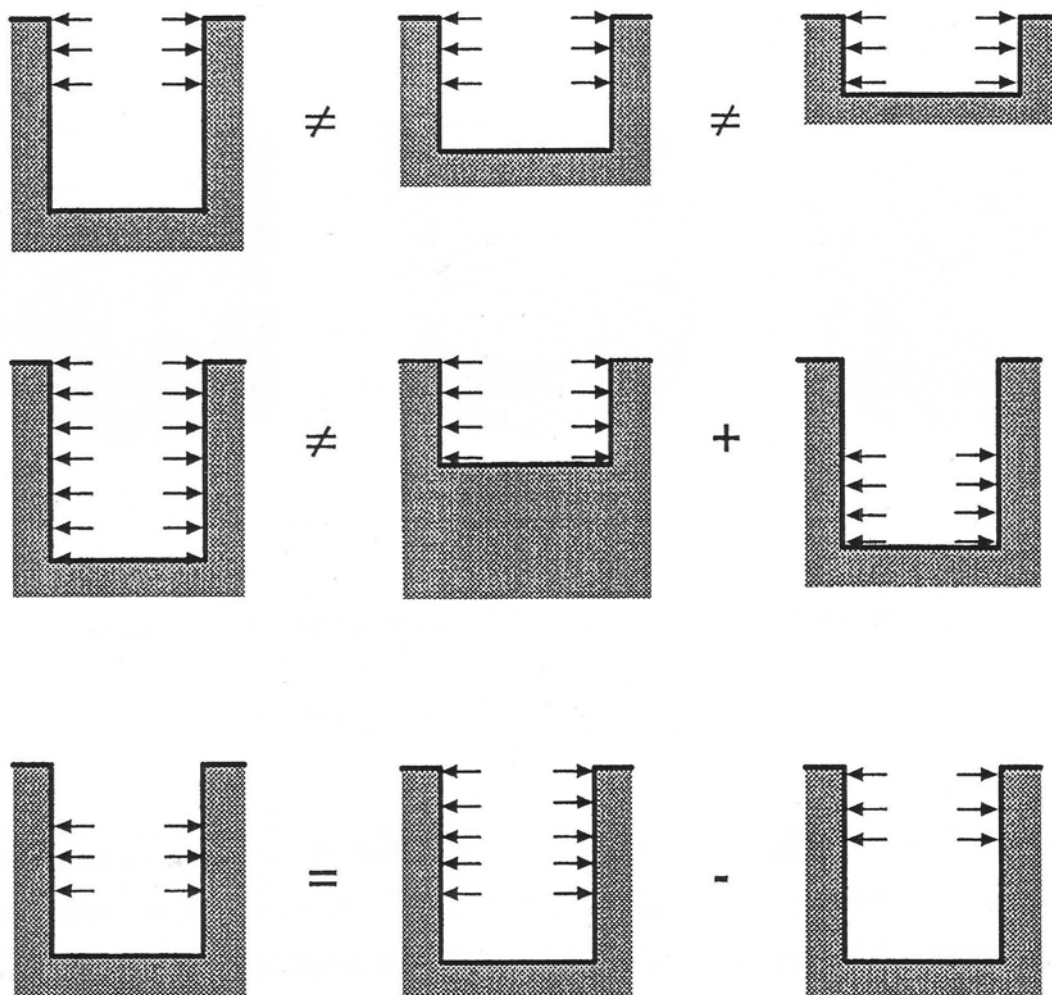


Figura 2.12 Relações entre os deslocamentos ou deformações na superfície provocados pela relaxação de tensões residuais tendo em conta a variação da profundidade do furo.

Com o desenvolvimento do método de elementos finitos, foi proposto por Schajer [31] um método de calibração numérica. Neste método as cargas externas são aplicadas no bordo do furo para simular a relaxação de tensões residuais. Os coeficientes de calibração A e B , da equação (2.19), podem ser determinados num provete de calibração com todas as formas e dimensões geométricas possíveis. Posteriormente foi desenvolvido o método integral por Bijak-Zochowski [32], Niku-Lari [33], Lu [34, 35], Flaman [36] e Schajer [37, 38] para os problemas de tensões residuais não uniformes, eliminando as limitações da deformação incremental e do método da tensão média. No método integral, considera-se que as tensões são uniformes ao longo duma pequena espessura de profundidade do furo, correspondendo à profundidade de cada incremento realizado como se mostra na Figura 2.13.

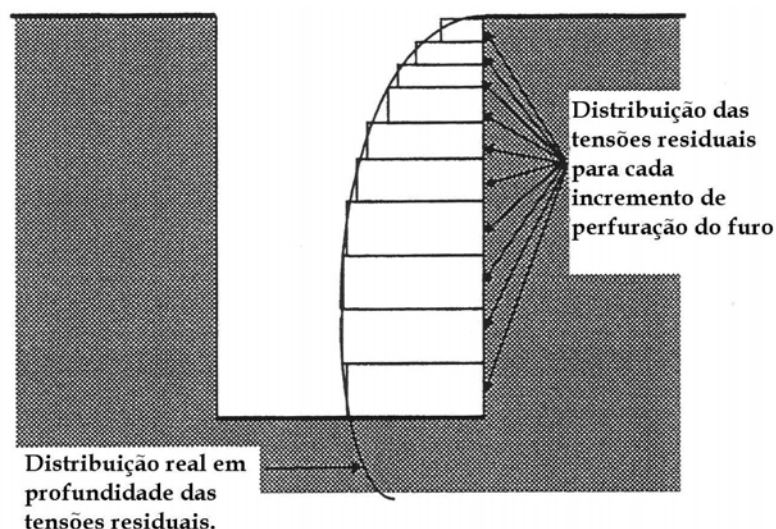


Figura 2.13 Medição de tensões residuais não uniformes pelo método integral.

A relação entre a deformação causada pela tensão residual uniforme que actua sobre toda a superfície de cada etapa da furação e a tensão residual correspondente pode ser expressa pela equação (2.19) mas, neste caso, os coeficientes de calibração são diferentes. Assim, a equação referida pode ser expressa na forma matricial como se representa em:

$$\varepsilon_r^i = \sum_{j=1}^i \begin{bmatrix} A^{ij} + B^{ij} \cos 2\theta & A^{ij} - B^{ij} \cos 2\theta & 2B^{ij} \sin 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^j \\ \sigma_{yy}^j \\ \tau_{xy}^j \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

onde $i = 1, 2, \dots, n$; n é número total de incrementos; $j = 1, 2, \dots, i$; A^{ij} , B^{ij} são coeficientes de calibração da camada j depois do incremento i ter sido executado; σ_{xx}^j , σ_{yy}^j e τ_{xy}^j são as componentes das tensões residuais da camada j .

Comparando com os outros métodos do furo, o método integral é mais preciso para a medição de tensões residuais não uniformes, quando a sua variação é muito abrupta ao longo da espessura. Contudo, é inevitável um trabalho de cálculo importante para a determinação do elevado número de coeficientes de calibração indicados na equação (2.25). Por exemplo, quando o furo é executado em dez etapas, são estabelecidos dez modelos nos elementos finitos e conseqüentemente é utilizado uma centena de aplicações de diferentes cargas para determinar o elevado número de coeficientes de calibração necessários para aplicar a equação (2.25).

Actualmente, os métodos baseados na relaxação com o furo e medição com extensometria, especialmente o método integral, são utilizados como métodos fidedignos em muitas aplicações de Engenharia. Na literatura vêm descritas muitas aplicações como por exemplo; casos envolvendo tratamentos térmicos, tratamentos de superfícies, maquinagem, soldadura, revestimentos superficiais de materiais compósitos, etc. [9]. A nível nacional esta técnica tem vindo a ser desenvolvida e aplicada pelo grupo de investigação da FCTUC havendo alguns trabalhos importantes desenvolvidos por Nobre [39, 40, 41] e Dias [40, 41].

2.4.2 Métodos ópticos combinados com a técnica do furo

Uma característica comum dos métodos ópticos é a sua capacidade para medição de campo, o que significa a possibilidade de aceder ao valor do deslocamento ou deformação em cada ponto pertencente ao campo de medida. Quando combinados com uma técnica de relaxação como a do furo, podem obter-se informações suplementares analisando as franjas que se formam em torno deste. Com uma medição de carácter global pode ser evitado o efeito da excentricidade do furo que ocorre em extensometria.

2.4.2.1 Método do furo sobre um verniz frágil

A técnica do furo sobre um verniz frágil é uma técnica antiga para a medição qualitativa de tensões. Sobre esta técnica existem muitos trabalhos, desenvolvidos na década de 40, que se encontram descritos na literatura [42]. Esta técnica tem sido pouco utilizada nos últimos anos, embora seja a técnica de campo que primeiro foi utilizada na medição de tensões.

Trata-se de uma técnica particularmente simples que utiliza a fendilhação de um revestimento para caracterizar qualitativamente o campo de tensões na superfície dos componentes. A aplicação de uma carga externa ao provete revestido com um verniz frágil provoca também a deformação do revestimento. Quando é atingida a tensão de rotura do revestimento, surgem pequenas fissuras no mesmo. Geralmente, diferentes procedimentos de revestimento podem originar diferentes valores medidos de tensões residuais de tracção. Por essa razão, o valor limite da tensão em tracção dum verniz frágil deverá ser calibrado com grande precisão.

O método do verniz frágil combinado com a técnica do furo foi utilizado como alternativa ao método do furo com extensometria. Quando é efectuado um furo num campo de tensões residuais, as tensões provocadas no revestimento devido à relaxação sobrepõem-se às que já lá existiam. Quando as tensões resultantes satisfazem as condições de fissuração, aparecem fissuras em torno do furo. Estas experiências foram descritas por Ellis [43] e Tokarcik [44].

2.4.2.2 Método do furo sobre um revestimento fotoelástico

Os revestimentos fotoelásticos são utilizados na análise de tensões na fotoelasticidade de reflexão em corpos opacos. O princípio da fotoelasticidade de reflexão é idêntico ao de transmissão mas com o dobro da sensibilidade. O revestimento fotoelástico é constituído por um material que tem propriedades birrefringentes. Este material sendo iluminado com luz polarizada altera a polarização da luz quando lhe são aplicadas tensões. O revestimento tem, geralmente, alguns milímetros de espessura e é depositado sobre a superfície do provete a testar. Quando são aplicadas forças externas a este provete, o revestimento fotoelástico deforma-se com ele e as tensões interiores do revestimento podem ser determinadas pela lei da fotoelasticidade [43] e que é expressa por:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{Nf_\sigma}{h} \quad (2.26)$$

onde, σ_1 e σ_2 são as tensões máxima e mínima para um estado plano de tensão, N é número de ordem da franja, f_σ é a constante de franja característica do material fotoelástico utilizado, h é a espessura do revestimento fotoelástico.

Quando é maquinado um furo que atravessa o revestimento fotoelástico e o provete, ocorre um relaxamento de tensões residuais que origina o aparecimento de tensões no revestimento fotoelástico. O método do revestimento fotoelástico combinado com a técnica do furo foi introduzido pela primeira vez por Zandman em 1960 [46].

Uma das vantagens mais evidentes do método com revestimento fotoelástico é a capacidade de análise quantitativa de todo o campo de tensões. Contudo, a sensibilidade do método não é muito elevada.

2.4.2.3 Método do furo com holografia interferométrica

A holografia interferométrica é um método óptico para medição de deslocamentos. As principais vantagens da sua utilização são: as elevadas sensibilidade e resolução, o carácter global da medição e a medição sem contacto. É largamente utilizado para múltiplas aplicações como: a medição de deslocamentos e deformações, caracterização de vibrações, testes não destrutivos, etc. Uma introdução sobre os princípios da interferometria holográfica poderá ser consultada nas referências [47, 48]. No capítulo 3 será apresentada uma descrição deste método.

A primeira aplicação da interferometria holográfica na medição de tensões residuais foi descrita por Steffens em 1977, [49]. Contudo, os procedimentos para converter a informação contida nas franjas em tensões residuais não foram completamente descritos. Mais tarde, os cientistas soviéticos Antonov [50], Lobanov [51] e Rassoka trouxeram importantes contribuições na medição de tensões residuais em soldaduras. Estes investigadores utilizaram a interferometria holográfica combinada com a técnica do furo, para medir os deslocamentos fora do plano durante a relaxação das tensões residuais. Para obter essa relaxação foi utilizada a técnica do furo. Na Figura 2.14 está representada esquematicamente a montagem óptica utilizada.

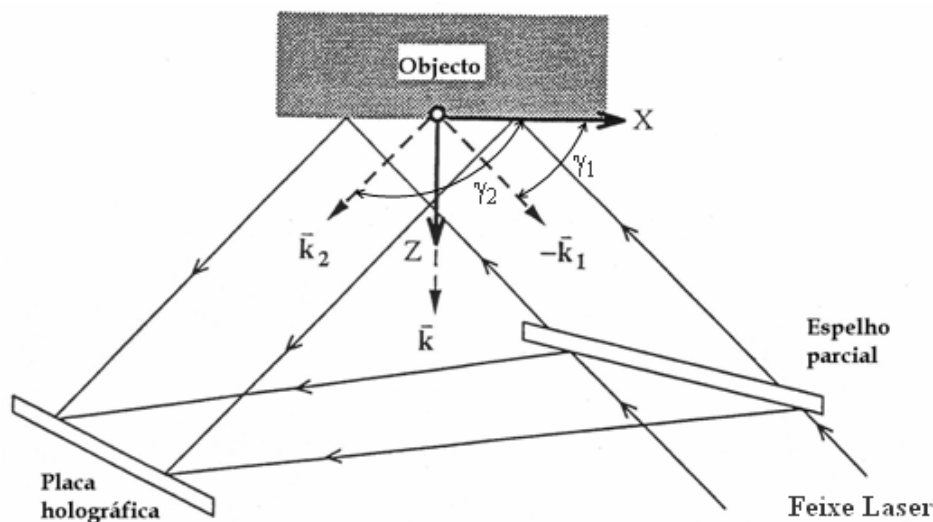


Figura 2.14 Montagem óptica de interferometria holográfica para a medição de deslocamentos fora do plano.

Os deslocamentos fora do plano, u_z , podem ser expressos em função do número de ordem da franja pela seguinte expressão:

$$u_z = \frac{\lambda}{2} \frac{n}{\sin\left(\frac{\gamma_2 - \gamma_1}{2}\right)} \quad (2.27)$$

Onde γ_1 é o ângulo entre o eixo X e o raio incidente no objecto, γ_2 é o ângulo entre o eixo X e o feixe difundido do objecto, λ é o comprimento de onda do laser.

As tensões residuais normalmente ocorrem no plano. Quando é introduzido um furo, os deslocamentos fora do plano são muito inferiores aos que se verificam no plano. Na interferometria holográfica, os deslocamentos tridimensionais podem ser obtidos a partir de três hologramas gravados em diferentes posições. Contudo, a configuração necessária para a combinação de múltiplos hologramas pode fazer baixar a sensibilidade e aumentar o erro na contagem das franjas. Makino e Nelson [52 – 56] trouxeram progressos importantes na aplicação desta técnica utilizando um único holograma para a determinação dos deslocamentos no plano.

O método apresentado baseia-se na hipótese do campo de tensões residuais ser uniforme ao longo da profundidade do incremento. Por conseguinte, em dois pontos diametralmente opostos, os deslocamentos no plano têm um valor igual mas com sinais opostos, os deslocamentos fora do plano têm um valor igual e o mesmo sinal. A diferença entre o número de ordem das franjas entre os pontos diametralmente opostos pode anular o efeito dos deslocamentos fora do plano e é expresso por:

$$\pi \frac{n^{(1)} - n^{(1')}}{2} = K_x^0 u_x(x, y) + K_y^0 u_y(x, y) = \pi n^0 \quad (2.28)$$

Onde K_x^0 e K_y^0 são as componentes do vector sensibilidade \bar{K}^0 no sistema de coordenadas cartesianas e são constantes para uma determinada configuração óptica, $n^{(1)}$ e $n^{(1')}$ são respectivamente o número de ordem das franjas em pontos diametralmente opostos (1) e (1').

Note-se que os valores absolutos do número de ordem das franjas $n^{(1)}$ e $n^{(1')}$ na equação (2.28) não são necessariamente conhecidas embora sejam facilmente determináveis. Para as tensões residuais biaxiais, utilizando as relações tensão-deslocamento, a relação entre o número de ordem de franja n^0 e as componentes das matriz tensões residuais σ_{xx} , σ_{yy} e τ_{xy} obtém-se;

$$\pi \begin{bmatrix} n_1^0 \\ n_2^0 \\ n_3^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Onde

$$\begin{aligned} C_{i1} &= (K_x^0 \cos \theta_i + K_y^0 \sin \theta_i)(A + B \cos 2\theta_i) + (-K_x^0 \sin \theta_i + K_y^0 \cos \theta_i) C \sin 2\theta \\ C_{i2} &= (K_x^0 \cos \theta_i + K_y^0 \sin \theta_i)(A - B \cos 2\theta_i) - (-K_x^0 \sin \theta_i + K_y^0 \cos \theta_i) C \sin 2\theta \\ C_{i3} &= 2(K_x^0 \cos \theta_i + K_y^0 \sin \theta_i)(B \sin 2\theta_i) - 2(-K_x^0 \sin \theta_i + K_y^0 \cos \theta_i) C \cos 2\theta \end{aligned} \quad (2.30)$$

Na equação (2.30) A, B, e C são os coeficientes de calibração que podem ser determinados pelo método dos elementos finitos. Para determinar as três variáveis σ_{xx} , σ_{yy} e τ_{xy} na equação (2.29) são necessários três pares de pontos diametralmente opostos para determinar as três ordens de franjas relativas.

A vantagem mais evidente da interferometria holográfica clássica combinada com o método do furo incremental é que ela permite fazer as medições sem contacto. Este método tem também algumas limitações: é muito sensível a movimentos de corpo rígido, é difícil determinar com precisão o número de ordem de franjas fraccionárias devido à existência de *speckle* no holograma e a montagem óptica para a medição de deslocamentos no plano é bastante difícil de elaborar.

2.4.2.4 Método do furo com ESPI radial

O ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) é uma técnica óptica de interferometria de padrões de *speckle*. Nesta técnica recorre-se à aquisição da imagem dos padrões de franja *speckle* em vídeo e ao posterior processamento da imagem em computador, de forma a tornar as medições mais expeditas. A Figura 2.15 representa esquematicamente a partir dum diagrama de blocos um sistema genérico para medições com ESPI. No capítulo 3, esta técnica óptica será apresentada com alguma profundidade.

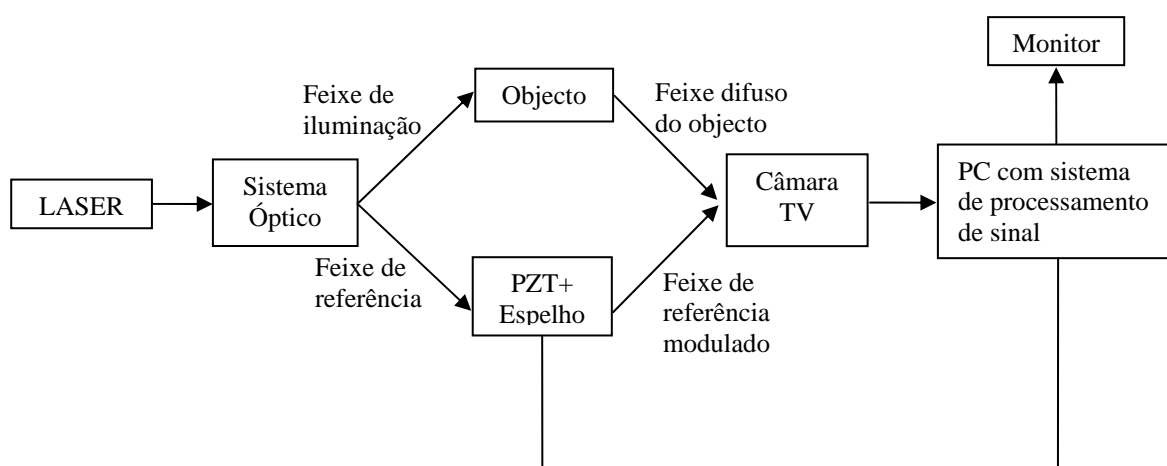


Figura 2.15 Diagrama de blocos para um sistema genérico de ESPI.

O ESPI convencional está especialmente adaptado para a medição dos deslocamentos fora do plano. Contudo, as tensões residuais ocorrem maioritariamente no plano, pelo que alguns autores desenvolveram montagens que permitem a medição no plano. Leendertz [57] desenvolveu um sistema que permite a medição numa direcção, mais tarde Jones e Leendertz [58] conceberam um interferómetro que permite a medição dos deslocamentos em direcções ortogonais, e que foi posteriormente melhorado por Moore e Tyrer [59]. O estudo destes interferómetros de medição no plano será descrito no capítulo 3 deste trabalho. As primeiras aplicações para a medição de tensões residuais utilizando o método do furo combinado com ESPI no plano foram feitas por Zhang [60]. Alguns anos mais tarde Díaz et al. [61] utilizaram esta técnica, integrada num processo automático de armazenamento de dados, e recorreram a métodos de processamento de imagem para obter o campo de deslocamentos após a execução do furo. Estes investigadores utilizaram as equações de Kirch [62] para determinar as tensões

residuais. Posteriormente Viotti e Kaufmann [63] determinaram a precisão e a sensibilidade deste sistema.

Albertazzi [64, 65] desenvolveu um interferómetro ESPI radial para medição de deslocamentos no plano que está especialmente adaptado a aplicações de medição de tensões residuais. Este interferómetro tem a vantagem de ser um sistema portátil, que permite a medição em todas as direcções e pode ser aplicado utilizando o método do furo ou outros métodos de medição de tensões residuais tais como a identificação [66] e aquecimento localizado [67]. No capítulo 3 faz-se um estudo mais aprofundado desta técnica.

2.4.2.5 Método do furo e a Interferometria de Moiré

O Moiré Interferométrico é um método óptico que fornece em tempo real uma cartografia de todo o campo de deslocamentos no plano. A elevada sensibilidade na medição dos deslocamentos e a elevada resolução espacial tornam-na numa técnica particularmente adaptada a um grande número de problemas de mecânica dos sólidos [68]. A utilização da Interferometria de Moiré, conjugada com o método do furo foi relatada pela primeira vez por MacDonach [69]. A técnica do furo passante foi utilizada para a medição de tensões residuais em soldaduras por Nicoletto [70] que desenvolveu uma solução analítica para este problema. No caso de furos cegos, Furgiuele [71] fez uma aproximação numérica incremental conjugada com alguns métodos ópticos incluindo a Interferometria de Moiré, embora não tenha realizado nenhuma experiência. A aplicação da Interferometria de Moiré para a medição de tensões residuais não uniformes em profundidade foi extensamente aplicada por Zhu [72, 73, 74, 75], Lu [72, 73, 74, 76], Bulhak [77] e mais recentemente Min [76], eles aplicaram este método associado à técnica do furo, e na maioria dos casos estudados utilizaram o método integral. Comparando com outros métodos, o método de Interferometria de Moiré, aplicado à técnica do furo, apresenta diversas vantagens. O furo pode ser feito por qualquer tipo de furadora e a deformação da superfície livre pode ser permanentemente registada. Por sua vez os padrões de franja de Moiré têm uma boa relação sinal-ruído. Os pontos de medida podem ser escolhidos muito próximos da fronteira do furo e o número de ordem das franjas, inteiros ou fraccionários, podem ser determinados com uma boa precisão. A elevada sensibilidade deste método permite estudar a distribuição das tensões residuais em profundidade. O Moiré Interferométrico permite aceder aos deslocamentos no plano e quando combinado com o interferómetro Twyman-Green, pode ser obtido todo o campo de deslocamentos, isto é, a três dimensões. Esta característica do método permite tratar também os problemas de tensões residuais não uniformes no plano. Estas vantagens potenciais deverão permitir ao método de Interferometria de Moiré e a técnica do furo encontrar um vasto campo de aplicações na medição de tensões residuais.

Uma das grandes vantagens das técnicas ópticas é o facto de terem uma grande quantidade de informação, contudo, grande parte desta informação não era devidamente aproveitada. Para colmatar esta insuficiência Baldi [78] desenvolveu um procedimento de cálculo automático em que pode ser aproveitada toda a informação do campo de deslocamentos obtido com as técnicas de ópticas de interferometria (ESPI e Moiré interferométrico).

Referências:

- [1] Heyn, E., *Internal Strains in Cold – wrought Metals and some Troubles Caused Theory*, J. Inst. Met., Vol. 1, 1914, pg. 3-37.
- [2] Mesnager, M., *Methodes de Determination des Tensions Existant dans un Cylindre Circulaire*, Comptes Rendus, Academie des Sciences, Vol. 169, 1919, pg. 1391.
- [3] Sachs, G., *Evidence of Residual Stresses in Rods and Tubes*, Zeitsch. Fur Metallkunde, Vol. 19, 1927, pg. 352.
- [4] Treuting, R. G. and Read, W. T., *A Mechanical Determination of Biaxial Residual Stress in Sheet Material*, J. Appl. Phys., Vol. 22, 1951, pg. 130.
- [5] Rosenthal, D. and Norton, J. T., *A Method of Measuring Triaxial Residual Stresses in Plates*, The Welding Journal, Vol. 24, 1945, pg. 295.
- [6] Rybicki, E. F. and Shadley, R. S., *A Three Dimensional Finite Element Evaluation of a Destructive Experiment Method for Determining Through Thickness Residual Stresses in Girth Welded Pipes*, J. Eng. Mater. Techn., Vol. 108, (4), 1986, pg. 99-106.
- [7] Ueda, Y. and Fukuda, K., *New Measuring Method of Three Dimensional Welding Residual Stresses Based on Newly Proposed Principle of Inherent Strain*, Naval Architecture and Engineering (Japan), Vol. 18, 1980, pg. 146-163.
- [8] Beiser, A., *Modern Physics: an introductory survey*, Addison-Wesley, London, 1968.
- [9] Lu, J. Edit, Editorial Board, James, M., Lu, J. and Roy, G., *Handbook of Measurement of Residual Stresses*, Published by the Fairmont Press, INC, 1996.
- [10] François, M. and Lebrun, J. L., *X-ray Stress Determination on Materials with Large Size Crystalites – Theoretical Approach*, Proc. 3rd European Conf. On Residual Stresses (ECRS3), Frankfurt, Germany, 4-6 Nov., 1992.
- [11] Warren, B. E., *X-ray Diffraction*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1969.
- [12] Masson, S., *Sci. Tech. Armement*, 46, 1972, pg. 1015.
- [13] Serryus, W., Van Houtte, P. and Aernoudt, E., *Residual Stresses in Science and Technology*, Ed. Macherauch, E., Hauk, V., DGM, Oberursel, 1987, pg. 417.
- [14] Allen, A. J., Hutchings, M. T., Windsor, C. G. and Andreani, C., *Neutron Diffraction Method for the Study of Residual Stress Fields*, Advanced Physics, 34 (4), July-Aug., 1985, pg. 445-473.
- [15] Pintschovius, L., Jung, V., Macherauch, E. and Vohringer, O., *Materials Science Engineering*, 61, 1983, pg. 43-50.
- [16] Allen, A. J., Bourke, M., Hutchings, M. T., Krawitz, M. T. and Windsor, C. G., *Residual Stresses in Science and Technology*, Edited by Macherauch, E., Hauk, and Jugomations, D., Gesellschaft Verlag, Oberursel, 1987.
- [17] Pao, Y.-H., Sachse, W. and Fukuoka, H., *Acoustoelastic Theory for Measurement of Residual Stresses*, Physical Acoustics, XVII, Edited by Mason, W. P. and W. P. Thurston, R. N., Jr., Academic Press, Boston, 1984, pg. 61-143.
- [18] Papadakis, E. P., *The Measurement of Ultrasonic Velocity in Physical Acoustics*, Vol. XIX, Edited by Thurston and Pierce, A. D., Academic Press, NY, 1990, pg. 81-106.
- [19] Titto, S. and Saynajakangas, S., *Spectral Damping in Barkhausen Noise*, IEEE Trans. Magn., 11, 1666, 1975.

- [20] Titto, S., *Magnetoelastic Testing of Biaxial Stresses*, Experimental Techniques, July/Aug., 1991, pg. 17-22.
- [21] Kashiwaya, K., Sakamoto, H., Inoue, Y., *Non-destructive Measuring Methode of Residual Stress Using Magnetic Sensors*, Proceedings of VI International Congress on Experimental Mechanics, 1988, pg. 30-35.
- [22] Buttle D J, *Emerging Technologies for In-situ Stress Surveys*, Proc. 6th Int. conf. on Residual Stresses (ICRS6), Oxford, UK, pub. IOM Communications, July 10-12, 2000, pg. 567-588.
- [23] Buttle, D., Dalzell, W. and Thayer, P., Early warnings of the onset of rolling contact fatigue by inspecting the residual stress environment of the railhead, *Insight*, Vol 46, No 6, June 2002, pg. 344-348.
- [24] Mathar, J., *Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation around Drilled Holes*, Trans. ASME, 56, 1934, pg. 249-254.
- [25] Soete, W., *Measurement and Relaxation of Residual Stress*, Sheet Met. Ind., No. 266, 1949, pg. 1269-1281.
- [26] Soete, W. and Vancrombrugge, R., *An Industrial Method for Determination of Residual Stress*, Proc. SESA, No. 1, 1950, pg. 17-18.
- [27] Kirsch, G., *Theory of Elasticity and Application in Strength of Materials*, Zeitschrift Vevein Deutscher Ingenieure, 42, No. 29, 1898, pg. 797-807.
- [28] Kelsey, R. A., *Measuring Non-Uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method*, Proc. SESA, No. 1, 1956, pg. 181-194.
- [29] Rendler, N. J. and Vigness, I., *Hole-Drilling Strain-Gage Method of Measuring Residual Stresses*, Experimental Mechanics, 6, No. 12, 1966, pg. 577-586.
- [30] Nickola, W. E., *A Practical Subsurface Residual Stress Evaluation by the Hole-Drilling Method*, Proc. 1986 SEM Spring Conf. on Exp. Mech., June 8-13, New Orleans, pg. 47-58, SEM, Bethel, CT (1986).
- [31] Schajer, G. S., *Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements*, J. Eng. Mater. Tech., 4, vol. 103, 1981, pg. 157-163.
- [32] Bijak-Zochowski, M., *A semi-destructive method of Measuring Residual Stresses*, 6 Internationale Konferenz Experimentelle Spannungsanalyse, Sept. 18-22, 1978, Munich, VDI Berichte, vol. 313, pg. 469-476.
- [33] Niku-Lari, A. Lu, J., Flavenot, J. F., *Measurement of Residual Stress Distribution by the Incremental Hole-Drilling*, Exp. Mech., vol. 25, No. 2, 1985, pg. 175-185.
- [34] Lu, J., Flavenot, J. F., *Trials in Increasing the Precision of the Incremental Hole-Drilling Method for Residual Stresses Distribution Determination*, Residual Stresses, in Science and Technology, Int. Conf. on Residual Stress 1986, Germany.
- [35] Lu, J. and Flavenot, J. F., *Applications of the Incremental Hole-Drilling Method for Measurements of Residual Stress Distribution*, Exp. Tech., vol. 13, No. 11, 1989, pg.18-24.
- [36] Flaman, M. T. and Manning, B. H., *Determination of Residual Stress Variation with Depth by the Hole-Drilling Method*, Exp. Mech., vol. 25, No. 3, 1985, pg. 205-207.

- [37] Schajer, G. S., *Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method, Part I – Stresses Calculation Procedures*, J. Eng. Mater. Technology, vol. 110, No. 4, 1988, pg. 338-343.
- [38] Schajer, G. S., *Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method, Part II – Practical Applications of the Integral Method*, J. Eng. Mater. Technology, vol. 110, No. 4, 1988, pg. 344-349.
- [39] Nobre, J. P., *Sobre o Comportamento Mecânico das Superfícies dos Materiais: - Estudo do Contacto no Impacto Elasto-Plástico; - Determinação do Estado de Tensões Residuais pela Técnica do Furo Incremental*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2000.
- [40] Nobre, J. P., Kornmeier, M., Dias, A. M., Scholtes, B., *Use of the Hole-drilling Method for Measuring Residual Stresses in Highly Stressed Shot-peened Surfaces*, Experimental Mechanics, 40 (3), 2000, pg. 289-297.
- [41] Nobre, J. P., Kornmeier, M., Gibmeier, J., Dias, A. M., Scholtes, B., *Plasticity Effect on Residual Stress Results Using different Hole-Drilling Evaluation Methods*, Proc. 6th International Conference on Residual Stresses (IRC6), Oxford, Eds., Vol. 2, IOM communications, 10-12 July, 2000, pg. 1188-1195.
- [42] Durelli, A. J., *Stress Analysis Research by Means of Brittle Coatings*, Armour Res. Found., 10, 1947, pg. 7-9.
- [43] Ellis, G., *Stress Determination by Brittle Coatings*, Mech. Eng., Vol. 69, No. 7, 1947, pg. 567-571.
- [44] Tokarcik, A. G. and Polzin, M. H., *Quantitative Evaluation of Residual Stresses by the Stress Coat Drilling Technique*, Proc. SESA, Vol. 9, No. 2, 1952, pg. 195-207.
- [45] Kuske, A. and Robertson, G., *Photoelastic Stress Analysis*, Wiley, New York, 1974.
- [46] Zandman, F., *Photoelastic-Coating Technique for Determining Stress Distribution in Welded Structures*, Weld. J. Res. Suppl., Vol. 39, No. 5, 1960, pg. 191-198.
- [47] Vest, C. M., *Holographic Interferometry*, J. Wiley and Sons, New York, 1979.
- [48] Hariharan, P., *Optical Holography*, Cambridge University Press, New York, 1984.
- [49] Steffens, H. D., Crostack, H. A., *Measurement of Residual Stresses in Spot Welded Joints*, International Conference Stresses in Welded Construction and Their Effects, Nov. 15-17, 1977, London, pg. 295-305, The Welding Institute, Abington, Cambridge, 1978.
- [50] Antonov, A. A., *Inspecting the level of Residual Stresses in Welded Joints by Laser Interferometry*, Weld. Prod., Vol. 30, No. 9, 1983, pg. 29-31.
- [51] Lobanov, L. M. et al., *A Procedure for Investigating Residual Welding Stresses Using Holographic Interferometry*, Autom. Weld., Vol. 36, No. 3, 1983, pg. 5-9.
- [52] Nelson, D. V. and McCrickerd, J. T., *Residual-Stress Determination Through Combined Use Holographic Interferometry and Blind Hole Drilling*, Exp. Mech., 26 (4), 1986, pg. 371-378.
- [53] Makino, A. and Nelson, D., *Residual Stress Determination by Single Axis Holographic Interferometry and Hole Drilling, Part I: Theory*, Exp. Mech., 1994 (3), pg. 66-78.

- [54] Nelson, D., Fuchs, E., Makino, A. and Williams, D., *Residual Stress Determination by Single Axis Holographic Interferometry and Hole Drilling, Part II: Experiments*, Exp. Mech., 1994 (3), pg. 79-88.
- [55] Makino, A. and Nelson, D., Fuchs, E., *Determination of Biaxial Residual Stresses by Holographic Hole-Drilling Technique*, J. Eng. Mat. Tech. (Trans. ASME), 118, 1996, pg. 583-588.
- [56] Nelson, D., Makino, A., *The Holographic-hole Drilling Method for Residual Stress Determination*, Optics and Lasers in Engineering, 27, 1997, pg. 3-23.
- [57] Leendertz, J. A., *Interferometric Displacement Measurement on Scattering Surfaces Utilizing Speckle Effect*, Journal of Physics E (Sci. Instrum), Vol. 3, 1970, pg. 214-218.
- [58] Jones, R., Leendertz, J. A., *Elastic constant and strain measurement using a three beam speckle pattern interferometer*, Journal of Physics E (Sci. Instrum), Vol. 7, 1974, pg. 653-657.
- [59] Moore, A. J., Tyrer, J. R., *Two-dimensional Strain Measurement with ESPI*, Optics and Lasers in Engineering, 24, 1996, pg. 381-402.
- [60] Zhang, J., *Two-dimensional in-plane electronic speckle pattern interferometry and its application to residual stress determination*, Optical Engineering, 37, 1998, pg. 2402-2409.
- [61] Diaz, F. V., A., Kaufmann, G. H., Galizzi, G. E., *Determination of residual stresses using drilling and digital speckle pattern interferometry with automated data analysis*, Opt. and Laser Engineering, 33, 2000, pg. 39-48.
- [62] Kabiri, M., *Toward more accurate residual stress measurement by the hole-drilling method: analysis of relieved-strain coefficients*, Experimental Mechanics, 26, 1986, pg. 14-24.
- [63] Viotti, M. R., A., Kaufmann, G. H., *Accuracy and sensitivity of a hole drilling and digital speckle pattern interferometry combined technique to measure residual stresses*, Opt. and Laser Engineering, 41, 2004, pg. 297-305.
- [64] Albertazzi, A., Borges, M., Kanda, C., *A radial in-plane interferometer for residual stresses measurement using ESPI*, in Proc. IX Int. Congress on Experimental Mechanics, 2000, pg. 108-111.
- [65] Albertazzi Jr., A., Kanda, C., Borges, M. R., Hrebabetzky, F., *Portable Residual Stresses Measurement Device Using ESPI and a Radial In-Plane Interferometer*, Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry, Albertazzi Jr., A., Eds., Proc. SPIE, 4420, 2001, pg. 112-122.
- [66] Sutério, R., Albertazzi, A., et al, *Residual stress measurement using indentation and a radial in-plane ESPI interferometer*, Eight International Symposium on Laser Metrology, In Pro. of SPIE on CD-ROM, Yucatan, 5776, 2005, pg. 735-745.
- [67] Viotti, M. R., Albertazzi, A., Kaufmann, G. H., *Measurement of residual stresses using a radial in-plane digital speckle pattern interferometer and local heating – recent advances*, Eight International Symposium on Laser Metrology, In Pro. of SPIE on CD-ROM, Yucatan, 5776, 2005, pg. 709-716.
- [68] Editado por Kobayashi, A. S., *Handbook on Experimental Mechanics*, Prentice-Hall, Inc., 1987.

- [69] McDonach, A., Mckelvie, J. MacKenzie, P. e Walker, C. A., *Improve Moiré Interferometry and Applications In Fracture Mechanics, Residual Stresses and Damage Composites*, Experimental Techniques, Vol. 7, No. 6, 1983, pg. 20-24.
- [70] Nicolletto, G., *Moiré Interferometry Determination of Residual Stresses in the Presence of gradients*, Exp. Mech., 31 (3), 1991, pg. 252-256.
- [71] Furgiuele, F. M., Pgnotta, L. e Poggialini, A., *Measuring Residual Stresses by Hole-Drilling and Coherent Optics Techniques: A Numerical Calibration*, J. Eng. Mater. Techno., Vol. 113, 1, 1991, pg. 41-50.
- [72] Wu, Z., Lu, J., and Joulaud, P., *Study of Residual Stress Distribution by Moiré Interferometry Incremental Hole Drilling Method*, The Fifth Int. Conf. on Residual Stresses, Linkoping, Sweden, 1997.
- [73] Wu, Z., Lu, J., Han, B., *Study of residual stress distribution by a combined method of moiré interferometry and incremental hole-drilling—part II, implementation*, J Appl Mech; 65 (9), 1998.
- [74] Wu, Z., Lu, J., Joulaud, P., Han, B., *Study of residual stress distribution by a combined method of moiré interferometry and incremental hole-drilling—part I, theory*, J Appl Mech; 65 (9), 1998.
- [75] Wu, Z., *Détermination des contraintes résiduelles par interférométrie de Moiré et méthode de perçage du trou incrémental*, Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur, Université de Technologie de Troyes, Troyes, 1998.
- [76] Min, Y., Hong, M., Xi, Z., Lu, J., *Determination of residual stress by use of phase shifting moiré interferometry and hole-drilling method*, Optics and Lasers in Engineering, 44, 2006, pg. 68-79.
- [77] Bulhak, J., *Interférométrie Différentielle sur Réseau: Nouvelle Méthode Optique de Mesure de Déformations avec Grande Résolution Spatiale*, Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur, Université Jean Monnet – Saint Étienne, 2001.
- [78] Baldi, A., *A new analytical approach for hole drilling residual stress analysis by full field method*, J. Eng. Mat. Tech., 127, 2005, pg. 165-169.

CAPÍTULO 3

TÉCNICAS ÓPTICAS PARA MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS NO PLANO

3 TÉCNICAS ÓPTICAS PARA MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS NO PLANO

3.1 Introdução

Em muitos problemas de mecânica é necessário medir campos de deslocamentos no plano. Como exemplos poderiam referir-se os casos que necessitam da obtenção de tensões numa dada região dum componente (problemas de mecânica da fractura, de juntas adesivas, etc.) ou a caracterização do comportamento dum superfície (tensões residuais). As técnicas mais adaptadas para a medição de deslocamentos no plano são as técnicas ópticas. Nestas técnicas os resultados resultam de uma comparação entre o estado não deformado e deformado do componente. Para ser possível realizar esta comparação é necessário que existam pontos de referência, que permitam caracterizar a deformação ou movimento da superfície da estrutura ou componente em estudo. Estas referências podem ser criadas sobre a superfície ou resultar da própria textura desta. As referências criadas sobre a superfície podem ser de três tipos: redes de linhas paralelas, redes de linhas cruzadas e redes de pontos. As redes de linhas paralelas permitem a medição dos deslocamentos na direcção perpendicular à das linhas, a sensibilidade e resolução do método depende do passo da rede, quanto mais pequeno for este maior será a sensibilidade e resolução. Com passos maiores é possível medir grandes deslocamentos utilizando luz branca, com passos mais pequenos (frequência espacial superior a 40 linhas/mm) é necessário utilizar luz monocromática, quando o passo da rede for superior a 100 linhas/mm os problemas de difracção que advêm dessa elevada frequência obrigam à utilização de luz coerente, laser. As redes de linhas cruzadas permitem a medição de deslocamentos em duas direcções ortogonais, perpendiculares às direcções das linhas. A sensibilidade do método, tal como nas linhas paralelas, depende do passo ou frequência da rede. Redes de pontos, aleatoriamente distribuídos, permitem a medição dos deslocamentos em n direcções diferentes, a sua sensibilidade e resolução depende, também, do espaçamento entre os pontos. As referências usadas a partir da textura da superfície podem dividir-se em dois grandes grupos: macro referências (cortiça, granito), micro referências neste caso usa-se a rugosidade, microscópica, da superfície como referência. As referências macroscópicas só permitem a medição de grandes deslocamentos, pois utilizam-se como referências elementos de elevadas dimensões, uma técnica óptica que utiliza estas referências é a correlação de imagem. As técnicas que utilizam a rugosidade das superfícies como referência para a medição de deslocamentos no plano, podem fazê-lo numa, duas ou n direcções. Nestas técnicas as superfícies a medir devem ser iluminadas por uma fonte de luz coerente, a sensibilidade e resolução deste método são muito elevadas e dependem do comprimento de onda da radiação utilizada para iluminar o objecto. Para medição do deslocamento do plano numa direcção, a superfície é iluminada por dois feixes que fazem um ângulo igual com a direcção perpendicular ao plano. A medição é feita no plano, mas a direcção da medição é definida pela intercepção do plano formado pelos dois feixes com o plano da superfície. Embora também seja possível utilizar uma direcção de iluminação e duas de observação esta técnica é menos utilizada pois implica a utilização de duas câmaras. Na medição em duas

direcções o procedimento é similar ao que foi descrito para uma direcção mas duplicado. Neste caso podem utilizar-se quatro feixes, perpendiculares dois a dois, as duas direcções são determinadas pela intercepção dos dois planos definidos pelos feixes com o plano da superfície. A medição de deslocamentos no plano segundo todas as direcções pode ser realizada utilizando um espelho cónico num interferómetro apresentado pela primeira vez por Albertazi [1].

3.2 Técnicas de Moiré

A palavra Moiré deriva do termo francês que significa seda molhada ou então padrões de franjas produzidos pela interferência de fibras alinhadas em tecidos finos. Na Engenharia, Moiré refere-se a uma técnica de análise experimental para a determinação de deslocamentos ou deformações a partir de um conjunto de franjas de interferência resultantes da sobreposição de duas redes – uma no provete e outra indeformada que é usada como referência.

3.2.1 Moiré Geométrico

O efeito de Moiré resulta da interferência geométrica entre duas ou mais redes de amplitude quando estas são sobrepostas. Os padrões de linhas mais largas e escuras que são observadas são designados por franjas de Moiré, resultam do batimento entre as duas redes, e estão relacionadas com a deformação do objecto [2].

Numa análise superficial do efeito de Moiré pode verificar-se que este tem uma característica intrínseca notável e muito útil: um grande deslocamento no padrão de franjas de Moiré pode ser provocado por um pequeno movimento relativo entre duas redes sobrepostas. Isto significa que os padrões de franjas de Moiré são uma espécie de “amplificador de movimento”, as quais podem ser utilizadas na medição, com elevada sensibilidade, de movimentos relativos. Esta ideia foi descrita por D. Tollenar em 1945, e foi imediatamente aplicada no estudo da deformação e do movimento por vários investigadores incluindo Weller e Shepard em 1948 e Dantu em 1954 [3]. Posteriormente, o método foi refinado e utilizado em diversas aplicações [4, 5, 6, 7, 8]. Este método pode ser aplicado para a determinação precisa de movimentos de translação e rotação e ainda na medição de deformações.

3.2.1.1 Oclusão por sobreposição de redes: descrição paramétrica

Considerando a utilização de redes de linhas (também designadas por grelhas), obtêm-se franjas quando se sobrepõem dois conjuntos de rectas equidistantes com passos diferentes, designados por p e q . Este padrão poderá ser ainda alterado se os dois conjuntos de rectas sobrepostas forem rodadas de uma rotação θ . A Figura 3.1 mostra as duas redes e a formação das franjas de Moiré devidas a estes dois efeitos.

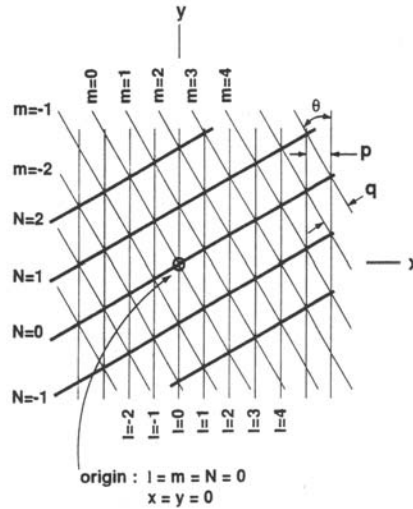


Figura 3.1 Formação de franjas de Moiré por sobreposição de grelhas com passos e orientações diferentes [2].

As relações matemáticas entre os parâmetros das grelhas e a geometria das franjas de Moiré são estabelecidas através da aplicação de uma análise geométrica elementar. As linhas da grelha vertical podem ser descritas pela equação:

$$x = lp \tag{3.1}$$

onde l é um inteiro e p o passo da grelha. A segunda rede, inclinada relativamente à primeira, é expressa pela equação:

$$x \cos \theta = mq - y \sin \theta$$

ou

$$x = \frac{mq}{\cos \theta} - y \tan \theta$$

a qual se converte em

$$m = \frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{q} \tag{3.2}$$

onde m é um inteiro e q é o passo da rede inclinada.

A franja de Moiré ou linha de intersecção que passa na origem é considerada como franja de ordem zero ($N = 0$). Analisando a Figura 3.1 pode observar-se que ao longo da franja de ordem zero ocorre a intersecção das linhas da grelha com a mesma ordem, $l = m$.

Considerando agora a franja adjacente, classificada como de ordem um. Verifica-se que ao longo desta franja, todas as intersecções correspondem a $m - l = 1$. Continuando com este processo pode definir-se uma equação geral para o número de ordem das franjas, que para este caso será:

$$m - l = N \tag{3.3}$$

onde N é um inteiro denominado como o número de ordem da franja.

As expressões para o espaçamento e inclinação das franjas de Moiré, em termos de diferenças de passo ou orientação das duas redes de linhas, são desenvolvidos substituindo as equações (3.1) e (3.2) na equação (3.3), de onde se obtém:

$$\frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{q} - \frac{x}{p} = N$$

$$\frac{(p \cos \theta - q)x + py \sin \theta}{pq} = N \quad (3.4)$$

Ao longo de uma dada ordem da franja Moiré, N é constante. Esta constatação permite a definição da franja de Moiré como o local de pontos para o qual o primeiro membro da equação (3.4) é uma constante. A relação linear só é verdadeira se a rotação relativa se mantiver pequena, isto é;

$$(p - q)x + p\theta y = Npq \quad (3.5)$$

Dividindo a equação (3.5) por p obtém-se,

$$\left(\frac{p - q}{p} \right) x + \theta y = Nq \quad (3.6)$$

Supondo que uma das grelhas foi gravada na superfície de um sólido deformável e as duas grelhas eram inicialmente idênticas com passo p , se ocorrer uma deformação no sólido o passo da rede que lhe foi gravada sofre uma alteração. Dividindo a diferença entre o valor do passo original e novo passo pelo seu valor inicial, pode determinar-se a deformação normal ao longo do eixo x original; isto é,

$$\frac{p - q}{p} = \frac{\text{Variação do Comprimento}}{\text{Comprimento Inicial}} = \varepsilon_x \quad (3.7)$$

Com este resultado a equação (3.6) pode ser expressa através de

$$\varepsilon_x x + \theta y = Nq \quad (3.8)$$

As equações precedentes implicam que ordem da franja de Moiré depende do passo inicial das grelhas, da sua posição inicial relativa e da orientação. Se algum deles, passo inicial, orientação relativa ou posição relativa é modificado, então a forma das franjas de Moiré será alterada. Este deslocamento da franja pode ser utilizado para medir a variação do passo (deformação), variação da posição relativa (translação), ou a variação da orientação relativa (rotação).

3.2.1.2 Franjas de Moiré – deslocamentos e deformações

Em seguida será analisada a forma como o efeito de Moiré é utilizado na análise da deformação em corpos deformáveis recorrendo à equação (3.8) que contém o termo de

deformação. Uma outra alternativa muito utilizada na relação ordem da franja/deformação foi desenvolvida por Dally e Riley [3] bem como Theocaris [8].

A representação esquemática indicada na Figura 3.2 mostra, na secção transversal, a passagem da luz através da rede do provete deformado e da rede de referência (não deformada). Em algumas regiões a luz é bloqueada, originando franjas de Moiré.

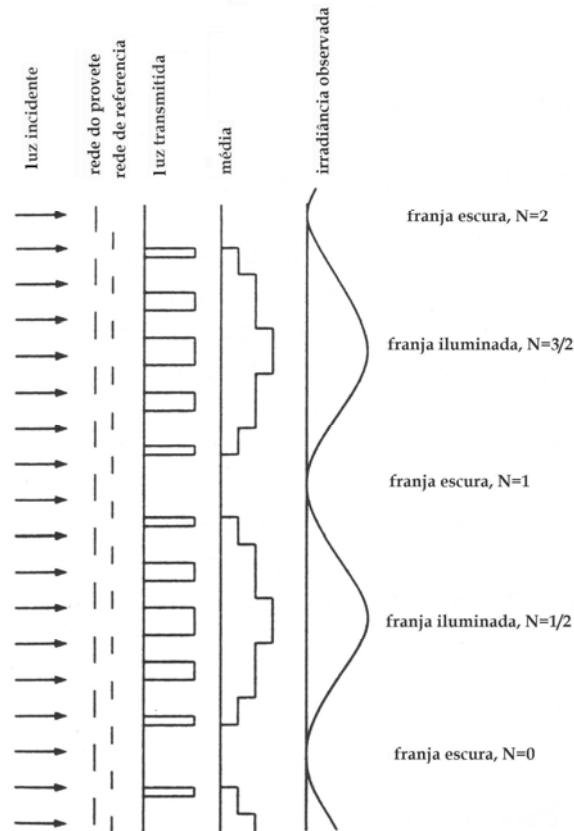


Figura 3.2 Formação dum padrão de franjas de Moiré a partir da luz que atravessa duas filas de linhas paralelas com um ligeiro desfasamento entre elas.

Da análise da Figura 3.2 pode observar-se que surge uma banda escura por cada seis linhas da rede no provete que foi estirado. Esta banda, franja de Moiré, surge devido ao preenchimento do espaço entre duas linhas da rede de referência por cada sete linhas da rede (não deformada). As franjas de Moiré são numeradas sequencialmente a partir de qualquer uma delas. Desta forma o deslocamento relativo entre o provete e a rede de referência pode ser calculado através da seguinte expressão,

$$u_x = Np \tag{3.9}$$

Onde

- N é o número de ordem da franja
- p é o passo da rede de referência
- u_x é o deslocamento na componente x

Utilizando a relação deformação-deslocamento de primeira ordem definida na elasticidade dos materiais,

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}$$

Combinando as duas equações precedentes obtém-se

$$\varepsilon_x = \frac{\partial(Np)}{\partial x}$$

Como p é constante, então será;

$$\varepsilon_x = p \frac{\partial N}{\partial x} \quad (3.10)$$

As equações (3.8) e (3.10) são duas representações diferentes da mesma quantidade. Quando a equação (3.7) foi reescrita, os passos foram implicitamente assumidos como constantes, o que implica que $\partial n / \partial x = n / x$. Por outras palavras, a equação (3.8) é estritamente aplicável no caso de campos de deformação uniformes, embora possa ser estendida a campos não uniformes. Deve lembrar-se que a rotação relativa foi considerada como zero no desenvolvimento da equação (3.10).

As equações desenvolvidas anteriormente permitem fazer afirmações claras em relação ao significado das franjas de Moiré no contexto da análise de deformações. Ignorando, para já, a contribuição da rotação, estudo a desenvolver posteriormente neste trabalho. Uma franja de Moiré é o local em que o valor do deslocamento é constante. A direcção dos deslocamentos medidos é normal à direcção da rede.

Da análise anterior verifica-se que a deformação na vizinhança dum ponto é proporcional ao espaçamento das franjas de Moiré próximas desse ponto. Finalmente, para determinar a deformação é necessário calcular uma derivada na direcção do deslocamento (normal à direcção das linhas da rede).

3.2.1.3 Análise da deformação

A Figura 3.3 ilustra os passos para a medição de deformações normais à rede pela técnica de Moiré. Um provete deformável com uma rede de Moiré colada na sua superfície é carregado de modo a provocar uma deformação no plano da figura. Se for sobreposta uma rede de referência (não deformada) são criadas franjas de Moiré, como se pode observar na Figura 3.3a. Para obter a deformação calcula-se a derivada do número de ordem das franjas de Moiré. Existe um conjunto de técnicas que podem ser aplicadas para executar estas tarefas, e muitos deles estão descritos na literatura sobre a análise de deformações com Moiré [2, 9, 10, 11].

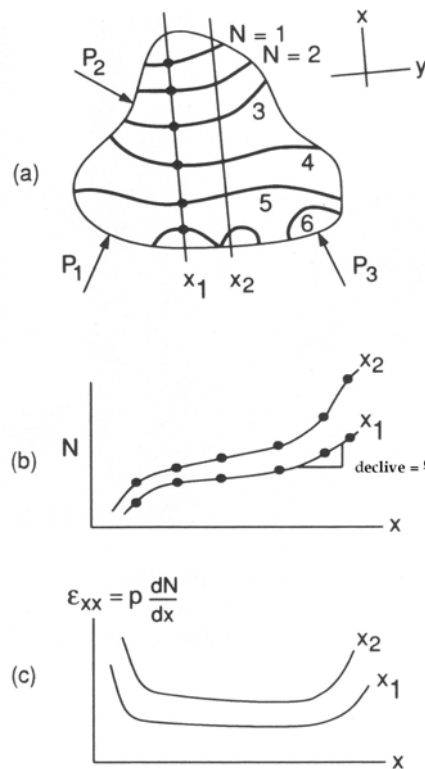


Figura 3.3 Procedimento para a análise de deformações com Moiré: (a) imagem do modelo carregado com franjas de Moiré; (b) representação gráfica do número de ordem das franjas de Moiré ao longo dos eixos x_1 e x_2 no modelo; (c) representação gráfica da deformação ϵ_{xx} ao longo dos eixos x_1 e x_2 .

Os passos finais no processo de determinação das deformações podem ser problemáticos devido às dificuldades na diferenciação de dados experimentais. Contudo, observe-se que o número de ordem das franjas N pode ser representado graficamente em função das coordenadas de posição de cada franja ao longo de eixos específicos, cuja direcção é normal à da rede, como se mostra na Figura 3.3b. As inclinações desta curva podem ser avaliadas ponto por ponto e o resultado representado graficamente. Quando estes valores são multiplicados pelo passo da rede usada obtém-se um gráfico da deformação ao longo dos eixos escolhidos (Figura 3.3c). Com um número de eixos suficientemente elevado é possível obter-se um mapa da distribuição das deformações, segundo uma direcção normal à da rede, que cobre todo o campo analisado.

3.2.1.4 Análise de campos de deformação bi-dimensionais

No ponto anterior foi descrita a técnica de Moiré para a medição da deformação normal ao longo de eixos especificados num corpo plano. Esta ideia básica pode ser estendida para a determinação completa do estado de deformação em todo o campo bi-dimensional. Relembrando que nos problemas de elasticidade existem três componentes de deformação desconhecidos (ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{xy}) para cada ponto no plano. Nesta fase, não é necessário distinguir entre “estado plano de tensão”, “estado plano de deformação” e “estado plano generalizado”. No entanto uma análise completa para um poderá, requerer a terceira deformação normal (ϵ_{zz}).

A componente do deslocamento para uma dada direcção pode ser medida orientando a rede de Moiré (referência e no modelo) de tal forma que as suas linhas se encontrem orientadas perpendicularmente à direcção do deslocamento a medir. Isto é, para medir um deslocamento segundo x (u_x), as grelhas devem estar paralelas com o eixo Y . As duas componentes do deslocamento, u_x e u_y , podem ser obtidas a partir de dois ensaios de Moiré separados. É obtido um padrão de franjas com as redes na direcção X , e o outro resulta da sobreposição das redes orientadas na direcção Y .

Conhecendo todos os valores de u_x e u_y , as três componentes da deformação no plano podem ser estabelecidas através das equações deformação-deslocamento,

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u_x}{\partial x} = p \frac{\partial N_x}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial u_y}{\partial y} = p \frac{\partial N_y}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} = p \left(\frac{\partial N_y}{\partial x} + \frac{\partial N_x}{\partial y} \right)\end{aligned}\tag{3.11}$$

Onde p representa o passo das redes X e Y , N_x e N_y representam os números de ordem da franja de Moiré obtido com as redes dispostas na direcção de y e x , respectivamente.

As derivadas do número de ordem das franjas de Moiré relativamente às coordenadas espaciais podem ser avaliadas de diferentes formas, incluindo o procedimento gráfico já discutido para o caso uniaxial.

Uma aproximação muito prática para análise das deformações de Moiré bi-dimensionais é a obtenção das três componentes normais da deformação directamente a partir de três diferentes orientações da rede [12]. Desta forma os potenciais erros na deformação de corte, causados pela rotação relativa entre a rede de referência e a do provete, são automaticamente eliminados. Este procedimento é análogo à utilização de rosetas com três extensómetros. As três leituras da deformação normal, descrevem completamente o estado de deformação dum ponto. Para determinação das três componentes são usadas as relações de transformação da deformação por rotação. Podem determinar-se também os valores principais, a máxima deformação de corte, ou distorção, ou as deformações, normal e de corte, num sistema de coordenadas arbitrário.

Outra abordagem frequentemente utilizada, recorre a diferentes arranjos de linhas paralelas para a obtenção das diferentes componentes do deslocamento. São utilizados arranjos de pontos ou linhas cruzadas para o modelo e a referência. O padrão de franjas de Moiré é formado por duas famílias de franjas originadas a partir duma rede ortogonal. Desta forma as duas componentes do deslocamento podem ser determinadas recorrendo a uma única imagem. Um exemplo deste resultado está representado na figura 3.4 e foi publicada por Post [6]. Uma dificuldade com estes padrões de franja, muito importante na proximidade de regiões de concentração de tensões, é a correcta separação das duas famílias de franjas para a posterior análise dos resultados.

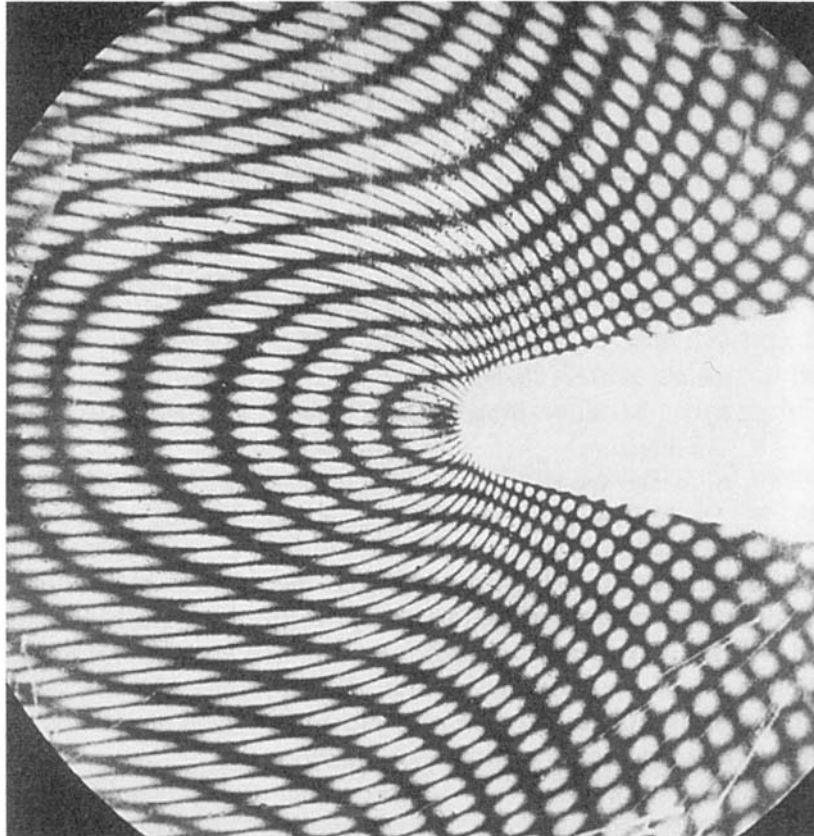


Figura 3.4 Obtenção de padrões de franja de Moiré usando redes bi-direccionais. Deslocamentos ortogonais podem ser determinados [2].

Post [6] demonstrou existir vantagem na utilização de redes de referência ortogonais para a obtenção das componentes dos deslocamentos. Se as linhas da rede de referência estão perfeitamente perpendiculares e se as derivadas são determinadas com precisão, então os efeitos da rotação nos termos das derivadas cruzadas da equação que permite obter a deformação de corte a partir dos deslocamento são cancelados. Desta forma as deformações de corte podem ser determinadas com precisão sem utilizar a terceira deformação normal.

3.2.1.5 Sensibilidade do Moiré geométrico

A maior dificuldade na utilização desta técnica é a obtenção e colagem de grelhas com uma resolução suficientemente fina que permita medir as deformações que ocorrem no regime elástico em materiais com um módulo de elasticidade muito elevado, como é o caso dos metais.

O passo da rede requerido para uma dada sensibilidade de deformação é facilmente calculado. Se for ε_x a menor deformação a medir e h o máximo espaçamento entre franjas possível o passo da grelha requerido é p , sendo $1/p$ a densidade da rede ou frequência espacial. É habitual especificar a frequência espacial da rede em vez do passo. Utilizando as equações desenvolvidas anteriormente podem relacionar-se estes parâmetros da seguinte forma;

$$\frac{\partial N}{\partial x} = \frac{1}{h}$$

$$\varepsilon_s = \frac{P}{h} \quad (3.12)$$

Como exemplo pode considerar-se $\varepsilon_s = 5 \times 10^{-5}$ um valor de sensibilidade aceitável para medir a deformação elástica de metais.

É difícil a obtenção e aplicação de redes com densidades elevadas, necessárias para a análise de pequenas deformações. Uma solução óbvia consiste na modificação da técnica de forma que permita a utilização de redes com densidades mais baixas. Algumas destas técnicas alternativas são:

Utilização de materiais de baixo módulo. Utilizar modelos para medir com Moiré que podem ser feitos com materiais de baixo módulo, como os polímeros ou os elastómeros. As deformações serão maiores e aumenta o valor mínimo aceitável da deformação medida (ε_s). A escala das deformações do modelo para o protótipo segue as mesmas leis da semelhança que foram desenvolvidas para outras técnicas como, por exemplo, a fotoelasticidade. Contudo as deformações não deverão ser tão elevadas que possam provocar a modificação da geometria do modelo.

Medição de ordens de franja fraccionárias. Este procedimento aumenta o número de pontos medidos, o que permite o aumento do espaçamento entre franjas máximo aceitável (h). Um exame cuidadoso das leis da óptica para a análise de Moiré sugere que estas ordens fraccionárias podem ser estabelecidas pela medição da intensidade luminosa. Sciamarella [12] propôs esta técnica fazendo uma análise bastante pormenorizada da sua aplicação. Mais recentemente, outros autores, tais como Voloshin [13] e McKelvie [14], recuperaram esta técnica mas com recurso a meios informáticos (processamento de imagem) e com resultados bastante promissores.

Multiplificação de Franjas. As técnicas de multiplificação de franjas são uma outra forma de aumentar o espaçamento máximo aceitável entre franjas de maneira a reduzir o passo da rede. Estes métodos tornaram-se importantes com o desenvolvimento do laser e o aumento da compreensão do processamento dos valores medidos. Esta técnica permite, por exemplo, a utilização de redes com menos de 20 linhas/mm e obter sensibilidades equivalentes às alcançadas com centenas de linhas/mm [2].

Interferometria de Moiré. Esta técnica permite a máxima sensibilidade em medições com técnicas de Moiré. As aplicações desta técnica permitem medições de deformações muito pequenas, usuais em materiais cerâmicos e metálicos. A resolução poderá ser equivalente à obtida com recurso a técnicas de interferometria holográfica.

Como conclusão pode afirmar-se que a técnica de Moiré geométrico é apropriada para materiais de baixo módulo de elasticidade tais como, tecidos, madeira, elastómeros e alguns polímeros. É também utilizada para o estudo de metais que sofram deformações no domínio plástico.

3.2.1.6 Efeitos da utilização de passos diferentes

A diferença do passo entre as redes do modelo e de referência provoca franjas de Moiré, mesmo que o modelo não sofra qualquer carregamento. Estas franjas aparecem normalmente

como um padrão inicial de franjas que contribui para o aumento do erro se não for eliminado na análise de dados. Por outro lado, o efeito de passos diferentes pode trazer vantagens sendo utilizado como um meio para aumentar as capacidades da técnica de Moiré.



Figura 3.5 Exemplo dum padrão de franjas de Moiré geométrico num corpo deformado: (a) sem variação do passo; (b) com uma pequena diferença de passo.

Para uma clara compreensão do efeito obtido com a utilização de redes com passos diferentes pode recorrer-se à equação (3.6). Neste caso será considerado que:

$$\theta = 0$$

p é o passo original para a rede do modelo, q é o passo da rede de referência e δp a variação do passo p provocada pela deformação.

Então, neste caso, a equação (3.6) pode ser convertida.

$$\left(\frac{p + \delta p - q}{p} \right) x = Nq \quad (3.13)$$

$$\left(\frac{p - q}{p} \right) x + \left(\frac{\delta p}{p} \right) x = Nq \quad (3.14)$$

Considerando ainda que,

$$\frac{p - q}{p} = \rho = \text{razão da diferença} \quad (3.15)$$

e notando que

$$\frac{\delta p}{p} = \varepsilon_x$$

Obtém-se para a equação (3.13) a seguinte forma reduzida:

$$\rho x + \varepsilon_x x = Nq$$

ou ainda, numa forma mais simples;

$$\varepsilon_x = \frac{Nq}{x} - \rho \quad (3.16)$$

Este resultado pode ser reescrito em termos do gradiente do número de ordem das franjas de Moiré, conduzindo à seguinte expressão

$$\varepsilon_x = q \frac{\partial N}{\partial x} - \rho \quad (3.17)$$

A equação (3.17) mostra como se pode eliminar o efeito da diferença de passos inicial. A razão da diferença de passos ρ é essencialmente o espaçamento das franjas de Moiré do padrão inicial observado antes do carregamento do modelo. Por outras palavras,

$$\rho x = N_i = \text{número de ordem da franja inicial} \quad (3.18)$$

Uma diferença de passos inicial pode ser utilizada para aumentar o número de franjas na medição com Moiré. Um aumento do número de ordem das franjas pode, por vezes, simplificar a localização e a contabilização das franjas. Estes padrões facilitam a determinação das derivadas espaciais e do número de ordem das franjas. Esta ideia pode ser especialmente útil quando os gradientes de deformação são pequenos e as franjas estão muito espaçadas.

É importante enfatizar que a diferença de passos não aumenta a sensibilidade do processo de medição com Moiré. A sensibilidade é controlada pelo passo da rede utilizada na medição. A diferença de passos é um processo auxiliar, permite o aumento do número de pontos analisados; facilita a interpolação dos padrões de franja.

3.2.2 Moiré Interferométrico

O Moiré interferométrico conjuga os conceitos do Moiré geométrico com os das técnicas baseadas na interferometria óptica. Guild [16] demonstrou que todos os fenómenos de Moiré podem ser tratados como casos de interferências ópticas se bem que as franjas de Moiré geradas por redes de baixa frequência possam, também, ser explicadas recorrendo à geometria. Em 1966, Dally e Riley [3] previram que quando surgissem as redes de alta qualidade, com 400 a 1200 linhas por milímetro, o método de Moiré seria largamente aplicado na análise experimental de campos de deformação. Nos anos 70 do século passado, com o desenvolvimento da interferometria laser, foi possível obter redes holográficas de elevada frequência. Nessa altura a frequência destas redes podia ir de 1000 até 5000 linhas por milímetro. Nos anos 80 e 90 foram desenvolvidas outras técnicas que foram também utilizadas na fabricação de redes para aplicações específicas.

A interferometria de Moiré permite aceder em tempo real aos campos de deslocamentos no plano com uma elevada sensibilidade e uma excelente resolução espacial. A aplicação desta técnica cobre actualmente vários domínios tais como: mecânica da fractura, estudo de materiais compósitos, inspeção de componentes electrónicos, etc. [10].

3.2.2.1 Princípios da interferometria de Moiré

3.2.2.1.1 Planos de interferência (*walls of interference*)

Para se compreender a realização de uma medição por Moiré interferométrico é necessário conhecer alguns conceitos associados a interferência entre frentes de onda coerentes. Para isso comece-se por analisar a interferência entre frentes de onda planas. Quando dois feixes de luz coerente se propagam no espaço com frentes de onda planas, 1 e 2 na figura 3.6 e se encontram com um ângulo de intercepção 2θ , as frentes de onda (w_1 e w_2), perpendiculares às direcções de propagação, formam um ângulo 2θ entre si (Figura 3.6). As amplitudes A_1 e A_2 são idênticas e podem denominar-se como a sendo o comprimento de onda dos dois feixes λ . Como se pode ver na Figura 3.6 as frentes de onda w_1 e w_2 sobrepõem-se e, tratando-se de radiações coerentes interferem entre si. Por conseguinte, estão reunidas todas as condições para a formação de franjas de interferências construtivas e destrutivas.

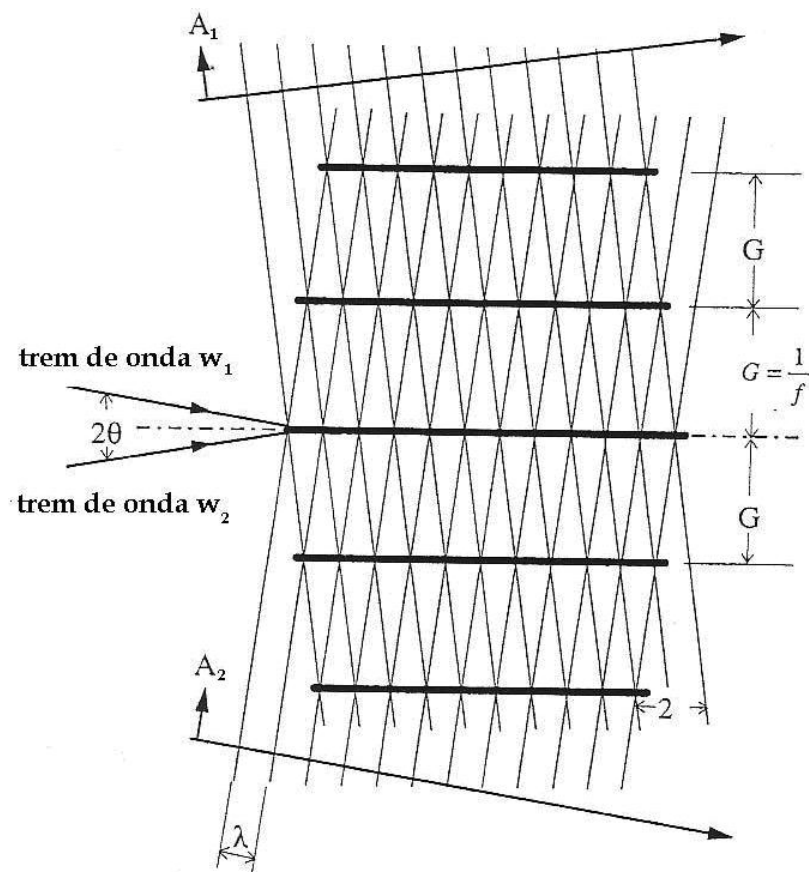


Figura 3.6 Representação esquemática do princípio da interferometria entre duas ondas planas coerentes.

Devido às interferências construtivas e destrutivas entre as duas ondas, as franjas aparecem separadamente com um intervalo G . Analisando a figura 3.6 verifica-se que esse espaçamento pode ser obtido a partir de,

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{2G} \qquad f = \frac{2}{\lambda} \sin \theta \qquad (3.19)$$

Onde $f = \frac{1}{G}$ é denominado por frequência ou gradiente de franja. Desta forma verifica-se que sobrepondo frentes de onda plana e coerentes convenientemente orientadas entre si é possível gerar redes de franjas por redistribuição espacial da energia motivada por fenómenos de interferência. Esta técnica é utilizada no Moiré interferométrico para gerar redes de referência.

3.2.2.1.2 Redes de difracção

Na interferometria de Moiré utilizam-se redes de difracção na codificação das superfícies a medir. Elas podem ser classificadas como redes de amplitude e redes de fase. Uma rede de amplitude é formada por um conjunto de barras opacas e espaços transparentes ou barras reflectoras e espaços opacos. Nas redes de fase a superfície é estriada com perfis, que podem ou não ser simétricos. As redes de linhas cruzadas têm o mesmo tipo de arranjo de barras e de estrias mas segundo duas direcções ortogonais (Figura 3.7).

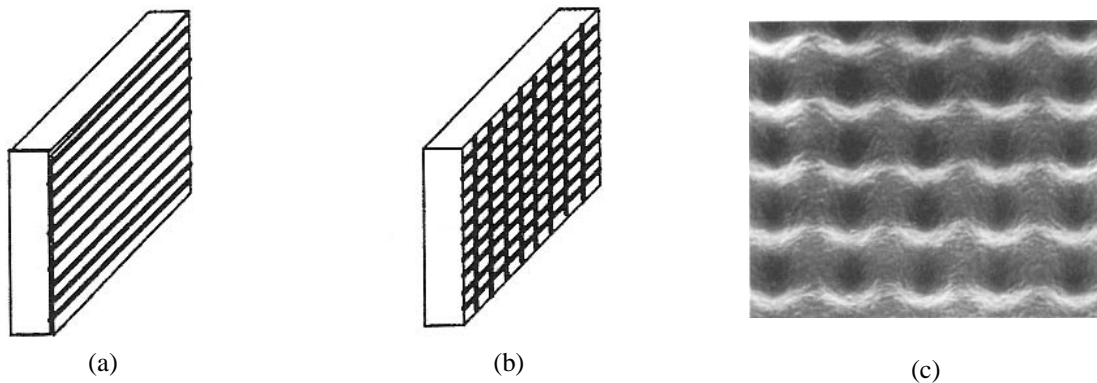


Figura 3.7 Representação esquemática de redes de difracção: (a) linhas paralelas; (b) linhas cruzadas; (c) imagem SEM da superfície duma rede de fase com linhas cruzadas (1200 l/mm) [10].

A iluminação de uma destas redes por uma frente de onda plana provoca a divisão da radiação incidente em múltiplas frentes de onda reflectidas, ou transmitidas que são geradas por difracção. Estas redes são, por isso, designadas por redes de difracção. As direcções de difracção obedecem à equação da difracção de redes,

$$\sin \beta_m = \sin \alpha + m\lambda f_s \quad (3.20)$$

Onde m é o número de ordem da difracção, f_s é a frequência da rede do provete, α é o ângulo de incidência e β_m é o ângulo da $m^{\text{ésima}}$ ordem de difracção.

No Moiré geométrico, a frequência da rede f é geralmente inferior a 100 l/mm. O termo λf da equação (3.20) é muito pequeno e por conseguinte $\beta_m \approx \alpha$. Isso indica que a ordem de difracção não pode ser dividida. Em contrapartida, a frequência f_s da rede utilizada na interferometria de Moiré é frequentemente de 1200 l/mm e, por conseguinte, as diferentes ordens de difracção estão separadas por grandes ângulos de difracção.

3.2.2.1.3 Relações de base da interferometria de Moiré

Em Mecânica Experimental as redes de alta frequência podem ser utilizadas para a medição de deslocamentos no plano. Esta técnica é denominada de Moiré interferométrico e utiliza uma rede de alta frequência replicada na superfície do provete para a codificar. Quando é aplicada uma carga ao provete, a rede deforma-se com ele podendo essa deformação ser medida por um sistema de interferometria óptico (Figura 3.8). Para descodificar a informação contida na deformação da rede é utilizada uma rede semelhante que não foi deformada.

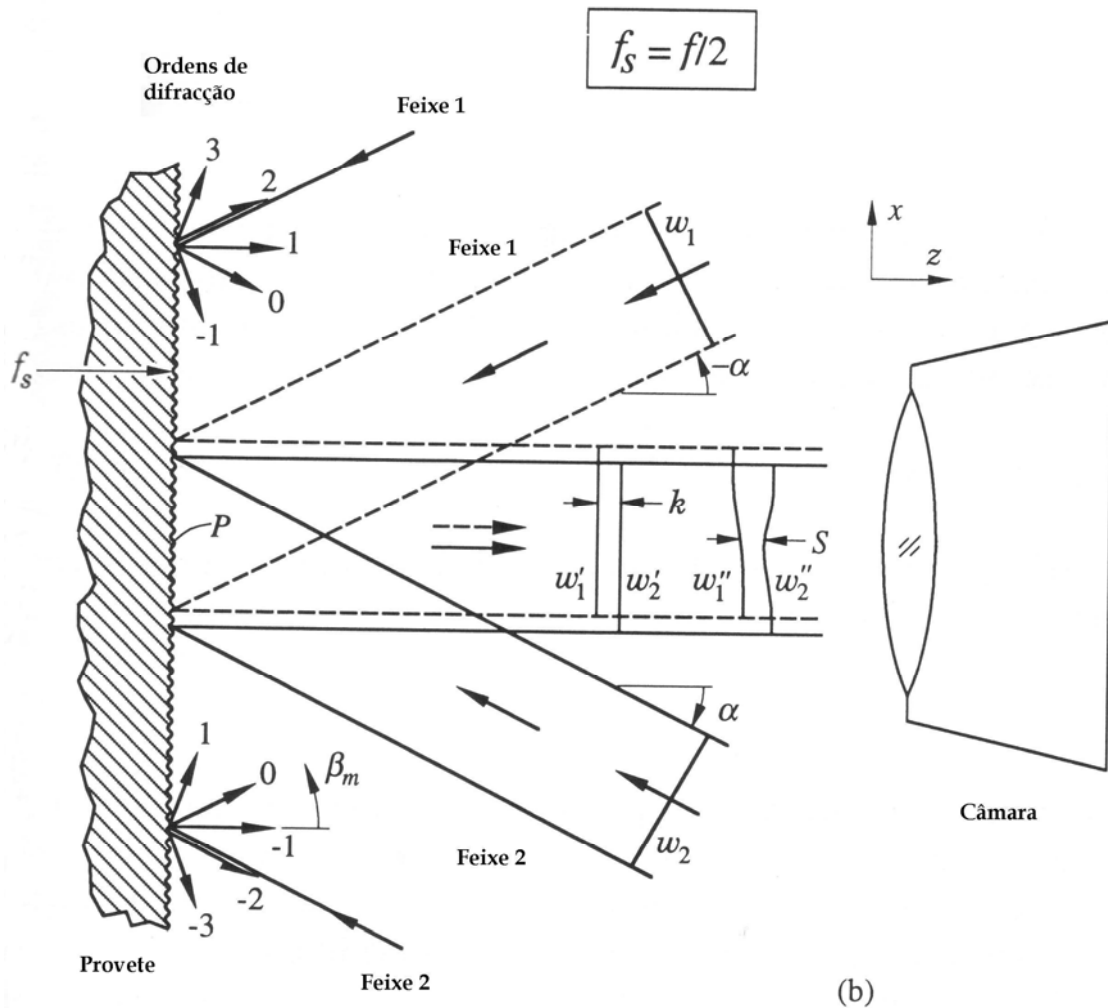


Figura 3.8 Representação esquemática do princípio dum sistema de interferometria de Moiré. As ordens de difracção ± 1 coincidem com a normal à superfície do provete em que se encontra a rede de difracção e provêm, respectivamente, da difracção do feixe w_2 (+1) e w_1 (-1); w_1' e w_2' representam as frentes de onda planas para a primeira condição, sem carregamento; w_1'' e w_2'' representam as frentes de onda deformadas.

Os feixes incidentes 1 e 2 são simétricos e com frentes de onda planas. As interferências dos dois feixes formam, na frente do provete, uma rede de referência virtual. A sua frequência f pode ser determinada pela equação,

$$f = \frac{2}{\lambda} \sin \alpha \quad (3.21)$$

Se a superfície do provete em que se encontra a rede for perfeitamente plana, as ordens de difracção ± 1 serão também frentes de onda planas. De acordo com a equação de difracção da rede (3.20), as ordens de difracção ± 1 serão difundidas segundo a normal do provete (w_1' e w_2' na Figura 3.8) quando a frequência da rede do provete (f_s) for,

$$f_s = \frac{1}{2} f$$

Supondo que o provete sofre uma deformação uniforme ε_{xx} na direcção x e que a frequência da rede do provete é, por consequência, aumentada ou diminuída de acordo com:

$$f_s' = \frac{\sin \alpha}{\lambda} (1 + \varepsilon_{xx}) = f_s (1 + \varepsilon_{xx}) \quad (3.22)$$

Os feixes difractados de ordem +1 ou -1 serão difundidos com ângulos pequenos, β_1 e β_{-1} , determinados pela equação (3.20):

$$\sin \beta_1 = -\varepsilon_{xx} \sin \alpha \quad \sin \beta_{-1} = \varepsilon_{xx} \sin \alpha \quad (3.23)$$

Combinando as equações (3.19), (3.22) e (3.23) o valor da franja F_{xx} pode ser expresso segundo a equação:

$$F_{xx} = \frac{2 \sin \alpha}{\lambda} \varepsilon_{xx} = f_s \varepsilon_{xx} \quad (3.24)$$

Por conseguinte,

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{1}{f} \left[\frac{\partial N_x}{\partial x} \right] = F_{xx} \quad (3.25)$$

Onde f é a frequência da rede de referência ($f = 2f_s$); N_x é o número de ordem da franja; u_x é o deslocamento na direcção X.

Integrando a equação (3.25) tem-se,

$$u_x = \frac{1}{f} N_x + C \quad (3.26)$$

Onde C é uma constante de integração.

Se $N_x = 0$ quando $u_x = 0$, então $C = 0$. Na técnica de Moiré interferométrico o deslocamento pode ser relacionado com o número de ordem da franja da seguinte forma:

$$u_x = \frac{1}{f} N_x = \frac{1}{2f_s} N_x \quad (3.27)$$

No caso da utilização duma rede cruzada, pode, também, determinar-se o deslocamento na direcção Y que pode ser expressa como:

$$u_y = \frac{1}{f} N_y = \frac{1}{2f_s} N_y \quad (3.28)$$

As equações (3.27) e (3.28) são as equações de base da interferometria de Moiré, u_x e u_y são frequentemente denominados campos U e V e representam a distribuição espacial dos deslocamentos segundo duas direcções perpendiculares.

3.2.2.1.4 Obtenção dos deslocamentos

Nos pontos anteriores deduziram-se as relações de base da interferometria de Moiré relacionando o gradiente de franja com a deformação ou o número de ordem da franja com os deslocamentos. Podem ser estabelecidas o mesmo tipo de relações no âmbito da teoria da interferência de frentes de onda [17]. Considerando cada ponto da superfície do provete não deformado da Figura 3.8, os feixes 1 e 2 percorreram, entre a fonte e o ponto P, caminhos ópticos que diferem dum valor k . Os campos eléctricos destes feixes incidentes podem ser descritos pelas expressões seguintes,

$$A_1(x, y) = a(x, y) \exp[-i(2\pi wt)]$$

$$A_2(x, y) = a(x, y) \exp\left[-i2\pi\left(wt - \frac{k}{\lambda}\right)\right] \quad (3.29)$$

O ângulo α da Figura 3.8 obedece à relação $\sin \alpha = \lambda f_s$, de tal maneira que o número de ordem das difracções (± 1) coincide com a normal à rede do provete. Os campos eléctricos da luz difundida, são expressos por equações idênticas às (3.29), neste caso designados por:

$$A'_1(x, y) = a'(x, y) \exp[-i(2\pi wt)]$$

$$A'_2(x, y) = a'(x, y) \exp\left[-i2\pi\left(wt - \frac{k}{\lambda}\right)\right] \quad (3.30)$$

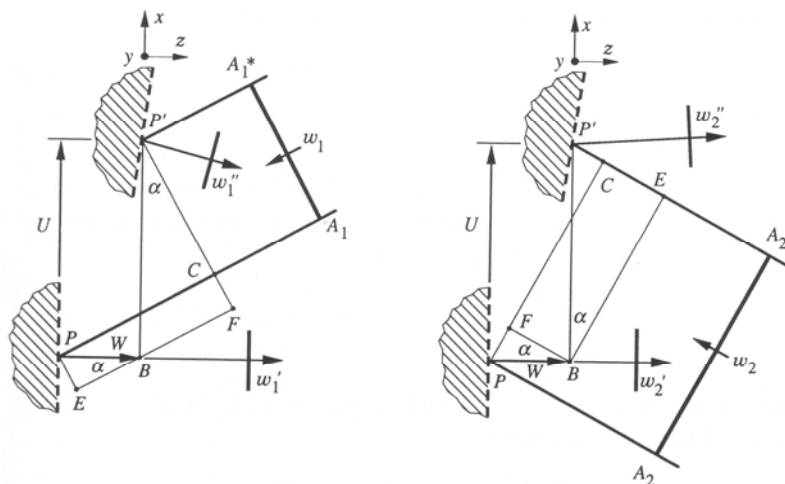


Figura 3.9 Variação do comprimento do caminho óptico provocado pela deformação do provete, originando um movimento de P para P'.

Quando o provete é deformado o ponto P desloca-se para P', este deslocamento ocorre, simultaneamente, no plano segundo a direcção U, e fora do plano na direcção W. Por conseguinte, ocorre uma alteração dos caminhos ópticos dos dois feixes. A equação (3.20) pode ser transformada passando a assumir as seguintes formas,

$$\begin{aligned} A_1''(x, y) &= a''(x, y) \exp \left[-i2\pi \left(wt - \frac{\Delta OPL_1(x, y)}{\lambda} \right) \right] \\ A_2''(x, y) &= a''(x, y) \exp \left[-i2\pi \left(wt - \frac{k}{\lambda} - \frac{\Delta OPL_2(x, y)}{\lambda} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.31)$$

Considerando o comprimento dos caminhos ópticos para os feixes 1 e 2, respectivamente, OPL_1 e OPL_2 , então, as alterações do comprimento dos caminhos ópticos para esses feixes, ΔOPL_1 e ΔOPL_2 , podem ser determinados recorrendo à Figura 3.9, a que correspondem os seguintes valores:

$$\begin{aligned} \Delta OPL_1(x, y) &= u_z(x, y)(1 + \cos \alpha) + u_x(x, y) \sin \alpha \\ \Delta OPL_2(x, y) &= u_z(x, y)(1 + \cos \alpha) - u_x(x, y) \sin \alpha \end{aligned} \quad (3.32)$$

O campo eléctrico resultante é,

$$\begin{aligned} A''(x, y) &= A_1''(x, y) + A_2''(x, y) \\ &= a''(x, y) \left\{ \exp \left[-i2\pi \left(wt - \frac{\Delta OPL_1(x, y)}{\lambda} \right) \right] + \exp \left[-i2\pi \left(wt - \frac{k}{\lambda} - \frac{\Delta OPL_2(x, y)}{\lambda} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.33)$$

Então, a intensidade resultante de $A''(x, y)$ pode ser expressa como,

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |A''(x, y)|^2 = |A_1''(x, y) + A_2''(x, y)|^2 \\ &= [A_1''(x, y) + A_2''(x, y)] [(A_1''(x, y))^* + (A_2''(x, y))^*] \\ &= 2(a''(x, y))^2 \left\{ 1 + \cos \left[\frac{\Delta OPL_1(x, y) - \Delta OPL_2(x, y)}{\lambda} - \frac{k}{\lambda} \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.34)$$

A partir da equação (3.22) pode obter-se

$$\Delta OPL_1(x, y) - \Delta OPL_2(x, y) = 2u_x(x, y) \sin \alpha = \lambda f u_x(x, y)$$

Por substituição na equação (3.34), a intensidade resultante será,

$$I(x, y) = 2(a''(x, y))^2 \left[1 + \cos 2\pi \left(f u_x(x, y) - \frac{k}{\lambda} \right) \right]$$

$$= 4(a''(x, y))^2 \cos^2 \pi \left[fu_x(x, y) - \frac{k}{\lambda} \right] \quad (3.35)$$

Quando $fu_x(x, y) - \frac{k}{\lambda} = N_x$ ($N_x = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n$) então $I(x, y) = I_{\max} = 4(a''(x, y))^2$

N_x é o número de ordem da franja. O termo $2\pi k/\lambda$ é diferença de fase constante que representa deslocamento uniforme ao longo de todo o campo. Para a análise das deformações, este termo pode ser ignorado e o deslocamento da superfície no plano $u_x(x, y)$ pode ser relacionado com número de ordem da franja N_x :

$$u_x(x, y) = \frac{1}{f} N_x = \frac{1}{2f_s} N_x \quad (3.36)$$

Da mesma forma, o deslocamento segundo a direção Y pode ser descrito como,

$$u_y(x, y) = \frac{1}{f} N_y = \frac{1}{2f_s} N_y \quad (3.37)$$

3.2.2.2 Limite teórico

Teoricamente o limite superior para a frequência da rede de referência é obtido quando α (ver equação (3.22)) se aproxima dos 90° . O limite teórico superior da sensibilidade corresponde a $2/\lambda$ franjas por unidade de deslocamento, isto é, entre duas franjas consecutivas existe o deslocamento de $\lambda/2$.

A título de exemplo considere-se que foi replicada num provete uma rede de difração com 2000 l/mm e que no ensaio foi utilizada uma montagem óptica onde α é igual a 77.4° e uma radiação coerente com λ igual a 488 nm. Neste caso, produzir-se-ia uma rede virtual de referência com 4000 l/mm. Para este comprimento de onda, o limite teórico é $f = 4098$ l/mm, isto significa que esta experiência foi realizada a 97.6% do limite teórico da sensibilidade.

3.2.2.3 Sensibilidade e resolução

A sensibilidade na medição do deslocamento é determinada pelo número de franjas geradas por unidade de deslocamento, ou seja N_x/u . Pela equação, $f = N_x/u$, verifica-se que a sensibilidade do deslocamento é igual à frequência f da rede de referência pelo que aumenta com esta. Numa região em que os deslocamentos variam de zero até u , o número de franjas atravessadas por um eixo X é $N_x = fu$. Para o caso de $f = 2400$ l/mm a sensibilidade correspondente é 2.4 franjas/ μm de deslocamento. O inverso da sensibilidade define o correspondente deslocamento entre franjas consecutivas, $1/f$. Quando $f = 2400$ l/mm, o deslocamento entre duas franjas consecutivas é $0.417 \mu\text{m}$.

3.2.2.4 Sistemas ópticos para interferometria de Moiré

3.2.2.4.1 Sistema de dois feixes

Quando é utilizada uma rede cruzada na interferometria de Moiré, os deslocamentos, u_x e u_y podem ser obtidos separadamente recorrendo às equações (3.36) e (3.37). Da análise destas equações pode concluir-se que é possível medir-se um campo de deslocamentos uniaxial a partir da interferência de dois feixes. Na Figura 3.10 está representado esquematicamente um sistema muito prático de interferência entre dois feixes.

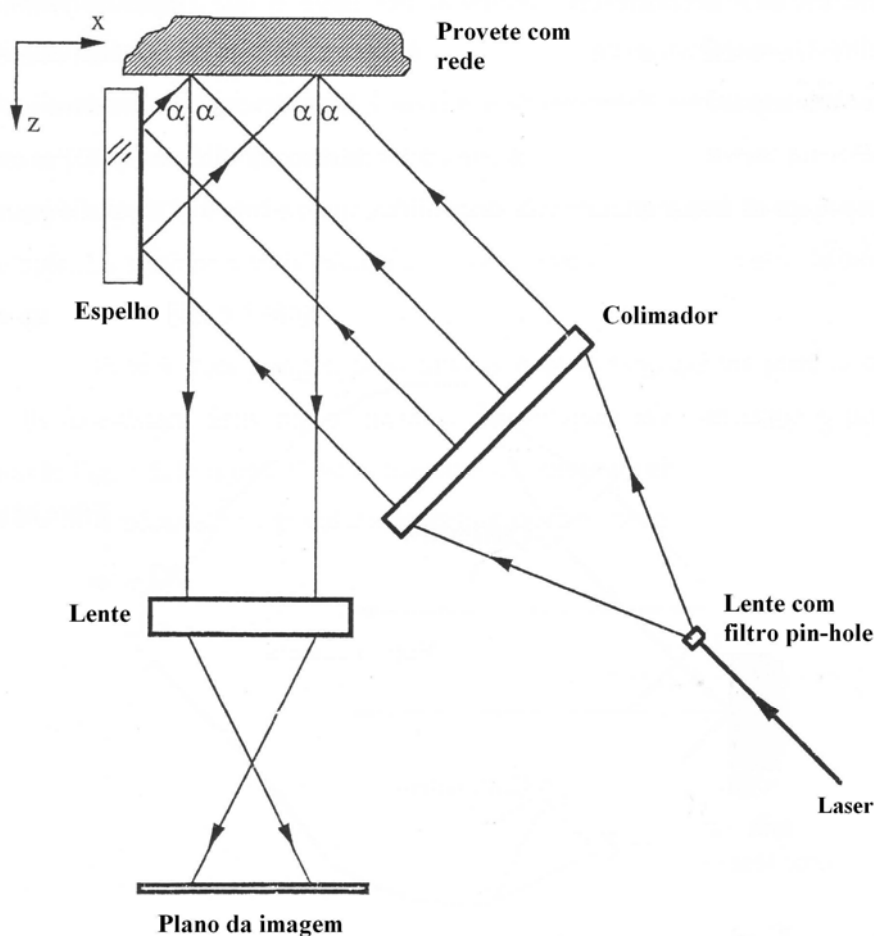


Figura 3.10 Sistema clássico para a interferometria de Moiré com dois feixes.

Um feixe laser é aberto por uma lente convergente e filtrado por um filtro espacial sendo depois colimado por uma segunda lente. Parte da luz colimada incide directamente na rede gravada no provetes e a outra parte é reflectida no espelho plano e dirigida para o provetes. Estes dois feixes, mutuamente coerentes e simétricos relativamente à normal à superfície do provetes (direcção z), são difractados pela rede do provetes com diferentes ordens de difracção. Num estado em que o provetes está livre de qualquer carga externa e é satisfeita a relação $\sin \alpha = m\lambda_f$, as ordens de difracção $+m$ e $-m$ são ocorrem segundo a normal à superfície.

Uma vantagem do sistema de dois feixes é a proximidade entre o espelho e o provetes, que reduz a influência das vibrações é ao mínimo. Em contrapartida, tem como inconveniente a

necessidade de um colimador de grandes dimensões para iluminar o espelho e a rede do provete. Deve referir-se que em alternativa a esta montagem pode ser utilizado um espelho parabólico para colimar o feixe.

É importante clarificar que podem ser utilizados em simultâneo vários sistemas de dois feixes de acordo com as medições pretendidas e as disponibilidades. Por exemplo, se estiverem disponíveis fibras ópticas de boa qualidade, pode obter-se um sistema muito simplificado, como se representa na figura 3.11.

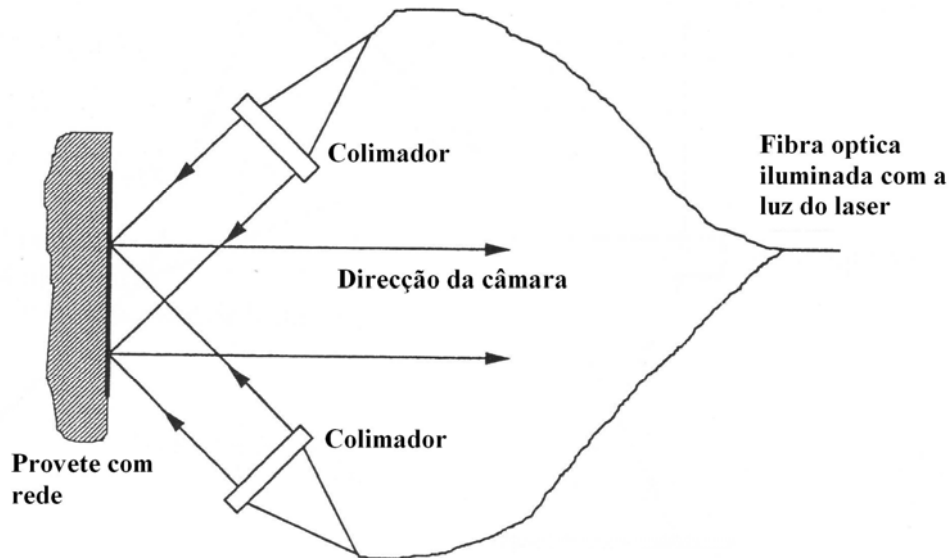


Figura 3.11 Alternativa ao sistema clássico na interferometria de Moiré com dois feixes.

3.2.2.4.2 Sistema de quatro feixes

Os sistemas de dois feixes só permitem obter o campo de deslocamentos numa direcção (u_x ou u_y). Na prática, se fosse necessária a medição do campo de deslocamentos em duas direcções seria necessário rodar o provete de 90° . Contudo, há aplicações em que o provete não pode ser rodado, como por exemplo se este está montado numa máquina de ensaios de tracção. Para a análise destes casos, pode recorrer-se a montagens de interferometria de Moiré com quatro feixes, permitindo aquisições bidimensionais em tempo real.

Para as medições do campo de deslocamentos no plano, u_x , utiliza-se o mesmo procedimento descrito no ponto anterior, os centros dos componentes ópticos têm todos a mesma altura, o que simplifica muito a instalação. Contudo, para a medição do campo de deslocamentos na outra direcção no plano, u_y , a altura do sistema óptico deve ser mais elevada a fim de manter um ângulo de incidência α no seu valor máximo (quando a frequência da rede do provete, f_s , é de 1200 l/mm, o comprimento de onda do laser igual a 514 nm e as ordens de difracção dos feixes são ± 1 , então o ângulo de incidência α será igual a 38.08°). Por este facto a influência das vibrações deve ser tida em conta uma vez que as montagens mais elevadas são também mais instáveis. O sistema de três espelhos é um exemplo de instalação dum sistema de quatro feixes. Na Figura 3.12 está representado esquematicamente o seu princípio de funcionamento [18].

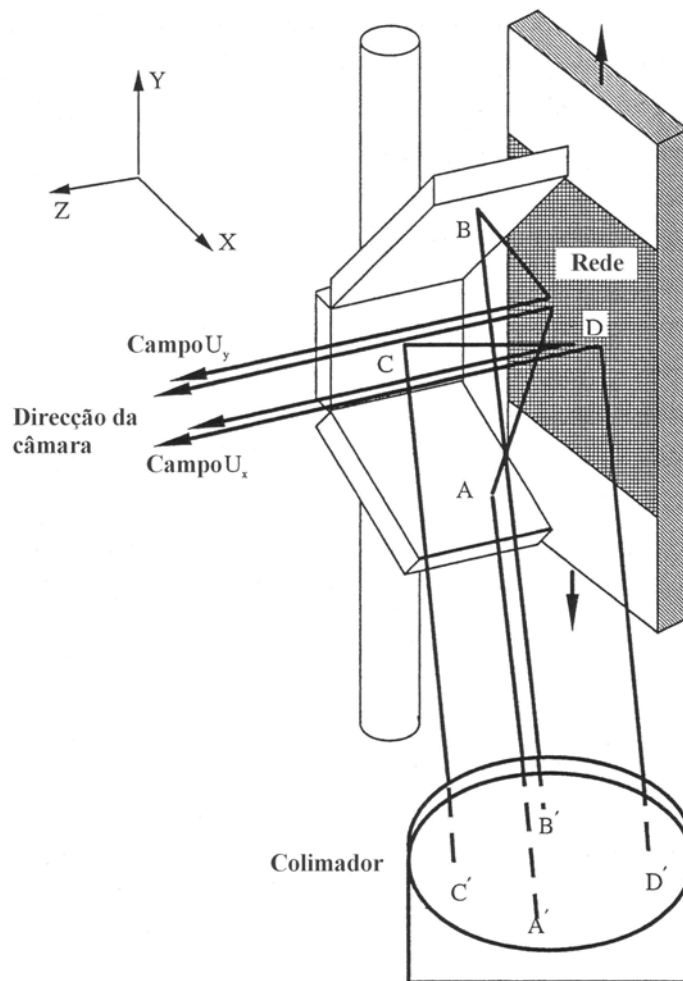


Figura 3.12 Sistema clássico para a interferometria de Moiré com quatro feixes (três espelhos).

No sistema de três espelhos, os espelhos A e B são ajustados para a medição do campo u_y . Este conjunto fornece dois feixes incidentes simétricos com um ângulo de incidência α . Tal como na Figura 3.11, o espelho C é utilizado para a medição do campo u_x . O inconveniente desta montagem prende-se com a necessidade dum grande colimador que origine um feixe colimado, correspondente à soma dos feixes A', B', C' e D'.

Chang [19] propôs uma montagem mais compacta com quatro feixes, que foi executada por Czarnek [20], e está representada esquematicamente na Figura 3.13. Um feixe de luz colimada incide, perpendicularmente, numa rede de difracção com linhas cruzadas. Os quatro feixes de difracção 2α (+1 e -1) são reflectidos pelos espelhos na direcção da rede do provete com ângulos de incidência α idênticos. Este ângulo satisfaz a equação da difracção da rede $\sin \alpha = m\lambda_f$. Logo os campos de deslocamentos u_x e u_y podem ser determinados.

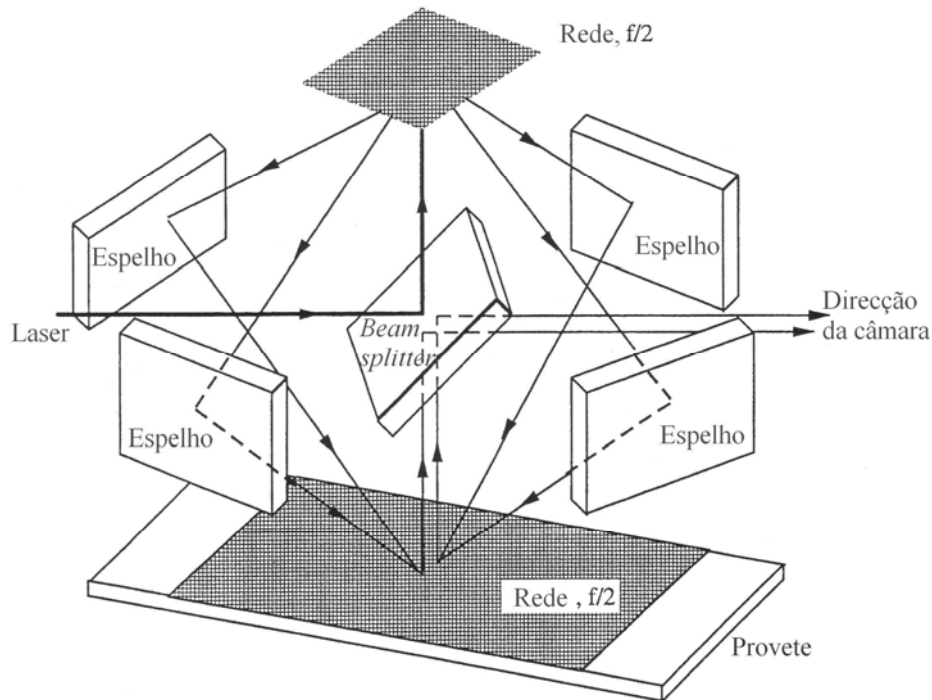


Figura 3.13 Sistema compacto para interferometria de Moiré com quatro feixes.

Uma variante ao sistema da Figura 3.13 foi descrita por Swanson [21], neste sistemas os quatro espelhos são substituídos por quatro redes de difracção e o feixe de luz laser incide directamente numa das redes que difracta a luz para as duas redes vizinhas e para a rede do provete, as redes que recebem a luz difractada actuam da mesma forma que a rede que sofre a incidência directa do laser. Existem sistemas portáteis, baseados nos princípios descritos neste ponto (sistema de quatro feixes), sendo os mais conhecidos o interferómetro PEMI[®] comercializado pela empresa IBM – Divisão da Micro-electronica e o LES, interferómetro desenvolvido pelo Instituto de Micromecânica e Fotónica da Universidade de Varsóvia. O primeiro baseia-se no trabalho desenvolvido por Czarnek enquanto que o segundo se baseia na variante descrita por Swanson.

3.2.3 Vantagens e desvantagens da técnica de Moiré

O método de Moiré usado como técnica de análise de deslocamentos no plano apresenta como vantagens, fornecer a informação de todo o campo de deslocamentos no plano, em uma ou duas direcções, permitir a medição dos deslocamentos com elevada resolução bastando para isso que a densidade da rede seja elevada, poder ser executada em modo de transmissão ou de reflexão.

Contudo, os métodos de Moiré utilizados na análise de deslocamentos no plano, apresentam algumas desvantagens, tais como estarem limitados a superfícies planas, requererem uma cuidada preparação da superfície do provete e necessitarem duma gravação da rede na superfície do provete, necessitam de uma montagem óptica para gerar uma rede de referência, apresentarem algumas dificuldades no ajuste da montagem óptica, isto é, a rede de referência deverá coincidir com a rede do provete antes do carregamento, normalmente este objectivo não se consegue na sua plenitude, no caso das rotações serem importantes é necessário algum cuidado na análise de dados, podendo originar o aparecimento de deslocamentos não lineares.

3.3 Interferometria Holográfica

A holografia é um método de armazenamento e regeneração de toda a informação difundida dum objecto iluminado. Com esta técnica é possível registar a amplitude e a fase da luz. Informação que permite depois reconstruir a frente de onda original. O feixe objecto regenerado é idêntico ao original e possui todas as suas características. Como é possível gravar com exactidão a forma e a posição do objecto em dois estágios diferentes, então, comparando as duas imagens gravadas é possível medir com precisão movimentos ou deformações. Esta técnica de medição é denominada por interferometria holográfica sempre que pelo menos uma das imagens seja obtida a partir de um registo holográfico.

A holografia foi descoberta por Dennis Gabor em 1948 como um método para melhorar a resolução na microscopia electrónica. Segundo Gabor, seria uma técnica de registo que permitia gravar toda a informação presente numa frente de onda, ou seja, as distribuições espaciais de amplitude e de fase [22]. Este investigador utilizou luz de mercúrio e materiais transparentes e desenvolveu a técnica designada por holografia no eixo.

A invenção do laser em 1960 tornou disponível uma fonte de luz coerente com um comprimento de coerência que pode atingir alguns metros. Esta nova fonte de luz tornou possível a invenção, por Leith e Upatnieks no início dos anos 60, da holografia fora do eixo. Assim, passou a ser possível gravar e observar imagens holográficas de objectos difusos e de grandes dimensões. Nos anos que se seguiram, ocorreram muitas melhorias e simplificações desta técnica. Actualmente, os hologramas estão muito divulgados e podem ser vistos em capas de revistas, em cartões de crédito, na joalheria, iscos para a pesca, e em muitas aplicações técnicas tais como lentes holográficas.

3.3.1 Fundamentos básicos da holografia

A teoria que suporta a holografia pode ser explicada utilizando apenas conceitos de interferência entre duas ondas luminosas e de difracção provocada por uma rede. O requisito fundamental dum holograma é a gravação de toda a informação contida na luz que é difundida pela superfície de um dado objecto. É claro que nenhum dispositivo de gravação, mesmo as emulsões fotográficas, é sensível à fase, pelo que a informação da fase é convertida em variações de amplitude por interferência entre a frente onda proveniente do objecto e uma frente de onda utilizada como referência. O resultado desta interferência corresponde a uma rede de difracção.

Recuperando o feixe objecto posteriormente, iluminando o holograma com o feixe de referência, pode reproduzir-se a imagem original utilizando uma câmara ou pode ser observada directamente pelo olho humano. Para que a imagem seja idêntica ao objecto é necessário que a iluminação do holograma seja feita com um feixe com as mesmas características do feixe de referência utilizado na produção do holograma. Este processo envolve os conceitos da difracção da luz por uma rede.

Na interferometria holográfica são utilizadas frentes de onda, obtidas para diferentes estados do objecto, para medir os deslocamentos deste durante a sua solicitação. Da correlação entre frentes de onda resulta um padrão de interferência que codifica as alterações verificadas na superfície do objecto. Quando a situação inicial do objecto é gravada no holograma e a sua reconstrução é directamente comparada com o objecto esta técnica é designada por correlação em tempo real. A correlação é designada por dupla exposição quando são criadas redes

holográficas para dois estados diferentes do objecto que são gravadas na mesma placa holográfica. Na reconstrução são criadas duas réplicas de feixes objecto, uma para cada estado do objecto, estas frentes de onda interferem e geram um padrão de interferência que caracteriza a deformação do objecto.

Dado o enorme interesse nas diversas aplicações da holografia, não é surpreendente o facto de existir um enorme volume de literatura sobre o assunto. Uma vez que não faz parte do âmbito deste trabalho, para descrição desta técnica indicam-se algumas referências bastante úteis e esclarecedoras para quem pretenda aprofundar este assunto, [22, 23, 24, 25].

3.3.2 Obtenção dum holograma de transmissão

Como referido em pontos anteriores, quando dois feixes coerentes com frentes de onda plana se interceptam, a interferência entre os dois feixes cria um padrão tridimensional de franjas de interferência que preenche o espaço onde os dois feixes que se sobrepõem. Se for colocada uma tela no interior do volume de sobreposição dos feixes, pode observar-se uma rede de linhas paralelas projectada na tela. Esta ideia de interferometria pode ser estendida intuitivamente para o caso em que um ou ambos os feixes não tenham frentes de onda planas. O efeito, basicamente, será o mesmo, produzir-se-á um padrão estacionário de bandas de interferência. O padrão de franjas não será, contudo, um simples sistema de bandas paralelas. Na criação de um holograma uma das frentes de onda provém da superfície do objecto e é gravado o padrão de interferência criado pela sobreposição das duas frentes de onda. O padrão de interferência gravado pode ser utilizado para reproduzir o feixe incidente se for iluminado com a frente de onda plana utilizada como referência. Uma rede para Moiré interferométrico é na realidade um registo holográfico [26]. A Figura 3.14 ilustra o caso no qual uma onda plana interfere com uma onda difundida a partir dum objecto iluminado,

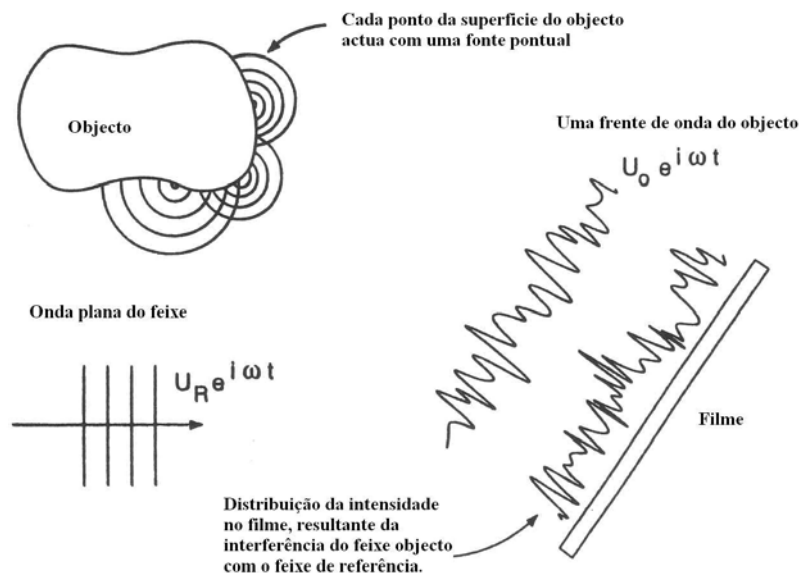


Figura 3.14 Interferência de uma frente de onda plana de referência plana com a frente de onda do objecto.

É este feixe objecto que contém toda a informação acerca do tamanho, forma, cor, paralaxe, etc. Naturalmente, é uma frente de onda complexa pois todos os pontos do espaço circundante

recebem luz simultaneamente de todos os pontos iluminados da superfície do objecto. O resultado é uma frente de onda que é diferente em cada ponto do espaço próximo do objecto.

Como a onda plana, também chamado feixe de referência, e o feixe objecto são combinados e são coerentes, interagem para criar um padrão de interferência complexo. Este padrão de franjas é microscópico (até 5000 l/mm) e varia continuamente no espaço. A gravação deste padrão pode ser feita em qualquer secção particular inserindo uma emulsão fotográfica (placa holográfica). O sistema óptico deve ser suficientemente estável para que o filme seja exposto com um padrão estacionário. É importante lembrar que as bandas de interferência têm uma elevada frequência espacial e que nenhum elemento do sistema óptico se pode mover mais do que uma pequena fracção do espaçamento entre franjas, isto é, não são aceitáveis movimentos relativos superiores a uma fracção do comprimento de onda da luz durante a exposição. A gravação fotográfica do padrão de interferência produzido pelos dois feixes é designada por holograma (do grego holos “o todo”) porque contém toda a informação óptica acerca do feixe difundido pelo objecto.

Para se proceder aos cálculos com a informação armazenada no holograma, é previamente escolhido um sistema de coordenadas arbitrário. Considerando o sistema representado na Figura 3.15, com o filme de gravação no plano xy e o feixe de referência propagando-se ao longo do eixo z, o feixe objecto será uma frente de onda complexa que atinge o filme de gravação segundo uma inclinação ψ relativamente ao eixo z. Admitindo que o objecto é de pequena dimensão ou se encontra afastado do filme pode obter-se a seguinte formulação para descrever a frente de onda proveniente da superfície do objecto.

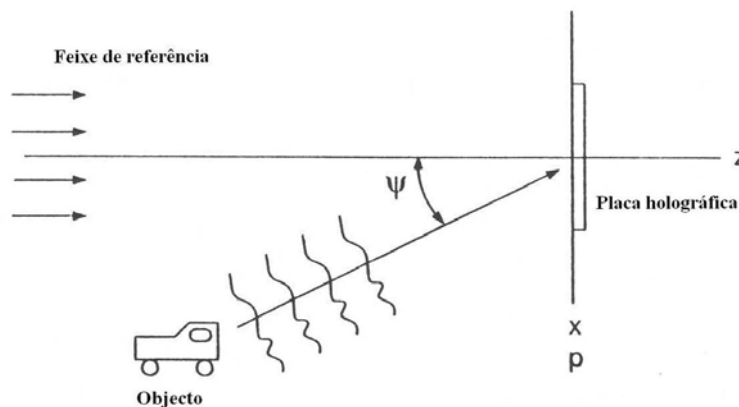


Figura 3.15 Geometria duma gravação holográfica.

O feixe objecto é designado pelo índice O e pode ser descrito, em notação complexa, pela seguinte expressão,

$$E_0 = \text{Re}(U_0 \exp(i\omega t))$$

Onde, na placa holográfica,

$$U_0 = A_0(p, q) \exp(-i[kp \sin \psi - \phi_{00}(p, q)]) \quad (3.38)$$

Onde $k = 2\pi / \lambda$ é designado por número de onda.

O feixe referência, por sua vez, pode ser descrito pela expressão

$$E_R = A_R(x, y, z) \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}\right) \quad (3.39)$$

Em que na fase inicial é considerada zero. Na placa holográfica, $z = 0$, então

$$E_R = \text{Re}(U_R \exp(i\omega t)) \quad (3.40)$$

Onde,

$$U_R = A_R(p, q) \quad (3.41)$$

Assumindo que a intensidade do feixe referência é uniforme,

$$U_R = A_R = \text{const} \quad (3.42)$$

A luz que atinge a placa holográfica é a resultante dos feixes objecto e referência. O resultado pode ser obtido sob várias formas diferentes. Uma aproximação directa às amplitudes complexas resulta numa expressão genérica, a qual tem a vantagem de ser bastante sucinta,

$$U_S = U_0 + U_R$$

A intensidade pode ser determinada por,

$$\begin{aligned} I_S &= U_S U_S^* = (U_0 + U_R)(U_0^* + U_R^*) \\ &= U_0 U_0^* + U_R U_R^* + U_0^* U_R + U_0 U_R^* \end{aligned} \quad (3.43)$$

Analisando a equação (3.43) pode verificar-se que a distribuição da intensidade na placa holográfica inclui toda a informação de amplitude e fase dos feixes incidentes, bem como a dos seus feixes complexos conjugados.

No processo de gravação e para algumas taxas de intensidade, a placa actua como um detector linear; isto é, a transmitância da placa, $T_a(p, q)$ é uma função linear da intensidade de luz que a atinge. Esta resposta é também conhecida como “lei da detecção quadrática”, uma vez que a transmitância é proporcional ao quadrado da amplitude.

$$T(p, q) = K_0 + K_1 I_S(p, q) \quad (3.44)$$

Para o holograma, verifica-se então que

$$T(p, q) = K_0 + K_1 (U_0 U_0^* + U_R U_R^* + U_0^* U_R + U_0 U_R^*) \quad (3.45)$$

A placa exposta e revelada contém a gravação de toda a informação contida nos feixes objecto e referência e dos seus conjugados. O problema que se mantém é a recuperação desta informação de forma útil. Para conservar mais informação acerca da estrutura detalhada do

holograma, substituem-se as amplitudes complexas dos feixes objecto e referência da placa na equação (3.45) para ser obtida a seguinte expressão;

$$T(p, q) = K_0 + K_1 A_R^2 + K_1 A_0^2 (p, q) + K_1 A_R A_0 (p, q) \exp\left(i\left[kp \sin \psi - \phi_{00}(p, q)\right]\right) + K_1 A_R A_0 (p, q) \exp\left(-i\left[kp \sin \psi - \phi_{00}(p, q)\right]\right) \quad (3.46)$$

Toda esta informação é gravada na emulsão como uma estrutura de rede muito fina e complexa. A placa exposta e revelada contém uma imagem não reconhecível. A placa parecerá como uma superfície da emulsão baça em resultado da sua exposição e revelação química. Cada pequeno elemento da emulsão contém toda a informação sobre o objecto como se ele tivesse sido observado a partir desse ponto na placa. Assim, cada pequeno elemento da placa holográfica é, por si só, um holograma completo, isso é facilmente demonstrável, iluminando pequenos pedaços da placa holográfica e reconstruindo a imagem a partir de cada pedaço.

3.3.3 Reconstrução duma imagem holográfica

Um holograma, de acordo com a teoria desenvolvida no ponto anterior, armazena toda a informação contida no feixe objecto. Também os dados sobre o feixe referência e os complexos conjugados para ambos os feixes ficam gravados na placa holográfica. A dificuldade encontra-se em recuperar o feixe de forma útil. Normalmente pretende-se obter uma imagem visível do objecto e a imagem deve estar livre de interferências provocadas por ruído.

Um caso especial de reconstrução holográfica é particularmente útil e suficiente para a maioria dos casos práticos. Este caso denomina-se pela reconstrução por uma réplica, a qual é exacta excepto na intensidade, do feixe referência original. A análise desenvolvida no ponto anterior ficou confinada à utilização de frentes de onda planas de referência. Esta restrição não é importante desde que os feixes referência usados na gravação e na reconstrução sejam iguais.

A análise do processo de reconstrução começa com a alteração da expressão para o feixe referência, dando-lhe uma amplitude diferente e chamando-o de feixe de reconstrução E_C , conforme se apresenta na equação seguinte.

$$E_C = \text{Re}(U_C \exp(iwt)) \quad (3.47)$$

$$U_C = A_C \exp(-ikz)$$

Este feixe é simplesmente utilizado para iluminar o holograma considerando as mesmas montagens estabelecidas nas Figura 3.14 e 3.15, para as quais o feixe de reconstrução substitui o feixe referência. A maior dificuldade é compreender o que aparece do outro lado do holograma, o qual actua como se fosse uma complicada rede de difracção.

Nesta fase, é necessário definir o caminho adequado em função do resultado que se pretende. É possível utilizar três diferentes aproximações de maneira a conseguir-se a melhor

interpretação física possível numa imagem holográfica. Embora este estudo não esteja no âmbito deste trabalho, faz-se apenas referência às aproximações possíveis que são: analisando o holograma como um filtro de transmitância; recorrendo à teoria de difracção aplicada à holografia e analisando o holograma como uma rede de difracção. Todas elas estão descritas em profundidade nas referências indicadas no ponto 3.2.1.

3.3.4 Vector sensibilidade

Para determinar a direcção do vector sensibilidade poderá admitir-se que a informação da fase obtida no ponto P dum provete no estado inicial pode ser combinada com a informação de fase vinda do mesmo ponto depois deste ter sofrido um movimento, na Figura 3.16 representado por P'. Esta suposição não é exactamente cumprida na prática excepto para os problemas unidimensionais ou na vizinhança de pequenos deslocamentos. O que é perfeitamente aceitável em óptica, uma vez que a maioria dos problemas metrológicos com interferometria são aplicados a pequenos deslocamentos. Por simplificação e sem perda de generalidade também se assume que a luz que emerge dos pontos adjacentes não interage com a proveniente do ponto que está a ser analisado.

A sensibilidade numa medição com holografia e com interferometria *speckle* é governada pela orientação relativa entre três vectores: o vector de iluminação, o vector deslocamento e pelo vector do feixe reflectido, ou de observação. Na Figura 3.16 estão representados, esquematicamente, os três vectores para um caso geral de medição.

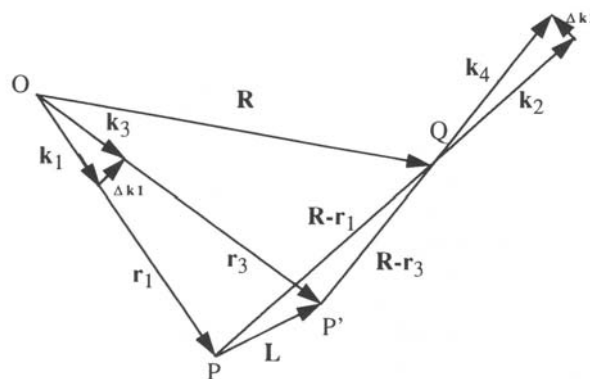


Figura 3.16 Posicionamento e propagação de vectores em interferometria holográfica e *speckle*.

O objecto é iluminado por uma fonte de luz pontual localizada em O. A luz é difundida pelo objecto do ponto P para um observador, ou plano de observação, no ponto Q. Quando o objecto é deformado, o ponto P é deslocado segundo um vector \vec{L} para o ponto P', que corresponde a uma mudança do caminho óptico da fonte de luz para o observador. A mudança de fase associada à alteração do caminho óptico é obtida a partir das técnicas de correlação holográfica e de *speckle*.

Se δ representar um desfasamento de fase (*phase shift*), por vezes designada por $\Delta\phi$, da luz difundida pelo ponto P para uma determinada direcção, ver Figura 3.16, é possível definir vários vectores para determinar a relação entre δ e \vec{L} . Os vectores \vec{R} e \vec{r}_1 estão no plano definido pelos pontos O, P e Q; \vec{k}_1 e \vec{k}_2 representam os vectores de propagação da luz que ilumina P e que são por ele difundidos para o plano de observação, respectivamente. Uma vez

que a magnitude do vector propagação é $2\pi/\lambda$, as fases dos dois feixes de luz que atingem o plano de observação são as seguintes:

$$\phi_1 = \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \vec{k}_2 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_1) + \phi_o \quad (3.48)$$

$$\phi_2 = \vec{k}_3 \cdot \vec{r}_3 + \vec{k}_4 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_3) + \phi_o \quad (3.49)$$

Onde ϕ_1 é a fase da luz difundida pelo ponto P antes do deslocamento, ϕ_2 é a fase da luz difundida pelo ponto P', após o deslocamento, e ϕ_o é a fase arbitrária atribuída ao feixe que sai da fonte de luz localizada no ponto O.

No detector ou plano de observação, os dois feixes combinam-se de tal maneira, que permitem registar a diferença de fase, que será obtida por:

$$\delta\phi = \phi_2 - \phi_1 \quad (3.50)$$

O valor δ é representado em radianos, com tal não deve ser interpretado como uma distância. Após o deslocamento de P para P', os vectores de propagação na direcção de iluminação e de observação são, respectivamente, \vec{k}_3 e \vec{k}_4 . Considerando pequenas variações, $\Delta\vec{k}_1$ e $\Delta\vec{k}_2$, nestes vectores de propagação, obtém-se:

$$\vec{k}_3 = \vec{k}_1 + \Delta\vec{k}_1 \quad \vec{k}_4 = \vec{k}_2 + \Delta\vec{k}_2 \quad (3.51)$$

Que por combinação das equações precedentes, conduzem a:

$$\delta\phi = (\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot (\vec{r}_1 - \vec{r}_3) + \Delta\vec{k}_3 \cdot \vec{r}_3 + \Delta\vec{k}_2 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_3) \quad (3.52)$$

Em situações concretas, as magnitudes de \vec{r}_1 e \vec{r}_2 são muito superiores ao valor de $\vec{L} = |\vec{r}_1 - \vec{r}_3|$; pelo que, $\Delta\vec{k}_1 \perp \vec{r}_3$ e $\Delta\vec{k}_2 \perp (\vec{R} - \vec{r}_3)$. Assumindo estas simplificações, desaparecem os dois últimos produtos escalares da equação (3.52) e a diferença de fase transforma-se em,

$$\delta\phi = (\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot \vec{L} \quad (3.53)$$

Esta relação é a base da interpretação quantitativa das franjas para a interferometria holográfica e de *speckle*.

O vector sensibilidade, \vec{K} , pode então ser definido como sendo:

$$\vec{K} = \vec{k}_2 - \vec{k}_1 \quad (3.54)$$

E, por sua vez,

$$\delta\phi = \vec{K} \cdot \vec{L} \quad (3.55)$$

Esta variação de fase é também expressa em radianos, como foi dito anteriormente.

Se as direcções dos feixes objecto e de iluminação forem conhecidas e se for medida a variação de fase, então pode ser determinado o vector deslocamento. Se o deslocamento tiver três componentes desconhecidas então são necessárias três observações em diferentes direcções, e assim são obtidas três equações que podem ser resolvidas simultaneamente.

Uma observação útil é a que permite verificar que o vector sensibilidade definido pela equação (3.36) tem um significado físico imediato. Considerando que 2θ é o ângulo entre as direcções definidas pelos feixes de iluminação e objecto, então a magnitude de \vec{K} é $(2\pi/\lambda)\cos\theta$. Este vector está direccionado segundo a bissectriz do ângulo entre a direcção dos feixes de iluminação e de observação, facto que pode ser útil para o estabelecimento das melhores direcções a utilizar na medição duma componente particular do deslocamento.

3.4 ESPI – *Electronic Speckle Pattern Interferometry*

Os métodos de medição baseados num fenómeno, que se verifica com a iluminação com luz coerente e é designado por *speckle*, têm-se tornado muito populares nos últimos anos. Os padrões de franjas obtidos por correlação electrónica de registos de *speckle* em vídeo permitem medir grandezas que alterem a estrutura do *speckle*. Esta técnica permite evitar a revelação química originalmente utilizada em interferometria holográfica, pelo que tem gerado um interesse adicional nos métodos de interferometria.

Neste ponto discute-se a origem e a natureza do *speckle*, ou granitado laser, e os padrões de interferência obtidos a partir das diferentes formas de combinação dos campos de *speckle*. Estas noções são importantes para compreender os vários métodos de interferometria de *speckle*. A maioria dos conceitos apresentados neste ponto estão tratados detalhadamente por Vest [23], Johnes e Wykes [27].

3.4.1 O efeito *speckle*

As fotografias de objectos difusos iluminados por um LASER ficam cobertas por uma estrutura granular que é denominada por *speckle*. Na Figura 3.17 está representada uma imagem duma superfície plana iluminada por um feixe laser e em que pode ser observado um padrão de *speckle*. Este fenómeno só se verifica com luz coerente e resulta de múltiplas interferências da luz difundida pela textura rugosa das superfícies.

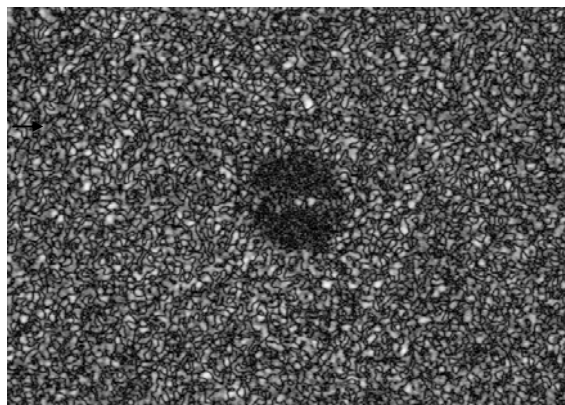


Figura 3.17 Imagem dum padrão de *speckle*.

Durante muitos anos o *speckle* foi considerado um ruído, que tornava o laser menos útil do que era esperado. Com o entendimento do fenómeno, evoluiu-se dum problema para as bases duma nova técnica de medição. As novas técnicas, que estão agrupadas sob o nome de “métodos de *speckle*” utilizam combinações de campos *speckle*, tais como a dupla exposição para criar franjas de interferência que indicam deslocamentos, deformações, ou movimento. A Figura 3.18 ilustra esquematicamente o processo de formação de *speckle* para um caso simples.

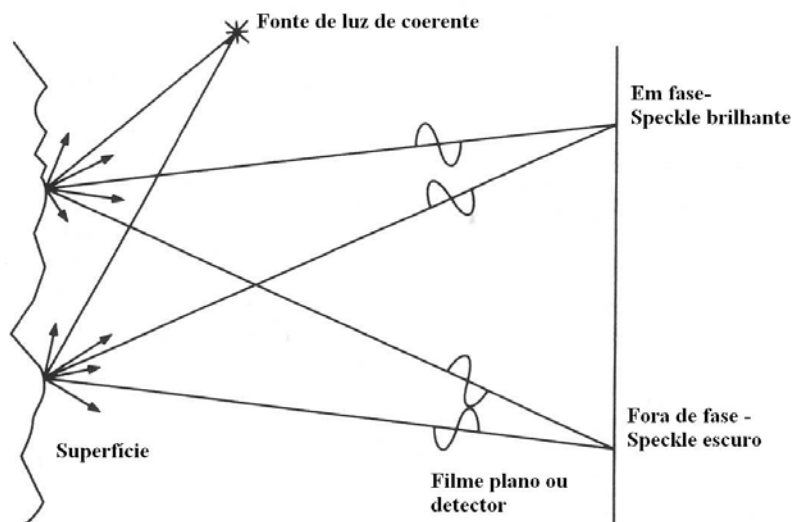


Figura 3.18 *Speckle* formado pela reflexão de luz coerente na superfície.

A maioria das superfícies de peças ou estruturas têm uma rugosidade cuja escala é superior ao comprimento de onda da luz visível ($0.6 \mu\text{m}$). Deve referir-se que o *speckle* pode também ser produzido pela transmissão de luz coerente através dum objecto difusor tais como vidro ou partículas liquidas. Quando a luz laser é difundida ou reflectida a partir dessas superfícies, a frente de onda que chega a qualquer ponto receptor resulta da sobreposição das múltiplas ondas, cada uma surge a partir de diferentes áreas da superfície iluminada. Os comprimentos dos caminhos ópticos dessas ondas, da fonte de luz ao objecto e do objecto ao ponto receptor, pode variar de zero a muitos comprimentos de ondas, dependendo da rugosidade da superfície e da geometria do sistema. Da interferência das ondas coerentes, mas desfasadas entre si, que chegam ao ponto receptor resulta uma intensidade luminosa que varia entre o escuro e o brilhante. Esta variação aleatória de intensidade codifica a textura da superfície e é designada por *speckle* objectivo.

Formando a imagem do campo de *speckle* através dum sistema óptico obtém-se outro padrão, designado por *speckle* subjectivo, cujo tamanho médio dos grãos depende da abertura do sistema óptico utilizado. Na Figura 3.19 mostra-se esquematicamente a formação do *speckle* subjectivo.

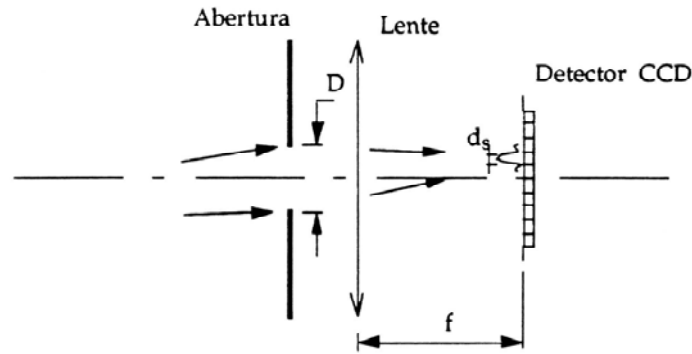


Figura 3.19 Formação do *speckle* subjectivo [22].

Em que D corresponde ao diâmetro de abertura do sistema óptico, d_s é o diâmetro do *speckle* e f a distância da lente ao plano da imagem.

O tamanho do *speckle* subjectivo corresponde ao tamanho da figura de difracção da abertura do sistema formador de imagem. O tamanho S_{subj} dos *speckles* individuais pode ser relacionado com a razão de abertura $F = \text{distância focal}/\text{abertura} = f/D$ e a ampliação M das lentes, através da seguinte expressão,

$$S_{subj} \approx 1.22(1 + M) \lambda F \quad (3.56)$$

Utilizando a fórmula das lentes, esta expressão pode ser substituída por,

$$S_{subj} \approx 1.22(1 + M) \lambda \frac{F}{M} \quad (3.57)$$

Considera-se que o *speckle* tem distribuição estatística Gaussiana. O termo “*speckle* Gaussiano” deriva do facto da maioria das superfícies reais poderem ser consideradas superfícies rugosas em termos ópticos. Esta suposição resulta numa função densidade de probabilidade exponencial negativa para o padrão intensidade de *speckle*. A rugosidade da superfície não influencia a distribuição estatística, desde que a rugosidade seja superior ao comprimento de onda e um grande número (N) de pontos difusores contribuam para a intensidade de qualquer ponto da imagem.

3.4.2 Efeitos da polarização

Na formação de franjas interferométricas, a luz dos feixes combinados deve ter a mesma polarização. Se um feixe laser for dividido e os dois componentes estiverem polarizados ortogonalmente, não ocorrerá interferência. A maioria dos lasers emite radiação linearmente polarizada. No entanto, alguns cuidados são necessários sempre que os feixes sofram múltiplas reflexões que alterem a posição relativa da polarização dos feixes.

Felizmente, a maioria dos objectos difusores difundem a luz uma forma aleatoriamente polarizada, pelo que haverá sempre componentes que têm a mesma polarização.

3.4.3 Descorrelação dos padrões de speckle

Um *speckle* é uma assinatura única que especifica a localização dum elemento microscópico da superfície e que está dependente da iluminação e da sua rugosidade. Os *speckles* individuais não mudam se a superfície se move, movendo-se com a superfície. A metrologia *speckle* envolve a gravação e a combinação de padrões de *speckle* para estados diferentes de uma superfície. Para que estes métodos funcionem, é necessário que os dois padrões de *speckle* se mantenham correlacionados entre si. Se um *speckle* se move tanto que a sua assinatura fundamental é alterada, ou se move tanto que não seja possível compará-lo com a primeira versão, então perde-se a correlação e não é possível fazer-se a medição do movimento.

A descorrelação é dependente do tamanho do *speckle* e da abertura do sistema óptico e limita a gama de deslocamentos para os quais os métodos *speckle* podem ser utilizados.

3.5 Medição no plano com ESPI

De acordo com o que foi dito anteriormente é possível determinar um vector sensibilidade para as técnicas de interferometria. A montagem convencional de ESPI está especialmente adaptada para medição de deslocamentos fora do plano. Contudo é possível obter uma configuração para medições no plano sem perda de sensibilidade nem resolução. Para tal, basta utilizar uma montagem de dupla iluminação [22] ou com dupla observação. Este interferómetro foi proposto pela primeira vez por Leendertz [28]. Na Figura 3.20 está esquematicamente representado este interferómetro na configuração de dupla iluminação.

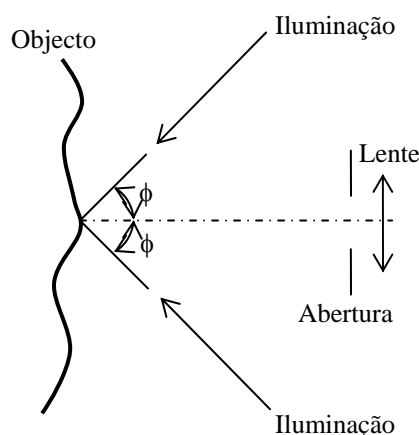


Figura 3.20 Interferómetro para medir deslocamentos no plano [22].

Como pode observar-se, trata-se de um interferómetro com referência de *speckle*. Com esta montagem, são utilizados dois feixes colimados, igualmente inclinados em relação à superfície para medir deslocamentos que ocorram no plano desta [22].

Contudo, utilizando uma montagem baseada na Figura 3.20, só seria possível medir os deslocamentos numa direcção. A medição de deslocamentos no plano segundo duas direcções com ESPI necessita de, pelo menos, dois planos de iluminação. Para condições de

carregamento estático é aceitável a gravação de dois interferogramas consecutivos. No entanto, para situações em que os campos de tensões dependem do tempo, são necessários os dois planos de iluminação em simultâneo, para que a gravação seja feita em condições de deformação idênticas.

O primeiro trabalho desenvolvido para a medição dos deslocamentos em duas direcções ortogonais foi realizado por Jones e Leendertz [29]. Estes investigadores desenvolveram um interferómetro de padrões de *speckle* com três feixes para medir deformações no plano. Neste sistema a superfície da estrutura ou componente, D, é iluminada por feixes colimados, I_1 e I_2 na Figura 3.21, simultaneamente a região adjacente é iluminada pelos feixes I_1 e I_3 . A deformação superficial produzia dois padrões de franjas correspondendo às duas diferentes áreas de iluminação. O tensor das deformações da superfície poderia ser determinado a partir do interferograma composto, mas apenas ao longo da linha de intercepção dos dois padrões de franja.

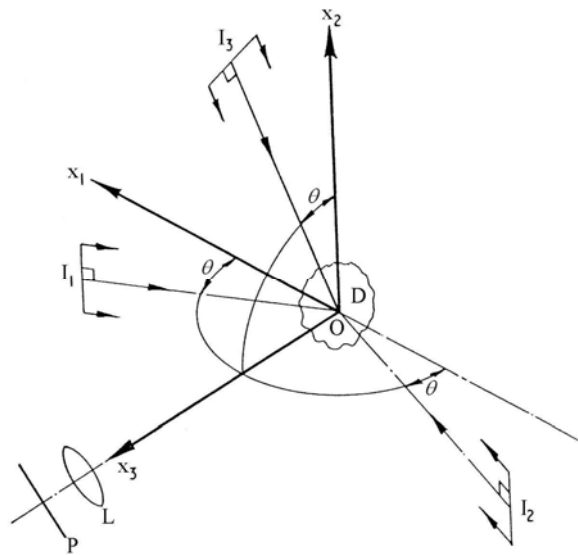


Figura 3.21 Montagem óptica para ESPI sensível ao plano.

A Figura 3.21 representa, esquematicamente, a configuração de iluminação necessária para o ESPI sensível no plano. Os feixes colimados I_1 e I_2 pertencem ao plano x_1x_3 , que incidem sobre uma superfície plana dum provete com ângulos iguais, θ , relativamente ao eixo x_1 . A imagem *speckle* da superfície do provete passa pela lente L e é formada no plano focal da câmara, P, este é paralelo ao plano x_1x_2 . A imagem da superfície antes de deformar é gravada em memória electrónica.

Quando os feixes I_1 e I_2 têm estados equivalentes de polarização e são mutuamente coerentes, a intensidade da imagem de referência para qualquer posição (x, y) do *pixel* pode ser aproximada por:

$$I_{ref} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \psi \quad (3.58)$$

Onde $I_1(x, y)$ e $I_2(x, y)$ são as intensidades da luz difusa dos feixes I_1 e I_2 respectivamente e $\psi(x, y)$ é a fase e que depende da variação dos comprimentos ópticos. Os movimentos da

superfície nas direcções x_2 e x_3 provocam variações iguais do comprimento óptico para ambos os feixes, e a fase do *speckle* na imagem não é alterada. Contudo, se ocorrer um deslocamento elementar dum ponto da superfície na direcção x_1 , $dx_1(x, y)$ origina uma variação de fase $(4\pi \cos \theta dx_1(x, y))/\lambda$ entre os dois feixes. Denominando essa variação de fase por $\varphi(x, y)$, admitido que $I_1(x, y)$ e $I_2(x, y)$ se mantêm constantes, a intensidade da imagem após deformação na posição (x, y) vale:

$$I_{def} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\psi + \varphi) \quad (3.59)$$

Se a imagem de referência (não deformada), gravada em memória, for subtraída à imagem deformada, a distribuição da intensidade representada no monitor de vídeo, é igual a:

$$I = I_{def} - I_{ref} = 2\sqrt{I_1 I_2} (\cos(\psi + \varphi) - \cos \psi) \quad (3.60)$$

Uma vez que $\varphi(x, y)$ está relacionado com $dx_1(x, y)$, as franjas podem ser interpretadas como contornos de deslocamento constante na direcção de x_1 . O vector sensibilidade desta montagem encontra-se ao longo do eixo x_1 , pelo que, o deslocamento dx_2 e a ordem da franja n estão relacionados pela seguinte equação [21].

$$n = \frac{2d_{x_1} \sin \theta}{\lambda} \quad (3.61)$$

θ é o ângulo entre cada um dos feixes e a direcção normal à superfície, λ é o comprimento de onda do feixe de luz utilizado.

Se os feixes de iluminação forem rodados para as posições I_3 e I_4 no plano $x_2 x_3$ (Figura 3.22), o interferómetro torna-se apenas sensível aos deslocamentos paralelos ao eixo x_2 . Um interferómetro que contenha os dois pares de feixes I_1, I_2 e I_3, I_4 permite a gravação dos dois interferogramas, a partir dos quais será possível a determinação do campo de deslocamentos bidimensional. Contudo, a menos que os campos de *speckle* produzidos pelos dois pares de feixes possam ser distinguidos, o interferómetro fica restringido a gravações sequenciais dos dois interferogramas.

Uma solução possível para esta limitação seria iluminar com comprimentos de onda λ_1 para as direcções de iluminação I_1, I_2 e λ_2 para I_3, I_4 . O campo *speckle* associado a ambos os vectores sensibilidade seria obtido para um determinado comprimento de onda. Como não existe interferência entre os dois campos de *speckle*, as duas imagens têm de ser gravadas em duas câmaras separadas. Para separar ambos os padrões de *speckle* um cubo divisor de feixe e filtros passa banda poderiam ser utilizados. Neste caso os dois interferogramas não podem ser directamente comparados uma vez que os padrões de franja dependem do comprimento de onda (equação (6.61)).

Moore e Tyrer [30, 31] desenvolverem um método alternativo, em que a iluminação é feita usando um único comprimento de onda para ambos os pares de feixes. Neste caso os dois campos de *speckle* difundidos da superfície do objecto são mutuamente coerentes mas polarizados ortogonalmente pelo que, não interferem. Os feixes podem ser ligados

alternadamente para a gravação numa só câmara ou separados por um cubo divisor de feixe (PBS) sensível à polarização e gravados simultaneamente em duas câmaras diferentes. Este sistema está representado esquematicamente na Figura 3.22.

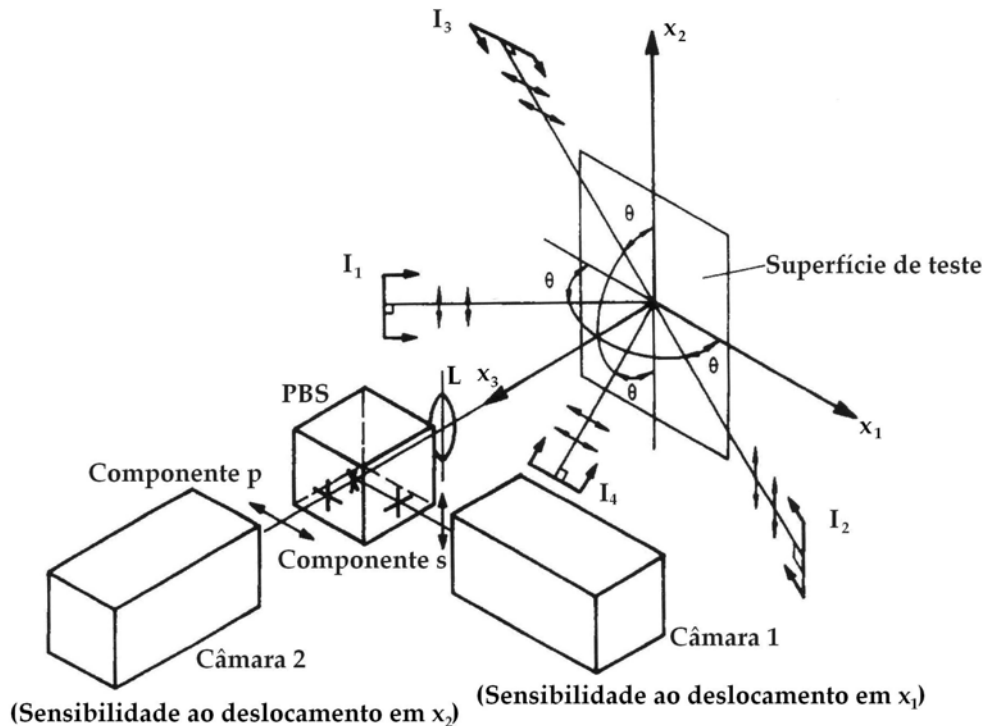


Figura 3.22 Representação esquemática do interferómetro que permite a distinção dos interferogramas da direcção vertical e horizontal pelos vectores polarização [30].

O sucesso desta técnica está dependente do estado de polarização dos dois campos de *speckle*. Contudo, podem ocorrer estados de polarização intermédios que são parcialmente transmitidos e reflectidos, com uma razão de separação determinada pelos estados de polarização. Desta forma existirá passagem de luz de uma montagem para a outra acarretando uma perda de contraste nos padrões de franjas. A natureza da superfície do provete contribui para a despolarização da frente de onda difusa, e, como tal, deve sempre ser tomada em consideração.

3.6 Medição com ESPI radial

O ESPI radial é uma técnica de medição de deslocamentos no plano desenvolvida por Albertazzi [1] para aplicação na medição de tensões residuais. Este investigador desenvolveu um interferómetro que pode ser aplicado em diferentes técnicas de medição de tensões residuais, técnica do furo [32, 33], indentação [34] e aquecimento localizado [35]. Neste ponto descrevem-se os princípios do interferómetro radial para medição de deslocamentos radiais no plano.

A Figura 3.23 representa a secção transversal do interferómetro radial [36]. O componente mais importante consiste num espelho cónico que é colocado próximo da superfície do provete. Na figura representam-se esquematicamente dois raios de luz gerados pelo espelho a

partir de um feixe de iluminação colimado. Cada raio de luz é reflectido da superfície do espelho cónico na direcção do ponto P que se encontra sobre a superfície do provete. Os dois raios atingem o ponto P simetricamente. As direcções de iluminação estão indicadas pelos vectores unitários \vec{n}_A e \vec{n}_B e têm o mesmo ângulo relativamente à normal da superfície. A direcção do vector sensibilidade é determinada pelo vector \vec{k} obtido a partir da subtracção dos dois vectores unitários. Como o ângulo é o mesmo para ambos os raios de luz, obtém-se a sensibilidade no plano do ponto P. Esta análise pode ser feita, na mesma secção transversal, para cada ponto da superfície do provete e pode ser estendida para qualquer secção transversal do espelho cónico. Se o ponto central for mantido fora desta análise, demonstra-se que o vector sensibilidade \vec{k} é paralelo à superfície do provete e poderá determinar-se a sensibilidade radial no plano.

Na Figura 3.24 representa-se esquematicamente a montagem de um interferómetro radial, com modulação temporal de fase, para medir deslocamentos no plano. Um feixe colimado é reflectido por um espelho plano que faz um ângulo de 45° com o eixo axial em direcção ao espelho cónico. O furo central do espelho plano evita que a luz laser atinja directamente a superfície do provete, podendo originar uma tripla iluminação. Este furo permite, também, a instalação duma câmara CCD para visualizar a imagem da superfície que se pretende analisar. A intensidade da luz não é constante em toda a área circular iluminada da superfície do provete, sendo particularmente intensa no ponto central. Este ponto recebe a contribuição da iluminação de todas as secções transversais pelo que surgirá um pouco mais brilhante no centro da região circular de medição e reduzirá a qualidade das franjas. Para evitar este efeito, utiliza-se um espelho cónico dividido em duas partes separadas por um pequeno intervalo. Actuadores piezoeléctricos (PZT) são colocados entre os dois espelhos para permitir o registo com “*phase shift*”. Esta adaptação da montagem permitirá utilizar técnicas de processamento de imagem para o cálculo de fase como, por exemplo, o método Carré [37, 38].

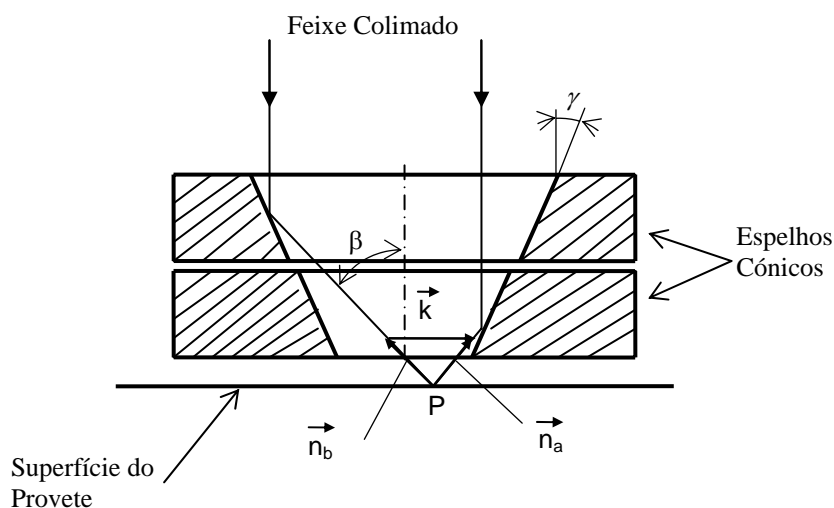


Figura 3.23 Secção transversal do espelho cónico indicando a direcção do vector de sensibilidade radial no plano [39].

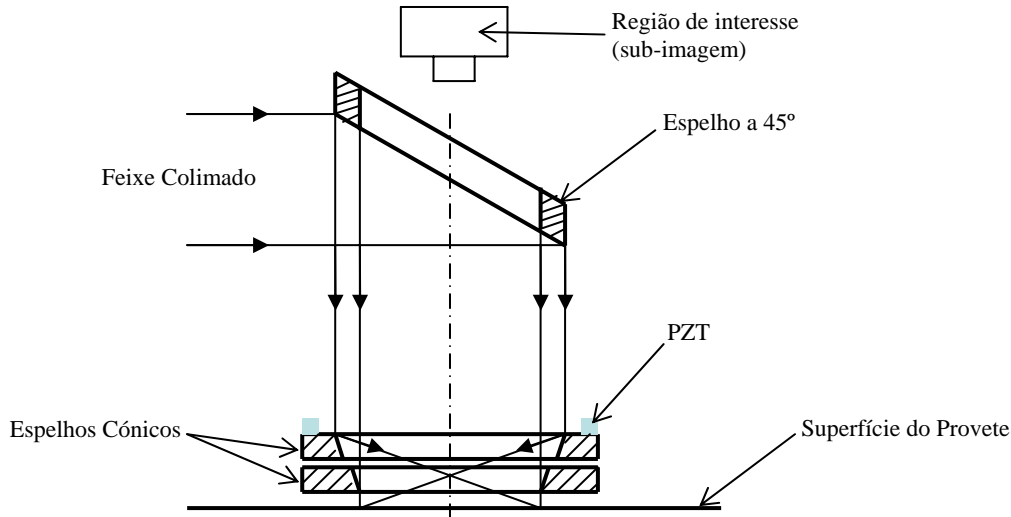


Figura 3.24 Montagem óptica do interferómetro [39].

Neste interferómetro o campo de deslocamentos $u(x, y)$ no plano da superfície dum objecto, é também obtido com dupla iluminação simétrica. A equação básica que permite obter os deslocamentos a partir de registos obtidos com este interferómetro é:

$$u(x, y) = \frac{\phi(x, y)\lambda}{4\pi \sin \beta'} \quad (3.62)$$

$\phi(x, y)$ representa a diferença de fase óptica devida à deformação do objecto, λ representa o comprimento de onda do feixe de luz e β é o ângulo entre a direcção de iluminação e a direcção normal à superfície do provete. O campo de deslocamentos resultante da libertação de tensões pode ser calculado por técnicas de processamento de imagem combinadas com técnicas de *phase shifting* [38]. Neste caso são adquiridas 4 imagens *phase-shifted*, sequencialmente, antes e depois da introdução do furo. A utilização de 4 imagens permite diminuir o efeito do erro na imposição de fase e a obtenção de mapas de fase com melhor qualidade [40]. Este método tem também a vantagem de ser independente do valor de *phase shift* desde que seja garantida que a variação dos ângulos é constante.

Usando um feixe de luz colimada, pode verificar-se que a variação do comprimento do caminho óptico é exactamente o mesmo para cada ponto da superfície iluminada. A relação entre o deslocamento ΔPZT do transdutor piezoeléctrico e a variação do comprimento óptico ΔOPL é dado pela seguinte equação [36].

$$\Delta OPL = [1 - \cos 2\gamma] \Delta PZT \quad (3.63)$$

γ representa o ângulo entre o eixo do espelho cónico e a sua superfície em qualquer secção transversal.

3.7 Correlação digital de imagem

A correlação digital de imagem é uma técnica de medição em que se utiliza um método de correlação matemática para calcular o deslocamento no plano em superfícies de componentes

ou estruturas sujeitas a tensões térmicas ou mecânicas. Nesta técnica são capturadas imagens consecutivas durante a sollicitação. Estas imagens são depois correlacionadas duas a duas para calcular os deslocamentos ocorridos [41].

A correlação digital de imagem baseia-se na utilização de padrões aleatórios existentes na superfície dos componentes ou estruturas. A técnica compara duas imagens, adquiridas em diferentes estados, uma antes da deformação e outra após deformação. As duas imagens podem, também, ser designadas como imagem de referência (antes da deformação) e imagem deformada.

Nesta técnica o objecto é iluminado por uma fonte de luz não coerente, sendo os padrões de intensidade resultantes da textura da superfície. Estes padrões de intensidade, que deverão ter uma distribuição aleatória, serão subdivididos em áreas de menores dimensões. Cada subdivisão, definida na imagem inicialmente gravada será depois comparada por correlação com imagens obtidas para estados diferentes de deformação do objecto, $f(x, y)$ e $f^*(x^*, y^*)$. O deslocamento médio relativo de cada uma das subdivisões de imagem pode ser conhecido a partir das dimensões reais da imagem [42].

A Figura 3.25 representa o processo de correlação de imagem na sua forma mais simples. São captadas duas imagens duma superfície em dois estados de tensão diferentes. Neste caso, antes e depois de sofrer um aumento de temperatura provocado por um aquecimento externo. É observada uma pequena região (denominada sub-imagem) no estado anterior ao aquecimento e após o aquecimento é capturada outra imagem onde vai procurar-se a sub-imagem correspondente ao estado anterior. Utilizando algoritmos de correlação cruzada, o valor do deslocamento que ocorre entre ambas é calculado com uma precisão igual a uma fracção do tamanho do *pixel* da câmara CCD usada para a captura das imagens. É depois calculado um vector de movimento para cada sub-imagem. A partir das imagens, o algoritmo determina os vectores que relacionam a localização das sub-imagens na segunda imagem (isto é, uma matriz de $N \times N$ *pixels*) relativamente à sua localização na imagem de referência. É então calculada uma matriz de vectores de deformação das sub-imagens, mostrando a deformação relativa das diferentes partes do provete dentro do campo de visão do sistema óptico.

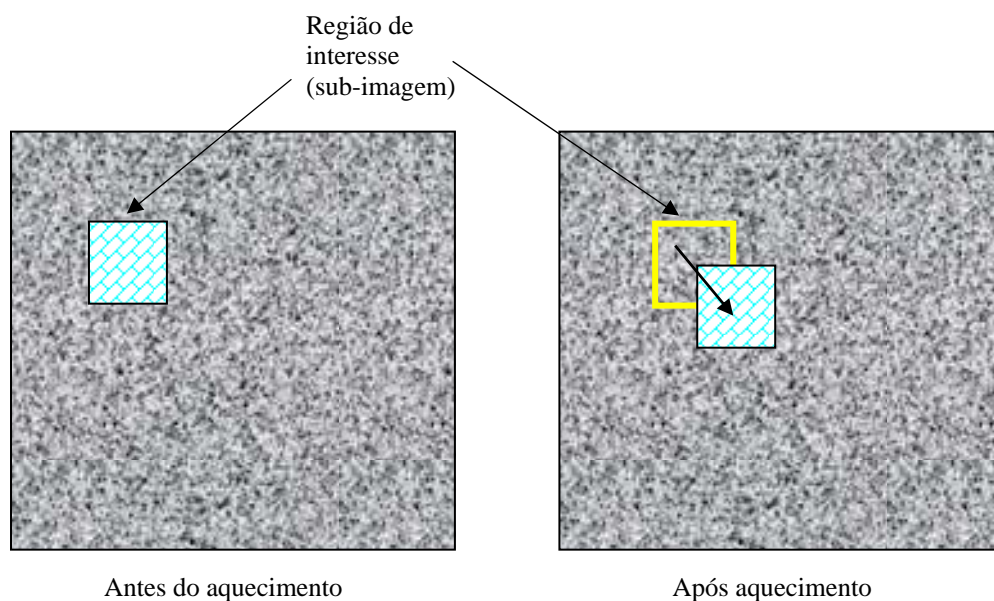


Figura 3.25 Princípio básico da correlação de imagem.

Na Figura 3.26 está representada esquematicamente a montagem óptica utilizada na correlação digital de imagem.

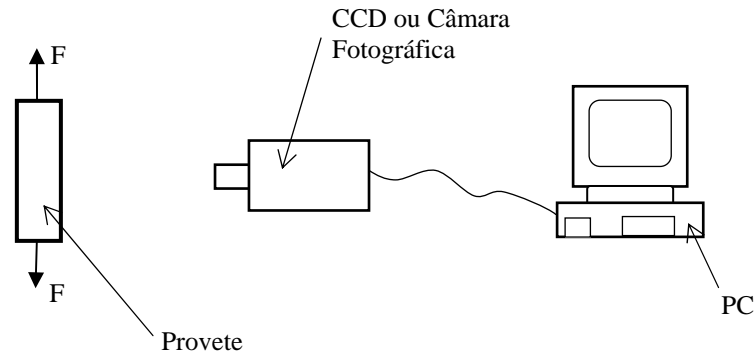


Figura 3.26 Esquema duma montagem óptica para a correlação de imagem digital.

Este método de medida como resultado da sua baixa resolução, apresenta como vantagem, uma reduzida sensibilidade às perturbações externas ao contrário das técnicas interferométricas. A sensibilidade desta técnica está, no entanto, limitada pela resolução da câmara e pela área de medição. O deslocamento absoluto medido na subdivisão i entre duas imagens pode definir-se como sendo:

$$\Delta L_j = \Delta L_{o_{i-1,j}} + \varepsilon_j \ell_{i,j}$$

onde ε_j é a deformação no plano, $\ell_{i,j}$ comprimento inicial da subdivisão e $\Delta L_{o_{i-1,j}}$ o deslocamento relativo na subdivisão $i-1$ para cada uma das duas direcções ortogonais j .

No entanto, a sensibilidade desta técnica é medida pelo deslocamento relativo da mesma subdivisão de duas imagens diferentes, ou seja, a variação de comprimento ΔL de cada subdivisão é definida por:

$$\Delta L = \frac{\varepsilon_j * np_j}{ndiv_j} * L_j$$

sendo np_j resolução da câmara na direcção j , $ndiv_j$ número de divisões na direcção j e L_j o comprimento de medição na direcção j do plano [39].

A inclusão desta técnica óptica, correlação digital de imagem clássica, inseriu-se num estudo mais abrangente de técnicas ópticas para medição de deslocamentos. Pretendeu-se, nesta análise, caracterizar as principais técnicas ópticas de medição de deslocamentos no plano e que vão desde a medição de valores muito baixos, em que há necessidade de técnicas de elevada resolução (Moiré interferométrico, interferometria holográfica e ESPI) até valores de deslocamentos de mais elevados e onde a resolução de medição é relativamente baixa (Moiré geométrico e correlação digital de imagem). Por isso, se considerou a análise desta técnica que, apesar de não permitir a medição de tensões residuais, ela é incluída como um exemplo duma técnica alternativa para medição grandes deslocamentos no plano e que para algumas aplicações pode ser utilizada com grandes vantagens, especialmente a fácil preparação das superfícies a medir, não necessita de equipamento óptico muito caro (lasers ou espelhos), não ocorre descorrelação de imagem nem é sensível a movimentos de corpo rígido.

Referências:

- [1] Albertazzi Jr., A., Kanda, C., Borges, M. R., Hrebabetzky, F., *Portable Residual Stresses Measurement Device Using ESPI and a Radial In-Plane Interferometer*, Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry, Albertazzi Jr., A., Eds., Proc. SPIE, 4420, 2001, pg. 112-122.
- [2] Cloud, G., *Optical Methods of Engineering Analysis*, Cambridge University Press, 1998.
- [3] Dally, J. W. and Riley, W. F., *Experimental Stress Analysis*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [4] Durelli, A. J., Parks, V. J., *Moiré Analysis of Strain*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1970.
- [5] Morse, S. et al, Geometry of Moiré fringes in strain analysis, Transactions of American society of Civil Engineers, 1961, 126-I.
- [6] Post, D., *The Moiré grid-analyzer method for strain analysis*, Experimental Mechanics, 5, 11, 1965, pg 368-377.
- [7] Riley, W. F., Durelli, A. J., *Application of Moiré methods to the determination of transient stress and strain distributions*, Journal of Applied Mechanics, 29, 1, 1962.
- [8] Theocaris, P. S., *Moiré Fringes in Strain Analysis*, New York, Pergamon Press, 1969.
- [9] Parks, V. J., *Geometric Moiré. Handbook on Experimental Mechanics*, 2nd ed., edited by Albert S. Kobayashi, 1993.
- [10] Post, D., Han, B., Ifju, P., *High Sensitivity Moiré – Experimental Analysis for Mechanics and Materials*, Edited Springer-Verlag, New York, 1994.
- [11] Sciammarella, C. A., *The Moiré method – a review*, Experimental Mechanics, 22, 11, 1982, pg. 418-432.
- [12] Dantu, P., *Extension of the Moiré method to thermal problems*, Experimental Mechanics, 4, 3, 1964, pg. 64-69.
- [13] Sciammarella, C. A., *Basic optical law in the interpretation of Moiré patterns applied to the analysis of strains – part I*, Experimental Mechanics, 5, 5, 1965, pg. 154-160.
- [14] Voloshin, A. S., et al, *Fractional Moiré strain analysis using digital imaging techniques*, Experimental Mechanics, 26, 3, 1986, 254-258.
- [15] McKelvie, J., *On the limits to the information obtainable from a Moiré fringe pattern*, Proc. Spring 1986 Conference on Experimental Mechanics, Bethel, 1986, pg. 971-990.
- [16] Guild, J., *The Interference Systems of Crossed Diffraction Gratings*, Clarendon Press, Oxford, 1956.
- [17] Dai, F., McKelvie, J., Post, D., *An Interpretation of Moiré Interferometry from Wave-front Interference Theory*, Optics and Lasers in Engineering, 12, 2, 1990, pg. 101-108.
- [18] Czarnek, R., *Three-Mirror, Four-Beam Moiré Interferometer and its Capabilities*, Optics and Lasers in Engineering, 15, 2, 1991, pg. 93-101.
- [19] Chang, B. et al, *Space-invariant Achromatic Grating Interferometers: Theory*, Applied Optics, 14, 7, 1975, pg. 1592-1600.
- [20] Czarnek, R., *High Sensitivity Moiré Interferometry with Compact Achromatic Interferometer*, Optics and Lasers in Engineering, 13, 1990, pg. 99-115.

- [21] Swanson, G. J., *Broad-source Fringes and Conventional Interferometers*, J. Optical Society of America, 1, 12, 1984, 1147-1153.
- [22] Vaz, M., *Interferometria Laser e Métodos Híbridos em Mecânica Experimental*, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1995.
- [23] Vest, C., *Holographic Interferometry*, John Wiley and Sons, New York, 1979.
- [24] Smith, H., *Principles of Holography*, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, 1975.
- [25] Taylor, C., Holography. In *Manual on Experimental Stress Analysis*, 5th ed., Ed. J. F. Doyle and J. W. Phillips, Bethel, CT: Society for Experimental Mechanics, 1989, pg. 136-149.
- [26] Cloud, G., *Optical Methods of Engineering Analysis*, Cambridge University Press, 1998, pg 346.
- [27] Jones, R., Wykes, C., *Holographic and Speckle Interferometry*, Cambridge University Press, 1983.
- [28] Leendertz, J. A., *Interferometric Displacement Measurement on Scattering Surfaces Utilizing Speckle Effect*, Journal of Physics E (Sci. Instrum), Vol. 3, 1970, pg. 214-218.
- [29] Jones, R., Leendertz, J. A., *Elastic constant and strain measurement using a three beam speckle pattern interferometer*, Journal of Physics E (Sci. Instrum), Vol. 7, 1974, pg. 653-657.
- [30] Moore, A. J., Tyrer, J. R., *An electronic pattern interferometer for complete in-plane displacement measurement*, Measur. Scien. Technol., 1, 1990, pg. 1024-1030.
- [31] Moore, A. J., Tyrer, J. R., *Two-dimensional Strain Measurement with ESPI*, Optics and Lasers in Engineering, 24, 1996, pg. 381-402.
- [32] Diaz, F. V., A., Kaufmann, G. H., Galizzi, G. E., *Determination of residual stresses using drilling and digital speckle pattern interferometry with automated data analysis*, Opt. and Laser Engineering, 33, 2000, pg. 39-48.
- [33] Viotti, M. R., A., Kaufmann, G. H., *Accuracy and sensitivity of a hole drilling and digital speckle pattern interferometry combined technique to measure residual stresses*, Opt. and Laser Engineering, 41, 2004, pg. 297-305.
- [34] Sutério, R., Albertazzi, A., et all, *Residual stress measurement using indentation and a radial in-plane ESPI interferometer*, Eight International Symposium on Laser Metrology, In Pro. of SPIE on CD-ROM, Yucatan, 5776, 2005, pg. 735-745.
- [35] Viotti, M. R., Albertazzi, A., Kaufmann, G. H., *Measurement of residual stresses using a radial in-plane digital speckle pattern interferometer and local heating – recent advances*, Eight International Symposium on Laser Metrology, In Pro. of SPIE on CD-ROM, Yucatan, 5776, 2005, pg. 709-716.
- [36] Viotti, M. R., Sutério, R., Albertazzi, A., Kaufmann, G. H., *Residual stress measurement using a radial in-plane speckle interferometer and laser annealing: preliminary results*, Opt. and Laser Engineering, 42, 2004, pg. 71-84.
- [37] Carré, P., *Installation et utilization du comparateur photoelectrique et interferenciel du Bureau International des Poids e Mesures*, Metrologia, 2, 1966, pg. 13-23.
- [38] Creath, K., Schmit, J., *N-point Spatial Phase-measurement Techniques for Non-destructive Testing*, Optics and Lasers in Engineering, 24, 1996, pg. 365-379.

- [39] Ribeiro, J., Lopes, H., Vaz, Piloto, *Técnicas de medição de deslocamentos no plano*, VI Encontro Nacional da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET), Poc., Açores, 2005.
- [40] Huntley, J., *Automated fringe pattern anal. In experimental mechanics: a review*, J. Strain Analysis, 1998, 33, pg. 105-125.
- [41] Standardised Project for Optical Techniques of Strain Measurement (SPOTS), *Standard Guide for Image Correlation for in-plane Displacement/Strain Analysis*, Annex A.6: SPOTS/TTA, 2005, consultar www.opticalstrain.org.
- [42] Chu, T., Ranson, W., Sutton, M., Peters, W., *Application of Digital Image Correlation Techniques to Experimental Mechanics*, Experimental Mechanics, vol. 25 (3), 232-244, 1985.

CAPÍTULO 4

MÉTODO DO FURO

4 MÉTODO DO FURO

4.1 Introdução

O método do furo com extensómetros eléctricos ou com rosetas extensométricas que foi descrito detalhadamente no capítulo 2, é um método muito utilizado na medição de tensões residuais. Apesar de tudo, este método apresenta alguns inconvenientes importantes. No caso do furo cego, a relaxação da tensão residual à superfície obtida com a furação está muito localizada na vizinhança da fronteira do furo e diminui rapidamente à medida que a distância ao furo aumenta. As dimensões (largura e comprimento) dum extensómetro são, normalmente, duas vezes o raio do furo, r_0 [1]. Como a região coberta pelo extensómetro é bastante grande relativamente à do campo de deformação relaxada, a deformação média medida no interior desta zona, pode ser uma má aproximação da deformação real no ponto de calibração. Nos métodos do furo incremental que utilizam extensómetros, só podem ser medidas as deformações no plano e segundo três direcções a partir duma roseta *standard*.

O ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometer*) com sensibilidade no plano, conjugado com o método do furo pode ser adaptado para a determinação dos perfis das tensões residuais, apesar da necessidade duma montagem óptica relativamente complexa para a medição em duas direcções. Uma nova montagem de ESPI, designada por ESPI radial foi desenvolvida por Albertazzi et al [2, 3, 4]. Este autor afirma que esta montagem permite utilizar a técnica do furo, para determinar as tensões residuais com elevada precisão e obter a medição radial para qualquer direcção em torno do furo.

Embora existam outros métodos ópticos para utilizar com a técnica do furo, como por exemplo a fotoelasticidade, estes são pouco sensíveis quando aplicado ao caso de tensões residuais não uniformes. Uma técnica que tem vindo a revelar-se de grande utilidade para esta aplicação é a interferometria de Moiré. Com esta técnica é possível realizar medições de campo em tempo real e com uma elevada resolução espacial bem como, uma elevada relação entre o sinal e ruído. A utilização desta técnica em combinação com o método do furo tem sido descrita em vários trabalhos que se encontram publicados sobre a caracterização de tensões residuais.

4.2 Solução analítica

A interferometria de Moiré fornece a cartografia dos contornos de igual deslocamento no plano. Os campos de deformação podem também ser obtidos por diferenciação, embora com uma baixa precisão, em resultado do processo de cálculo. Quando esta técnica é utilizada em conjugação com o método do furo, são os deslocamentos, mais do que as deformações, que são correlacionados com as tensões residuais. Por essa razão, apresenta-se nos pontos seguintes uma solução analítica exacta da relação entre deslocamento e tensões residuais.

4.2.1 Solução analítica, na ausência do furo, para uma placa isotrópica fina, sujeita a um estado de tensão biaxial uniforme

Quando são aplicadas tensões uniformes, σ_{xx} , σ_{yy} e τ_{xy} , a uma placa fina, de espessura uniforme e igual a t , de dimensões infinitas no plano, isotrópica e homogênea, tal como está indicado na Figura 4.1, o estado de tensão obtido é bidimensional e de fácil caracterização através do tensor das tensões.

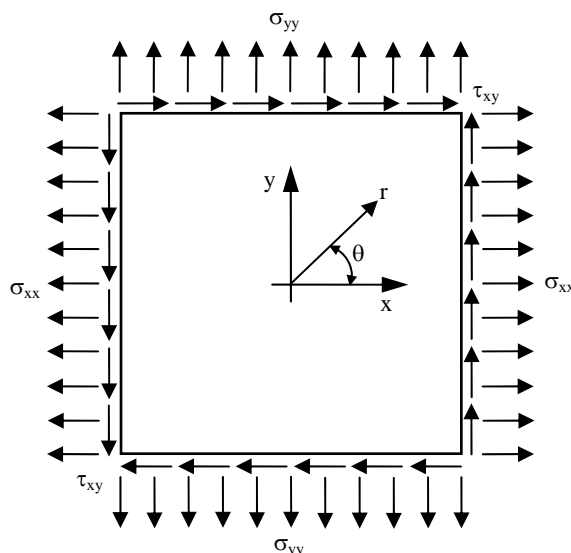


Figura 4.1 Campo de tensões planas biaxiais e uniformes aplicadas a uma placa fina de dimensões infinitas.

Assim sendo as componentes do tensor das tensões, σ , podem ser expressas em coordenadas cilíndricas da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} - \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta\end{aligned}\quad (4.1)$$

Utilizando a lei de Hooke generalizada, e as propriedades elásticas do material as deformações podem vir expressas do seguinte forma:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{rr} &= \frac{1}{E} \left[(1-\nu) \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + (1+\nu) \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \right) \right] \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{1}{E} \left[(1-\nu) \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} - (1+\nu) \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \right) \right]\end{aligned}\quad (4.2)$$

$$\varepsilon_{r\theta} = \frac{2(1+\nu)}{E} \left(-\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \right)$$

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\nu}{E} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$$

Em que E representa o módulo de elasticidade e ν o coeficiente de Poisson.

Em coordenadas cilíndricas as relações entre as deformações e os deslocamentos podem ser definidos pelas seguintes expressões:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} \tag{4.3}$$

$$\varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r}$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

Substituindo as equações (4.2) nas (4.3) e integrando as expressões, os deslocamentos podem ser aproximados por:

$$u_r = \frac{r}{E} \left[(1-\nu) \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + (1+\nu) \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \right) \right]$$

$$u_\theta = -\frac{r(1+\nu)}{E} \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta \right) \tag{4.4}$$

$$u_z = -\frac{\nu t}{E} \left(\frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \right), \quad z = \frac{t}{2}$$

4.2.2 Solução de Kirsch

Considerando que são aplicadas tensões biaxiais e uniformes ao longo duma placa fina, isotrópica e homogénea de dimensões infinitas com um pequeno furo passante no seu centro [5], tal como está representado na Figura 4.2.

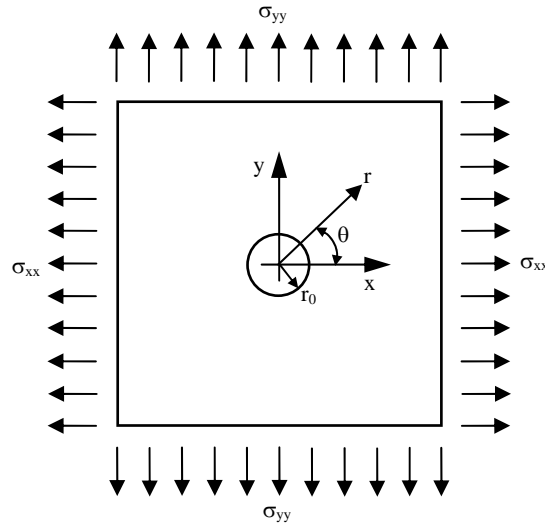


Figura 4.2 Campo de tensões planas, biaxiais e uniformes aplicadas a uma placa fina, de dimensões infinitas com um pequeno furo passante de raio r_0 .

O campo de tensões em torno do furo pode ser relacionada com as tensões aplicadas à distância, isto é, na fronteira da placa, da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2}(1 - \rho^2) + \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}(1 - 4\rho^2 + 3\rho^4)\cos 2\theta \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2}(1 + \rho^2) - \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}(1 + 3\rho^4)\cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}(1 + 2\rho^2 - 3\rho^4)\sin 2\theta\end{aligned}\quad (4.5)$$

Onde σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$ e $\tau_{r\theta}$ são as componentes do tensor de tensão, σ . Num sistema de coordenadas cilíndricas, $\rho = \frac{r_0}{r}$, em que r_0 representa o raio do furo, r representa a coordenada radial e θ a coordenada angular, do local onde se pretende caracterizar o estado de tensão.

Quando é aplicada uma tensão de corte uniforme, τ_{xy} , onde $\sigma'_{xx} = -\sigma'_{yy} = \tau_{xy}$ num novo sistema de coordenadas (r, θ') , $\theta' = \theta - \frac{\pi_0}{4}$. Então, a expressão completa deverá ter em conta a tensão de corte aplicada à distância:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2}(1 - \rho^2) + \left[\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \right](1 - 4\rho^2 + 3\rho^4) \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2}(1 + \rho^2) - \left[\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \right](1 + 3\rho^4) \\ \tau_{r\theta} &= \left[-\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\sin 2\theta + \tau_{xy}\cos 2\theta \right](1 + 2\rho^2 - 3\rho^4)\end{aligned}\quad (4.6)$$

Recorrendo à lei de Hooke generalizada, as deformações podem ser determinadas pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{rr} &= \frac{1}{E} \left\{ \left[(1-\nu) - (1+\nu)\rho^2 \right] \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \right. \\
&\quad \left. \left[(1+\nu) - 4\rho^2 + 3(1+\nu)\rho^4 \right] \left[\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \right] \right\} \\
\varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{1}{E} \left\{ \left[(1-\nu) - (1+\nu)\rho^2 \right] \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} - \right. \\
&\quad \left. \left[(1+\nu) - 4\nu\rho^2 + 3(1+\nu)\rho^4 \right] \left[\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \right] \right\} \\
\varepsilon_{r\theta} &= -\frac{2}{E} (1+\nu) (1+2\rho^2 - 3\rho^3) \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta \right) \\
\varepsilon_{zz} &= -\frac{\nu}{E} \left[2 \left(\frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \right) - 4\rho^2 \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \right) \right]
\end{aligned} \tag{4.7}$$

Pode calcular-se o campo de deslocamentos integrando as equações anteriores (4.7):

$$\begin{aligned}
u_r &= \frac{r_0}{E} \left\{ \left[(1-\nu) \frac{1}{\rho} + (1+\nu)\rho \right] \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \right. \\
&\quad \left. \left[(1+\nu) \frac{1}{\rho} + 4\rho - (1+\nu)\rho^3 \right] \left[\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \right] \right\} \\
u_\theta &= -\frac{r_0}{E} \left\{ \left[(1+\nu) \frac{1}{\rho} + 2(1-\nu)\rho + (1+\nu)\rho^3 \right] \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta \right) \right\} \\
u_z &= -\frac{\nu t}{E} \left[\frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} - 2\rho^2 \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \right) \right]
\end{aligned} \tag{4.8}$$

t é a espessura da placa.

4.2.3 Solução do furo

Quando é realizado um furo passante, os incrementos das tensões, das deformações e dos deslocamentos são obtidos subtraindo da solução de Kirsch a solução analítica com a ausência do furo:

$$\begin{cases}
\sigma_{rr} = -\frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \rho^2 - \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \right) (4\rho^2 - 3\rho^4) \\
\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \rho^2 - \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \right) 3\rho^4 \\
\tau_{r\theta} = \left(-\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \right) (2\rho^2 - 3\rho^4)
\end{cases} \tag{4.9}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= -\frac{1}{E} \left\{ (1+\nu) \rho^2 \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + [4\rho^2 - 3(1+\nu)\rho^4] \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \right) \right\} \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{1}{E} \left\{ (1+\nu) \rho^2 \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + [4\nu\rho^2 - 3(1+\nu)\rho^4] \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \right) \right\} \\ \varepsilon_{r\theta} &= -\frac{2}{E} (1+\nu) (2\rho^2 - 3\rho^3) \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta \right) \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{4}{E} \nu \rho^2 \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \right) \end{aligned} \right. \quad (4.10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} u_r &= \frac{r_0}{E} \left\{ (1+\nu) \rho \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + [4\rho - (1+\nu)\rho^3] \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \right) \right\} \\ u_\theta &= -\frac{r_0}{E} \left\{ [2(1-\nu)\rho - (1+\nu)\rho^3] \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta \right) \right\} \\ u_z &= \frac{2\nu t}{E} \rho^2 \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \right) \end{aligned} \right. \quad (4.11)$$

Onde E representa o módulo de elasticidade, ν o coeficiente de Poisson, $\rho = r_0/r$, r_0 : representa o raio do furo, r a coordenada radial, θ a coordenada angular, t a espessura da placa, σ_{xx} , σ_{yy} e τ_{xy} representam as tensões uniformes na placa num sistema de coordenadas cartesianas.

Considerando o caso particular duma placa fina, isotrópica, com um pequeno furo passante no seu centro e sujeita a uma tensão de tracção unidireccional na direcção do eixo Ox, as equações ((4.9), (4.10) e (4.11)) poderiam ser simplificadas obtendo-as na seguinte forma:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{rr} &= -\frac{\sigma_{xx}}{2} \rho^2 [1 + \cos 2\theta (4 - 3\rho^2)] \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{\sigma_{xx}}{2} \rho^2 (1 - 3\rho^2 \cos 2\theta) \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{\sigma_{xx}}{2} \rho^2 \sin 2\theta (2 - 3\rho^2) \end{aligned} \right. \quad (4.12)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= -\frac{\rho^2 (1+\nu) \sigma_{xx}}{E} \left\{ 1 + \left[\frac{4}{(1+\nu)} - 3\rho^2 \right] \cos 2\theta \right\} \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{\rho^2 (1+\nu) \sigma_{xx}}{E} \left\{ 1 + \left[\frac{4\nu}{(1+\nu)} - 3\rho^2 \right] \cos 2\theta \right\} \\ \varepsilon_{r\theta} &= -\frac{\sigma_{xx}}{E} (1+\nu) (2\rho^2 - 3\rho^3) \sin 2\theta \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{2\sigma_{xx}}{E} \nu \rho^2 \cos 2\theta \end{aligned} \right. \quad (4.13)$$

$$\begin{cases} u_r = \frac{r_0(1+\nu)\rho}{E} \frac{\sigma_{xx}}{2} \left\{ 1 + \left[\frac{4}{(1+\nu)} - \rho^2 \right] \cos 2\theta \right\} \\ u_\theta = -\frac{r_0}{E} \frac{\sigma_{xx}}{2} \left[2(1-\nu)\rho - (1+\nu)\rho^3 \right] \sin 2\theta \\ u_z = \frac{\sigma_{xx}}{2} \frac{2\nu t}{E} \rho^2 \cos 2\theta \end{cases} \quad (4.14)$$

Também neste caso as equações (4.13) podem ser reescritas duma maneira simplificada como se mostra nas equações (4.15). Desta forma se demonstra que ao longo de qualquer círculo de raio r ($r \geq r_0$), as deformações tangencial e radial relaxadas variam duma forma sinusoidal, como representado na Figura 4.3.

$$\begin{cases} \varepsilon_{rr} = \sigma_{xx} (A + B \cos 2\theta) \\ \varepsilon_{\theta\theta} = \sigma_{xx} (-A + C \cos 2\theta) \end{cases} \quad (4.15)$$

Os coeficientes A , B e C são definidos por,

$$\begin{cases} A = -\frac{1+\nu}{2E} \rho^2 \\ B = -\frac{1+\nu}{2E} \left[\left(\frac{4}{1+\nu} \right) \rho^2 - 3\rho^4 \right] \\ C = -\frac{1+\nu}{2E} \left[-\left(\frac{4\nu}{1+\nu} \right) \rho^2 + 3\rho^4 \right] \end{cases} \quad (4.16)$$

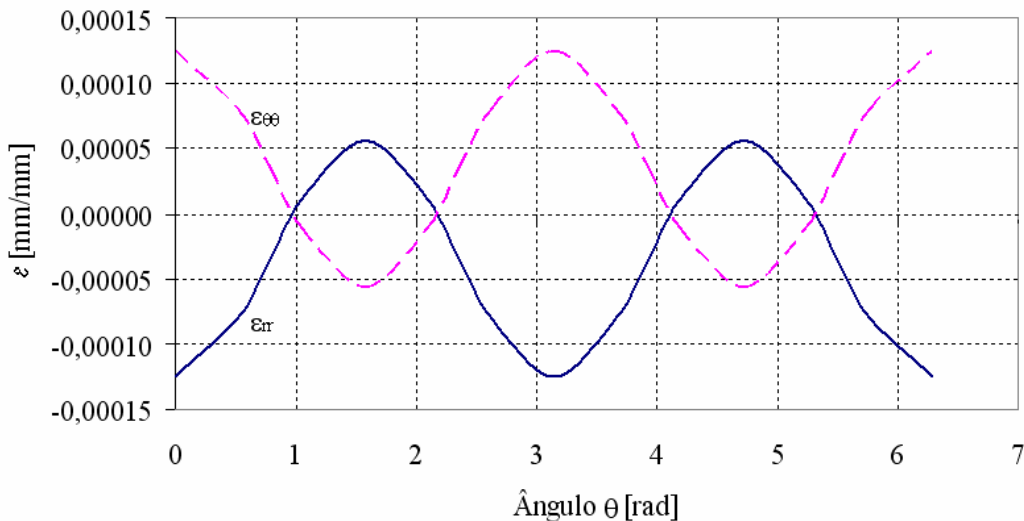


Figura 4.3 Variação das deformações ε_{rr} e $\varepsilon_{\theta\theta}$ ao longo dum círculo em torno do furo.

Então, também as deformações aliviadas variam, duma forma complexa, com o aumento da distância ao bordo do furo. Esta variação está ilustrada na Figura 4.4, onde se representa a variação das deformações ao longo dos eixos principais, neste caso orientados segundo $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$.

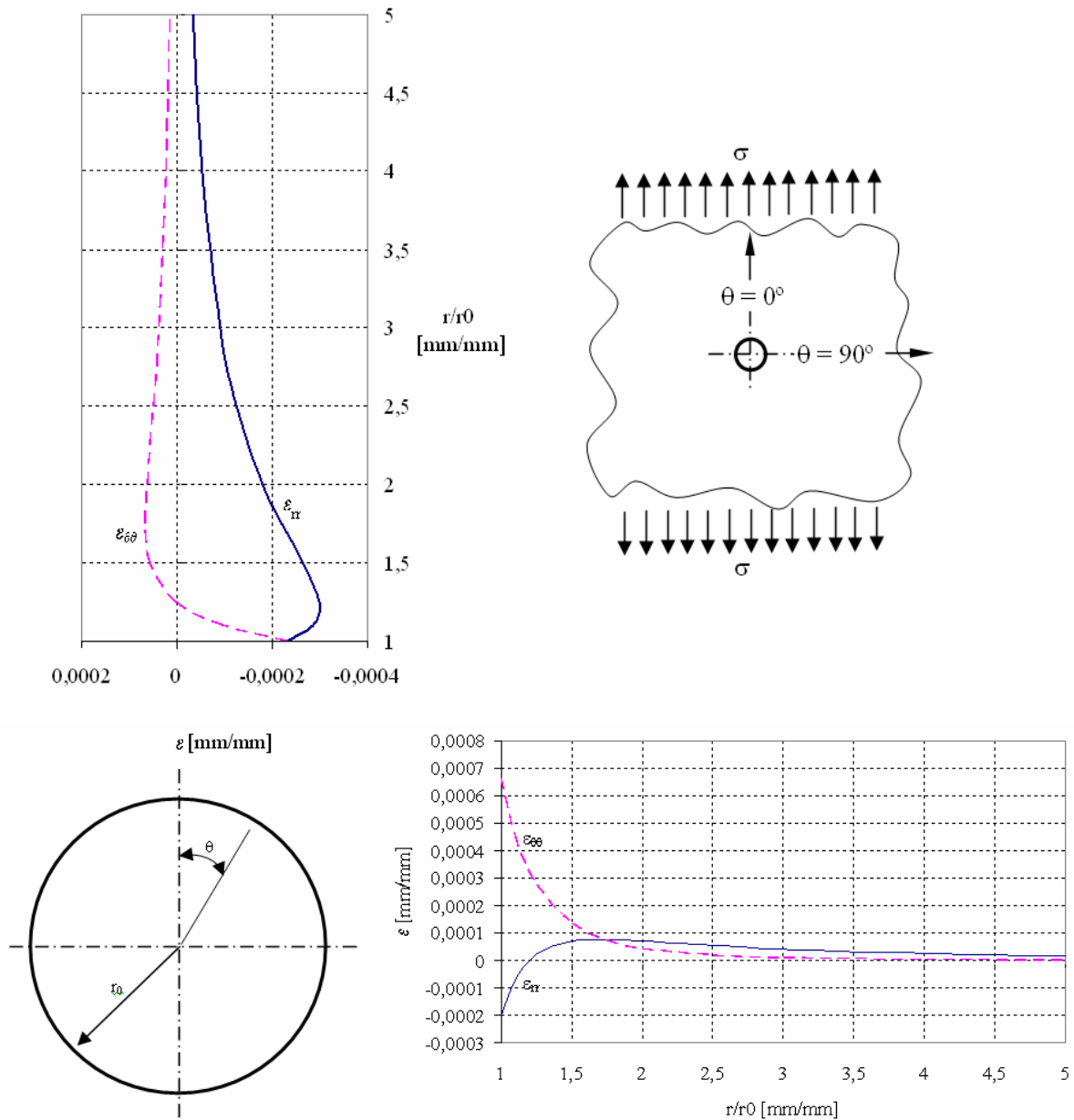


Figura 4.4 Variação das deformações ϵ_{rr} e $\epsilon_{\theta\theta}$, aliviadas, com o aumento da distancia ao bordo do furo (nos eixos principais) para o caso de tensões uniaxiais.

Observando a Figura 4.4 pode verificar-se que o alívio das deformações geralmente decresce à medida que aumenta a distância ao centro do furo. Por este facto, é desejável que a medição das deformações seja feita próxima do bordo do furo de maneira a maximizar o campo de medição. Por outro lado, nessa região há um aumento dos efeitos parasitas (efeito da concentração de tensões, tensões residuais provocadas pelo processo de remoção de material e, em alguns casos, pode ocorrer um anel de plastificação em torno do furo). Deverá ter-se em consideração estes aspectos para selecção do raio, r , óptimo para se executar uma medição mais correcta das tensões residuais, minimizando o erro. Para o caso dos extensómetros eléctricos, após vários estudos analíticos e experimentais estabeleceu-se uma extensão óptima de $0.3 < \rho < 0.45$, onde $\rho = r_0/r$ sendo r o raio de posição longitudinal da grelha do extensómetro.

4.3 Solução da série de Fourier para o caso do método do furo

4.3.1 Série de Fourier de primeira ordem

As equações (4.9), (4.10) e (4.11) só podem ser aplicadas para o caso dos furos passantes. Como é muito difícil encontrar uma solução exacta para o caso dos furos cegos, Schager [6] propôs em 1981 uma solução baseado na série de Fourier, de forma a ter em consideração os efeitos dos deslocamentos fora do plano:

$$\begin{aligned}
 u_r(r, \theta, z) &= \sum_{n=0}^{\infty} u_{rn}(r, z) \cos n\theta \\
 u_\theta(r, \theta, z) &= \sum_{n=0}^{\infty} u_{\theta n}(r, z) \sin n\theta \\
 u_z(r, \theta, z) &= \sum_{n=0}^{\infty} u_{zn}(r, z) \cos n\theta
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

Onde u_{rn} , $u_{\theta n}$ e u_{zn} são as contribuições da n componente do deslocamento total u_r , u_θ e u_z , num sistema de coordenadas cilíndricas. A distribuição da carga correspondente a cada valor de n tem a mesma forma harmónica e por conseguinte, $n = 0, \pm 2, \pm 4, \dots$

Na primeira ordem desta aproximação, $n = 0, 2$, quando existem tensões residuais biaxiais, sendo a solução em série de Fourier expressa por:

$$u_r(r, \theta) = A(\sigma_x + \sigma_y) + B[(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + 2\tau_{xy} \sin 2\theta] \tag{4.18}$$

$$u_\theta(r, \theta) = C[(\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta + 2\tau_{xy} \cos 2\theta] \tag{4.19}$$

$$u_z(r, \theta) = F(\sigma_x + \sigma_y) + G[(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + 2\tau_{xy} \sin 2\theta] \tag{4.20}$$

Onde σ_{xx} , σ_{yy} e τ_{xy} representam as componentes das tensões residuais num sistema de coordenadas cartesianas; u_r , u_θ e u_z , são os deslocamentos da superfície em torno do furo num sistema de coordenadas cilíndricas, enquanto que A , B , C , F e G representam os coeficientes intermédios que dependem das características do material e dos parâmetros geométricos do furo cego.

Considerando a solução da equação (4.11) para um furo passante, no caso de um problema de tensões planas, os coeficientes intermédios seriam determinados com as expressões:

$$A = \frac{r_0}{2E}(1+\nu)\rho$$

$$B = \frac{r_0}{2E}[4\rho - (1+\nu)\rho^3]$$

$$C = -\frac{r_0}{2E}[2(1-\nu)\rho - (1+\nu)\rho^3]$$

$$F = 0$$

$$G = \frac{\nu t}{E}\rho^2$$

4.3.2 Determinação dos coeficientes de calibração para a medição de tensões residuais médias

Os coeficientes A , B , C , F e G das equações (4.18), (4.19) e (4.20), podem ser determinados por elementos finitos recorrendo a uma análise tridimensional com dois tipos específicos de carregamento:

- (1) No primeiro, impõe-se uma sollicitação do tipo, $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma$, $\tau_{xy} = 0$, que representa um campo de tensões residuais equi-biaxiais. Nas equações (4.18) e (4.20), podem ser determinados os coeficientes A e F ,

$$A\left(E, \nu, r_0, r, \frac{h}{d_0}\right) = \frac{u_r(r, \theta)}{2\sigma} \quad F\left(E, \nu, r_0, r, \frac{h}{d_0}\right) = \frac{u_z(r, \theta)}{2\sigma} \quad (4.21)$$

- (2) No segundo, impõe-se uma sollicitação do tipo, $\sigma_{xx} = -\sigma_{yy} = \sigma$, $\tau_{xy} = 0$, que representa um campo de tensões residuais de corte puro. Nas equações (4.18), (4.19) e (4.20), podem ser determinados os coeficientes B , C e G :

$$\begin{aligned} B\left(E, \nu, r_0, r, \frac{h}{d_0}\right) &= \frac{u_r(r, \theta)}{2\sigma \cos 2\theta} \\ C\left(E, \nu, r_0, r, \frac{h}{d_0}\right) &= \frac{u_\theta(r, \theta)}{2\sigma \sin 2\theta} \\ G\left(E, \nu, r_0, r, \frac{h}{d_0}\right) &= \frac{u_z(r, \theta)}{2\sigma \cos 2\theta} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Nas equações (4.21) e (4.22), u_r , u_θ e u_z , representam os deslocamentos na superfície e podem ser calculados recorrendo à simulação numérica por elementos finitos. É importante sublinhar

que os coeficientes de calibração são independentes do ângulo θ . Estes coeficientes dependem apenas das propriedades do material, módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν), bem como dos parâmetros geométricos, tais como, o raio do furo (r_0), a razão entre a profundidade e o diâmetro do furo (h/d_0) e a coordenada radial (r). Todos estes parâmetros podem ser adimensionalizados, de maneira a poderem ser utilizados para diferentes materiais e diâmetros de furo com o mesmo parâmetro h/d_0 .

Tal com na equação (4.11), para o caso de tensões planas, o módulo de elasticidade pode ser colocado em evidência nas equações (4.18), (4.19) e (4.20). Se a razão entre a profundidade e o diâmetro do furo (h/d_0) for constante, o raio do furo, r_0 , pode, também, ser colocado em evidência nas referidas equações. O coeficiente de Poisson não pode ser colocado em evidência na equação (4.11), o mesmo se passa com as equações (4.18), (4.19) e (4.20). Contudo, os coeficientes de calibração dependem do coeficiente de Poisson no caso do furo passante, A depende de $(1+\nu)$. B depende ligeiramente do coeficiente de Poisson, por exemplo, quando $\rho = 0.5$, $\nu_1 = 0.3$, $\nu_2 = 0.5$, $\frac{4\rho - (1 + \nu_1)\rho^3}{4\rho - (1 + \nu_2)\rho^3} \approx 1.014$. Pela mesma razão C depende de $(1-\nu)$ e G de ν .

Para os problemas de furo cego, é razoável supor que a dependência dos coeficientes de calibração relativamente às propriedades do material e ao raio do furo sejam semelhantes. Assim, as soluções apresentam-se sob a mesma forma que no caso do furo passante. Esta conclusão pode ser verificada pela solução de elementos finitos. Por conseguinte, os coeficientes de calibração das equações (4.18), (4.19) e (4.20) podem ser calculadas de forma adimensional para o caso geral. Estes coeficientes podem ainda ser expressos da seguinte forma:

$$A' = \frac{E}{r_0(1+\nu)} A; B' = \frac{E}{r_0} B; C' = \frac{E}{r_0(1-\nu)} C; F' = \frac{E}{r_0\nu} F; G' = \frac{E}{r_0\nu} G \quad (4.23)$$

4.3.3 Determinação dos coeficientes de calibração para a medição de tensões residuais não uniformes em profundidade

Para determinar as tensões residuais com distribuição não uniforme em profundidade, é necessário realizar um furo de forma incremental. As tensões em cada nova camada removida são consideradas uniformes. Este conceito é idêntico ao utilizado no método integral para o método do furo, utilizando rosetas extensométricas. São utilizadas as equações (4.18), (4.19) e (4.20) de cada vez que se faz um incremento na profundidade do furo. Estas equações podem ser representadas da seguinte forma:

$$u_r^i(r, \theta) = \sum_{j=1}^i \begin{bmatrix} A^{ij} + B^{ij} \cos 2\theta & A^{ij} - B^{ij} \cos 2\theta & 2B^{ij} \sin 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^j \\ \sigma_{yy}^j \\ \tau_{xy}^j \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$u_{\theta}^i(r, \theta) = \sum_{j=1}^i C^{ij} \begin{bmatrix} \sin 2\theta & -\sin 2\theta & -2\cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^j \\ \sigma_{yy}^j \\ \tau_{xy}^j \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$u_z^i(r, \theta) = \sum_{j=1}^i \begin{bmatrix} F^{ij} + G^{ij} \cos 2\theta & F^{ij} - G^{ij} \cos 2\theta & 2G^{ij} \sin 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^j \\ \sigma_{yy}^j \\ \tau_{xy}^j \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Onde $j = 1, 2, \dots, i$; $i = 1, 2, \dots, n$, representa o número total de etapas de furação, $A^{ij}, B^{ij}, C^{ij}, F^{ij}$ e G^{ij} são os coeficientes de calibração da $j^{\text{ésima}}$ camada depois de ter sido realizado o $i^{\text{ésimo}}$ incremento da furação; $\sigma_{xx}^j, \sigma_{yy}^j$ e τ_{xy}^j são as componentes das tensões residuais da $j^{\text{ésima}}$ camada.

4.4 Determinação de tensões residuais

4.4.1 Determinação das tensões residuais médias

4.4.1.1 Determinação das tensões residuais a partir deslocamentos u_x e u_y determinados por interferometria de Moiré

A interferometria de Moiré fornece os deslocamentos do plano u_x e u_y num sistema de coordenadas cartesianas, que podem ser representadas pelas equações:

$$u_x(x, y) = \frac{1}{f} N_x = \frac{1}{2f_s} N_x \quad (4.27)$$

$$u_y(x, y) = \frac{1}{f} N_y = \frac{1}{2f_s} N_y \quad (4.28)$$

O deslocamento u_r , num sistema de coordenadas cilíndricas, pode ser expresso como função de u_x e u_y :

$$u_r(r_c, \theta_k) = u_x(x_k, y_k) \cos \theta_k + u_y(x_k, y_k) \sin \theta_k \quad (4.29)$$

Onde $(x_k)^2 + (y_k)^2 = (r_c)^2$ e $\theta_k = \tan^{-1}\left(\frac{y_k}{x_k}\right)$, $k = 1, 2, 3$.

Combinando as equações (4.18), (4.27), (4.28) e (4.29), obtém-se uma relação entre as tensões residuais e os números de ordem das franjas que pode ser apresentada sob a forma matricial;

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} N_x(x_k, y_k) & N_y(x_k, y_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_k \\ \sin \theta_k \end{bmatrix} \\ & = 2f_s \begin{bmatrix} A + B \cos 2\theta_k & A - B \cos 2\theta_k & 2B \sin 2\theta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}, \quad k = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (4.30)$$

Finalmente, as três componentes desconhecidas das tensões residuais σ_{xx} , σ_{yy} , e τ_{xy} podem ser determinadas pela resolução do sistema de três equações lineares homogêneas, representadas em (4.30).

4.4.1.2 Determinação das tensões residuais a partir dos deslocamentos uniaxiais u_x e u_y obtidos por interferometria de Moiré

Por vezes podem ocorrer casos especiais de tensões residuais como acontece, por exemplo, quando deslocamentos da superfície relaxada são completamente diferentes para as duas direcções ortogonais x e y. Supondo que o deslocamento na direcção x é muito superior ao da direcção y e que o campo de deslocamentos u_x correspondente contém um número de ordem de franjas muito superior ao de u_y , será apenas utilizado o campo u_x , simplificando, assim, o sistema óptico utilizado. Para além disso, a precisão na contagem de franjas pode ser melhorada com a utilização duma figura de franjas uniaxiais contendo um maior número de franjas. Neste caso, as equações (4.24), (4.25) e (4.26) podem ser reescritas num sistema de coordenadas cartesianas:

$$\begin{aligned} u_x(x, y) = & (A \cos \theta + B \cos 2\theta \cos \theta - C \sin 2\theta \sin \theta) \sigma_{xx} + \\ & (A \cos \theta - B \cos 2\theta \cos \theta + C \sin 2\theta \sin \theta) \sigma_{yy} + \\ & (2B \sin 2\theta \cos \theta + 2C \cos 2\theta \sin \theta) \tau_{xy} \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned} u_y(x, y) = & (A \sin \theta + B \cos 2\theta \sin \theta + C \sin 2\theta \cos \theta) \sigma_{xx} + \\ & (A \sin \theta - B \cos 2\theta \sin \theta - C \sin 2\theta \cos \theta) \sigma_{yy} + \\ & (2B \sin 2\theta \sin \theta - 2C \cos 2\theta \cos \theta) \tau_{xy} \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$u_z(r, \theta) = F(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) + G[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \cos 2\theta + 2\tau_{xy} \sin 2\theta] \quad (4.33)$$

Combinando as equações (4.27) e (4.31), a relação entre o número de ordem de franja de u_x e os componentes das tensões residuais, podem exprimir-se por;

$$\begin{aligned}
 N_x(x_k, y_k) = 2f_s \left[(A \cos \theta_k + B \cos 2\theta_k \cos \theta_k - C \sin 2\theta_k \sin \theta_k) \sigma_{xx} + \right. \\
 (A \cos \theta_k - B \cos 2\theta_k \cos \theta_k + C \sin 2\theta_k \sin \theta_k) \sigma_{yy} + \\
 \left. (2B \sin 2\theta_k \cos \theta_k + 2C \cos 2\theta_k \sin \theta_k) \tau_{xy} \right]
 \end{aligned}
 \tag{4.34}$$

Onde $k = 1, 2, 3$; $N_x(x_k, y_k)$ corresponde ao número de ordem de franjas de três pontos arbitrários sobre o círculo $(x_k)^2 + (y_k)^2 = (r_c)^2$ e $\theta_k = \tan^{-1}\left(\frac{y_k}{x_k}\right)$ de maneira a que os coeficientes de calibração se mantenham constantes.

Da mesma forma, se o campo de deslocamentos u_y apresentar número de ordem de franjas, então a expressão a utilizar deverá ser a seguinte:

$$\begin{aligned}
 N_y(x_k, y_k) = 2f_s \left[(A \sin \theta_k + B \cos 2\theta_k \sin \theta_k + C \sin 2\theta_k \cos \theta_k) \sigma_{xx} + \right. \\
 (A \sin \theta_k - B \cos 2\theta_k \sin \theta_k - C \sin 2\theta_k \cos \theta_k) \sigma_{yy} + \\
 \left. (2B \sin 2\theta_k \sin \theta_k - 2C \cos 2\theta_k \cos \theta_k) \tau_{xy} \right]
 \end{aligned}
 \tag{4.35}$$

4.4.2 Determinação das tensões residuais não uniformes em profundidade

4.4.2.1 Características dos campos de deslocamento na superfície devidos à relaxação de tensões residuais não uniformes

Em muitos casos, os gradientes das tensões residuais em profundidade assumem especial importância. No caso de revestimentos superficiais ou granalhagem, a amplitude de tensões residuais varia desde um valor máximo, à superfície, até zero ao longo duma camada muito fina. O método descrito em parágrafos anteriores não pode ser aplicado a este caso, pois permite somente a medição dos valores médios de tensão residual ao longo da profundidade do furo. Para se poder caracterizar a distribuição das tensões residuais não uniformes em profundidade, o furo deve ser realizado de modo incremental. O método das tensões médias e o da deformação incremental, utilizados como aproximações no método do furo com extensómetros não podem ser aplicados na interferometria de Moiré. Para o caso da interferometria de Moiré é necessário utilizar o método integral que foi descrito no capítulo 2, pois as tensões residuais relaxadas em cada etapa da furação produzem fortes contribuições não lineares ao campo de deslocamentos existente. Para a verificação deste facto pode recorrer-se à simulação numérica.

Para verificar o que atrás foi dito foram realizadas algumas simulações numéricas por Elementos Finitos. Considerando, por exemplo, duas etapas de furação e aplicando uma pressão uniforme idêntica $p = \sigma$ ($\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma, \tau_{xy} = 0$) respectivamente à primeira e segunda camada, simulando a relaxação das tensões residuais equi-biaxiais [6] obtém-se os resultados que estão representados nas Figura 4.5, Figura 4.6 e Figura 4.7.

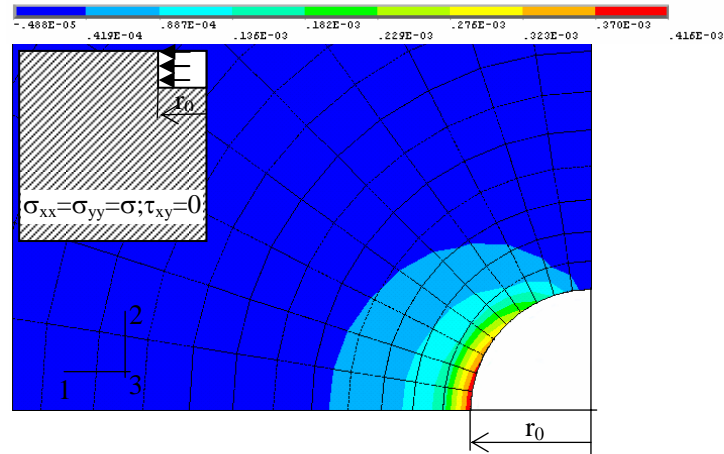


Figura 4.5 Cartografia do campo de deslocamentos u_x , quando é aplicada uma pressão uniforme sobre a primeira camada incremental.

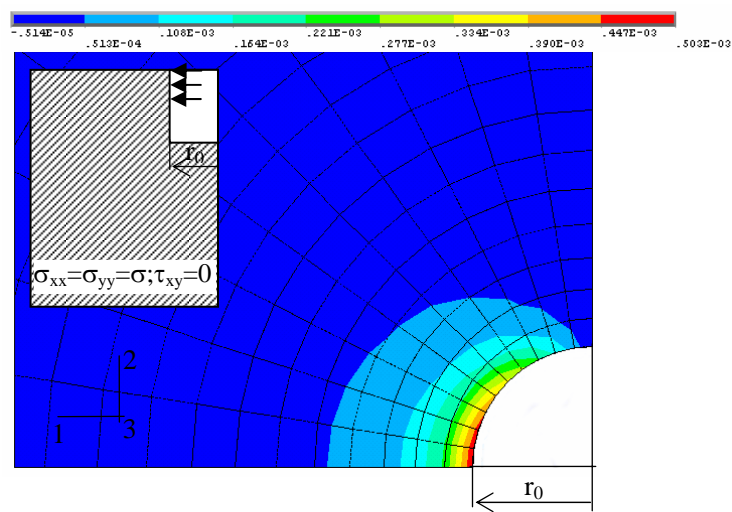


Figura 4.6 Cartografia do campo de deslocamentos u_x , quando é aplicada uma pressão uniforme sobre a primeira camada incremental após a segunda camada ter sido furada.

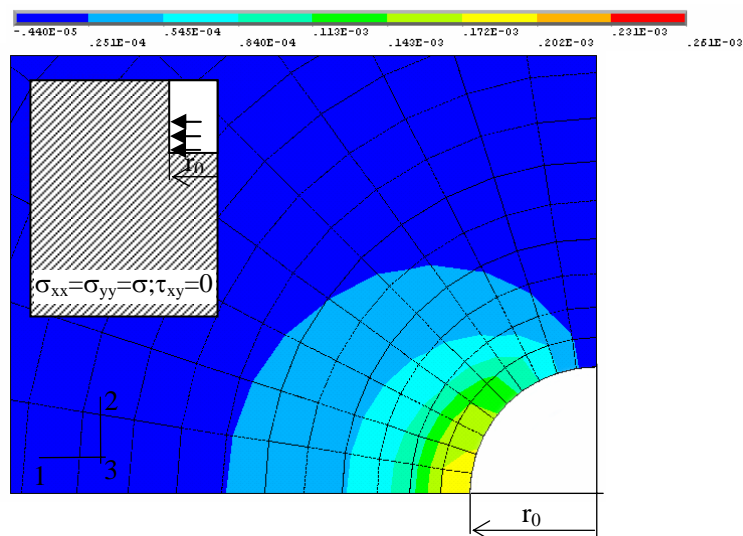


Figura 4.7 Cartografia do campo de deslocamentos u_x , quando é aplicada uma pressão uniforme sobre a segunda camada incremental após ter sido furada.

4.4.2.2 Determinação das tensões residuais não uniformes pelo método integral

A distribuição das tensões residuais não uniformes em profundidade pode ser determinada pelo método integral, introduzido anteriormente. Quando é realizado um furo de modo incremental os deslocamentos na superfície podem ser medidos de forma contínua em todos os pontos em torno do furo utilizando a interferometria de Moiré. Se o aumento da profundidade do furo cego for conhecido, a tensão residual de cada incremento furado é considerada como uma distribuição uniforme, com amplitude correspondente ao valor médio. Considerando um material isotrópico e homogêneo, supondo que a tensão residual é uniforme em cada camada, então podem ser aplicadas as equações (4.30), (4.34) e (4.35) a cada camada incrementada. A relação entre os deslocamentos da superfície e as tensões residuais de cada camada incrementada pode ser determinada por;

(1) Utilizando ambos os campos de deslocamentos u_x e u_y na interferometria de Moiré:

$$\begin{aligned} & \left[N_x^i(x_k, y_k) \quad N_y^i(x_k, y_k) \right] \begin{bmatrix} \cos \theta_k \\ \sin \theta_k \end{bmatrix} \\ &= \sum_{j=1}^i 2f_s \begin{bmatrix} A^{ij} + B^{ij} \cos 2\theta_k & A^{ij} - B^{ij} \cos 2\theta_k & 2B^{ij} \sin 2\theta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^j \\ \sigma_{yy}^j \\ \tau_{xy}^j \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.36)$$

(2) Utilizando um campo de deslocamentos uniaxial u_x ou u_y na interferometria de Moiré:

$$N_x^i(x_k, y_k) = \sum_{j=1}^i \left\{ \begin{aligned} & 2f_s \left[(A^{ij} \cos \theta_k + B^{ij} \cos 2\theta_k \cos \theta_k - C^{ij} \sin 2\theta_k \sin \theta_k) \sigma_{xx}^j \right] \\ & + (A^{ij} \cos \theta_k - B^{ij} \cos 2\theta_k \cos \theta_k + C^{ij} \sin 2\theta_k \sin \theta_k) \sigma_{yy}^j \\ & + (2B^{ij} \sin 2\theta_k \cos \theta_k + 2C^{ij} \cos 2\theta_k \sin \theta_k) \tau_{xy}^j \end{aligned} \right\} \quad (4.37)$$

$$N_y^i(x_k, y_k) = \sum_{j=1}^i \left\{ \begin{aligned} & 2f_s \left[(A^{ij} \sin \theta_k + B^{ij} \cos 2\theta_k \sin \theta_k + C^{ij} \sin 2\theta_k \cos \theta_k) \sigma_{xx}^j \right] \\ & + (A^{ij} \sin \theta_k - B^{ij} \cos 2\theta_k \sin \theta_k - C^{ij} \sin 2\theta_k \cos \theta_k) \sigma_{yy}^j \\ & + (2B^{ij} \sin 2\theta_k \sin \theta_k - 2C^{ij} \cos 2\theta_k \cos \theta_k) \tau_{xy}^j \end{aligned} \right\} \quad (4.38)$$

4.5 Determinação do sinal das tensões residuais

O padrão de franjas obtido por interferometria de Moiré, para o campo de deslocamentos provocado pela relaxação de tensões residuais, representa a mesma distribuição das tensões residuais mas com sinais opostos. Como os sinais das tensões residuais não são inicialmente conhecidos é necessário determiná-los experimentalmente. Existem diversas técnicas ópticas

para a determinação dos sinais das franjas. Entre elas, os métodos de *phase shift* e das franjas portadoras são os mais adaptados à interferometria de Moiré.

4.5.1 Método de modulação temporal de fase ou *phase shift*

O método de *phase shift* para a determinação dos sinais das franjas foi utilizado inicialmente na interferometria holográfica. Existem duas aproximações possíveis, a primeira faz-se pela perturbação da carga e a segunda pela perturbação dos parâmetros ópticos, de forma a modificar o comprimento do caminho óptico do feixe de referência.

4.5.1.1 Método da perturbação da carga

Uma das primeiras aplicações práticas, baseadas na perturbação da carga, foi apresentada por Ennos [7]. Neste trabalho a técnica foi utilizada em interferometria holográfica em tempo real para determinar o sinal do deslocamento na superfície, uma descrição detalhada sobre este procedimento é também apresentada por Jones e Wykes [8]. Uma pequena variação do carregamento provoca uma ligeira alteração do deslocamento o qual, por sua vez, origina uma mudança na fase das franjas. Esta alteração manifesta-se, quer pelo aparecimento de novas ordens de franja, quer pelo seu desaparecimento, ou ainda pela alteração do posicionamento das franjas. Qualquer uma destas variações poderá ser relacionada com o sinal dos deslocamentos na superfície.

4.5.1.2 Método da perturbação do comprimento do caminho óptico

A alteração do comprimento do caminho óptico do feixe de referência foi aplicado pela primeira vez na medição de tensões residuais por Nelson e McCrickerd [9]. Na interferometria de Moiré, a diferença de fase inicial entre os dois feixes incidentes (Figura 3.8) é dado pelo termo $\frac{2\pi k}{\lambda}$ da equação (3.34), onde k representa a diferença do comprimento do caminho óptico entre o feixe 1 e 2. Quando o comprimento do caminho óptico 1 ou 2 sofre uma pequena variação Δk , a mudança da fase correspondente seria $\pm \frac{2\pi\Delta k}{\lambda}$, o que vai provocar variação das ordens de franja, isto é,

$$u'_x = u_x \pm \frac{\Delta k}{\lambda} = N'_x \quad (4.39)$$

u_x corresponde ao deslocamento inicial, antes da perturbação do comprimento do caminho óptico e u'_x é o valor do deslocamento após a perturbação do comprimento do caminho óptico.

A equação (4.39) permite verificar que, quando $\frac{\Delta k}{\lambda} = \pm n$ em que n representa um número inteiro, a diferença de fase é determinada por $\Delta\phi = 2\pi n$ e padrão de franjas não sofre qualquer alteração. Então, a diferença de fase deverá ser inferior a 2π e a alteração do comprimento do caminho óptico deverá se da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda.

4.5.2 Método das franjas portadoras

Na interferometria de Moiré, podem utilizar-se franjas portadoras para analisar padrões de franja complexos. Estas franjas podem ser obtidas provocando uma mudança do ângulo incidente de um dos feixes, franjas portadoras de tracção e de compressão, e rodando a rede do provete (ou rodando o feixe incidente), franjas portadoras de rotação. O campo de deslocamentos resultante possui franjas paralelas e representa um gradiente de deslocamento constante.

Para se determinar o sinal das franjas induzem-se três tipos de franjas portadoras, de tracção, de compressão e de rotação ao padrão de franjas inicial. O tipo de padrão de franjas que provocar um aumento do gradiente de franja, significa que tem o mesmo sinal das tensões residuais relaxadas, tendo o mesmo sinal das franjas iniciais.

É importante referir que a determinação do sinal do gradiente de franja só é necessária para o primeiro incremento. Nos incrementos seguintes, ele pode ser determinado por comparação com a alteração do padrão de franjas. Como tal, os sinais das componentes das tensões residuais σ_{xx} , σ_{yy} , e τ_{xy} , são determinadas resolvendo uma das equações (4.36), (4.37) e (4.38).

4.6 Escolha dos pontos de medição

A interferometria de Moiré fornece a informação total sobre o campo de deslocamentos. Os padrões de franja de Moiré apresentam um elevado contraste mesmo nas regiões muito próximas do bordo do furo. Teoricamente, os deslocamentos requeridos nas equações (4.36), (4.37) e (4.38) podem ser obtidos para qualquer ponto em torno do furo. Contudo, na prática os pontos de medição devem ser convenientemente escolhidos.

Numa experiência realizada com o método do furo incremental, os campos de deslocamento na superfície devidos à relaxação de tensões residuais estão localizadas numa pequena região em torno do furo e apresentam uma distribuição não linear ao longo do eixo radial. O deslocamento ao longo do eixo x (eixo radial) apresenta uma distribuição não linear. Isto é, apresenta um valor muito elevado no bordo do furo e diminui rapidamente, para um nível muito baixo de tensões residuais, à medida que há um afastamento do bordo.

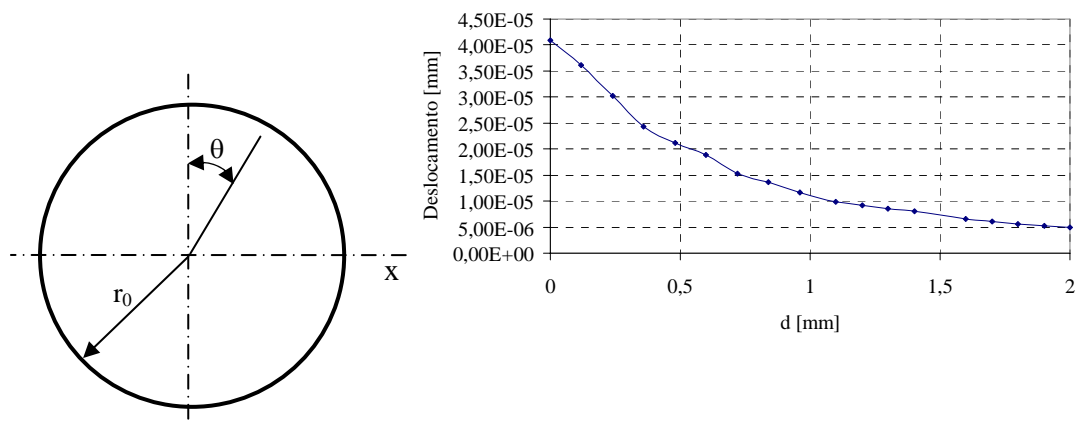


Figura 4.8 Variação dos deslocamentos ao longo do eixo radial, na região próxima do furo.

Se os pontos de medição escolhidos se encontrarem numa razão $r \geq 2.0r_0$, valor típico no método do furo incremental clássico, a variação do deslocamento, após cada etapa de perfuração, é demasiado pequena para ser determinada com precisão. Como tal, nos métodos do furo com interferometria de Moiré, os pontos de medição deverão estar próximos do bordo do furo. Para os problemas das tensões residuais de valor muito elevado, por exemplo quando tensões residuais uniaxiais de valores $\sigma_{res} \geq \frac{1}{3}\sigma_y$ ou tensões residuais equibiaxiais $\sigma_{res} \geq 0.5\sigma_y$, onde σ_y representa a tensão limite de elasticidade do material, as regiões mais próximas do bordo sofrerão uma deformação plástica e os pontos de medida deverão ser escolhidos fora da zona plástica.

Os coeficientes de calibração dependem, também, das coordenadas radiais r , mas são independentes das coordenadas angulares θ . Assim, os pontos de medição devem estar posicionados sobre uma circunferência onde os coeficientes de calibração são válidos. Deste modo, os locais de medida possuem as mesmas coordenadas radiais mas diferentes coordenadas angulares, de maneira a que os coeficientes de calibração sejam constantes em diferentes pontos de medida.

4.7 Conclusões

Neste capítulo faz-se a análise teórica da combinação da técnica da interferometria de Moiré com o método do furo incremental. A solução dos deslocamentos superficiais é baseada na solução de Kirsch para um problema de furo passante enquanto a solução para os problemas com furos cegos é obtida recorrendo à série de Fourier de primeira ordem. Os coeficientes de calibração são determinados recorrendo a um modelo de elementos finitos tridimensional, os valores obtidos são adimensionalizados para poderem ser utilizados na medição de tensões residuais de qualquer material isotrópico. Os deslocamentos planos que são medidos na superfície das peças, u_x e u_y , e que têm origem no relaxamento das tensões residuais são obtidos a partir da interferometria de Moiré, após cada incremento de furação. Desta forma, é possível desenvolver um sistema de equações homogêneas lineares, representando as relações entre os deslocamentos medidos experimentalmente e as componentes das tensões residuais. Para os problemas de tensões residuais não uniformes em profundidade, o método integral, desenvolvido inicialmente para o método do furo usando extensometria, tem uma importância particular na interferometria de Moiré associada ao método do furo. Neste método, as tensões residuais são supostamente uniformes para cada incremento de furação. Para cada incremento é determinado um sistema de equações homogêneas lineares para o cálculo das tensões residuais. Foram, também, descritos dois métodos para a modulação temporal de fase bem como um método alternativo para a desmodulação utilizando franjas portadoras. Finalmente, fez-se uma breve análise para selecção mais adequada de pontos de medição.

Referências:

- [1] ASTM, *ASTM E837-01 e1, Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method*, Section 3, 03.01, 2001.
- [2] Albertazzi, A., Borges, M. R. and Kanda, C., *A radial in-plane interferometer for residual stresses measurement using ESPI*, In Proc. IX Int., Congress on Experimental Mechanics, 108-111, 2000.
- [3] Viotti, M., R., Albertazzi, A. et all, *Residual stress measurement using a radial in-plane speckle interferometer and laser annealing: preliminary results*, Optics and Laser Engineering, 42, pg. 71-84, 2004.
- [4] Viotti, M. R., Albertazzi, A., Kaufmann, G. H., *Measurement of residual stresses using a radial in-plane digital speckle pattern interferometer and local heating – recent advances*, Eight International Symposium on Laser Metrology, In Pro. of SPIE on CD-ROM, 5776, 2005, pg. 709-716.
- [5] Timoshenko, S., Goodier, J. M., *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York, 1951.
- [6] Schager, G. S., *Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements*, J. Eng. Mater. Tech., 103, 4, 1981, pg. 157-163.
- [7] Ennos, A. E., *Measurement of In-Plane Surface Strain by Holographic Interferometry*, J. Phys., s. 2, 1, 1968, 731-734.
- [8] Jones, R., Wykes, C., *Holographic and Speckle Interferometry*, Cambridge University Press, Cambridge, England, 1989.
- [9] Nelson, D. V., McCrickerd, J. T., *Residual-Stress Determination Through Combined Use of Holographic Interferometry and Blind Hole Drilling*, Exp. Mech., 26, 4, 1986, pg. 371-378.

CAPÍTULO 5

TÉCNICAS DE PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIES

CAPÍTULO 5

5 TÉCNICAS DE PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIES

Como a medição de tensões residuais é realizada à custa da caracterização de tensões na superfície são utilizadas técnicas experimentais para as obter. As técnicas experimentais que permitem medições de carácter global utilizam normalmente as características da superfície para acompanhar a sua deformação, tal é o caso das técnicas de: interferometria, Moiré e, mais recentemente, correlação de imagem. Embora algumas técnicas utilizem a informação contida na microestrutura da superfície outras necessitam que esta seja convenientemente preparada. Neste capítulo faz-se a análise do desenvolvimento das diferentes técnicas de preparação de superfícies aplicadas no método de Moiré (geométrico e interferométrico) e na correlação de imagem.

5.1 Preparação de superfícies para a técnica de Moiré

Neste ponto vão ser descritos os procedimentos desenvolvidos neste trabalho para a aplicação das redes de Moiré nas superfícies das peças ou componentes a analisar. Como a estratégia utilizada na colocação das redes usadas em Moiré geométrico é diferente das utilizadas no interferométrico, optou-se pela realização de duas análises diferentes.

5.1.1 Preparação de superfícies para Moiré geométrico

Tal como se tinha visto no capítulo 3 a técnica de Moiré geométrico é apropriada para materiais de baixo módulo de elasticidade tais como, tecido, madeira, elastómeros e alguns plásticos. É também útil no estudo de metais quando se deformam plasticamente e se pretende estudar solicitações além do limite elástico. As redes utilizadas têm uma frequência espacial relativamente baixa, que pode ir até cerca de 40 l/mm, utilizando luz branca, ou 100 l/mm usando luz monocromática [1].

As redes para Moiré geométrico podem ainda ser redes de transmissão ou redes de reflexão. As redes de transmissão são usadas em peças ou componentes transparentes à radiação luminosa utilizada. As redes de reflexão aplicam-se em materiais opacos à luz.

Existem várias possibilidades de aplicação de redes na superfície das peças ou estruturas, sendo as mais divulgadas as seguintes [2]:

Gravação directa de redes: a aproximação mais básica é a gravação das redes directamente na peça ou componentes com linhas muito finas. A densidade de linhas é muito limitada, mas para algumas aplicações poderá ser suficiente. A técnica de gravação directa de redes tem sido aplicada no estudo da flexão de placas, onde a sensibilidade necessária não seja muito elevada.

Gravação por máquinas ferramentas: uma outra aproximação ao problema da gravação de redes de Moiré consiste na utilização de tornos e fresadoras para gravar as redes directamente no provete. Este método permite uma maior resolução do que no caso anterior, podendo atingir resoluções suficientemente elevadas para serem aplicadas em Moiré interferométrico.

Impressão fotográfica directa: a rede ou grelha podem ser impressas fotograficamente sobre a superfície do provete. Esta técnica deriva da utilizada para a impressão de circuitos electrónicos. A superfície do provete é revestida com um emulsão fotossensível, a qual, depois de secar, é exposta a uma fonte de radiação luminosa que passa pelas aberturas de uma grelha colocada sobre o provete. A emulsão que ficou exposta à radiação luminosa passa por um processo de revelação fotográfico. A rede resultante da reprodução fotográfica tem linhas muito finas e está fortemente colada à superfície do provete.

Filme fotográfico: as redes podem ser reproduzidas num filme fotográfico e posteriormente coladas na superfície do provete. Os comuns negativos tendem a ser demasiado resistentes para estas aplicações. Para contornar esta limitação, utilizam-se normalmente tiras de filmes do mesmo tipo que é utilizado em litografia para as foto – montagens.

Transferência de grelhas metálicas: As grelhas são reproduzidas e representadas utilizando a técnica do *fotoresist* a partir dum folheado que é colado num substrato em aço inoxidável. O compósito é colado ao provete com um adesivo epóxico, e o substrato é retirado após a polimerização do adesivo. Estas grelhas podem ser utilizadas em aplicações de transmissão se for utilizado um adesivo transparente. Se a colagem for executada com um epóxico preto obtém-se um bom contraste para as aplicações de Moiré de reflexão.

Redes de fase: estes métodos foram desenvolvidos para a reprodução de redes de elevada frequência espacial para aplicação na técnica de Moiré interferométrico. Estes métodos serão posteriormente desenvolvidos neste capítulo.

Neste trabalho foram desenvolvidas duas técnicas para produção de redes, sendo uma para redes de baixa frequência e outra para redes de frequência elevada. Para obter redes de baixa frequência foi desenvolvida uma técnica relativamente inovadora para a aplicação das redes nas superfícies [3]. Esta técnica consiste em desenhar a rede num programa de desenho (CAD), imprimir a rede num papel especial (*Toner Transfer System*) utilizando uma impressora laser, transferir a rede do papel para a superfície utilizando um processo termo-mecânico.

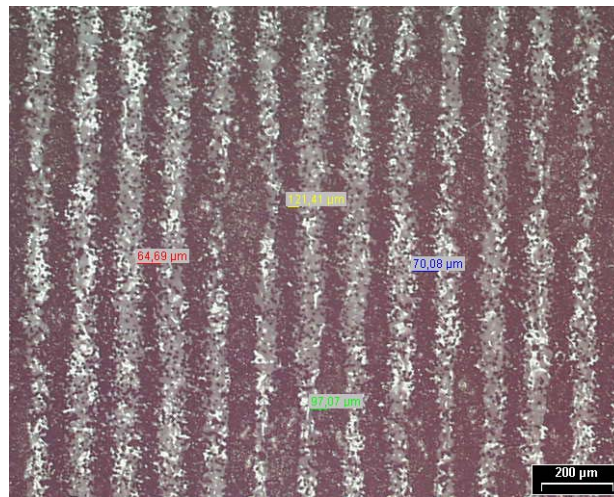
5.1.1.1 Criação da rede utilizando um programa CAD

Na fase inicial da criação da rede, foi estudada a influência de um conjunto de parâmetros que limitam a frequência máxima da rede. A primeira limitação é, sem dúvida, a resolução da impressora. Assim, na tabela 5.1 determinaram-se diferentes espessuras de linha e/ou espaçamentos entre linhas da rede para Moiré com as impressoras de maior resolução que estavam disponíveis na altura: 1200 dpi (*dot per inch*) e 600 dpi. Na terceira coluna, os dez últimos valores de espessura para a impressora de 600 dpi não estão indicados porque foram considerados demasiado elevados e sem interesse para a análise que se pretende efectuar. Os valores da tabela 5.1 que surgem a negrito referem-se a dizimas não infinitas, enquanto que os outros correspondem dizimas infinitas embora apareçam na tabela pelos seus valores arredondados.

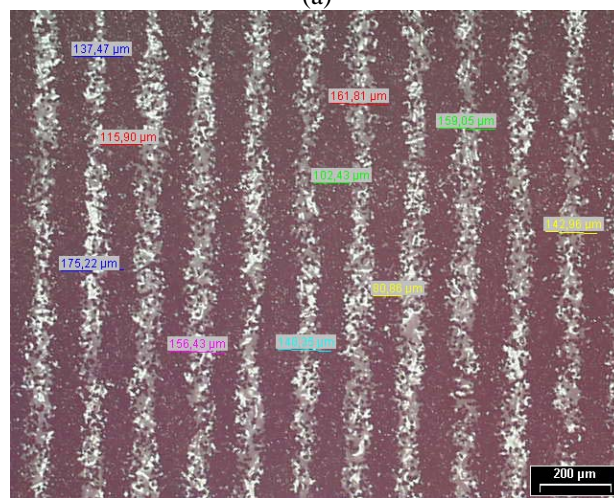
Tabela 5.1 Valores de espessura e/ou espaçamento entre linhas.

	Espessura para 1200 dpi [mm]	Espessura para 600 dpi [mm]
1	0.0212	0.0423
2	0.0423	0.0847
3	0.0635	0.1270
4	0.0847	0.1693
5	0.1058	0.2117
6	0.1270	0.2540
7	0.1482	0.2963
8	0.1693	0.3387
9	0.1905	0.3810
10	0.2117	0.4233
11	0.2328	0.4657
12	0.2540	0.5080
13	0.2752	0.5503
14	0.2963	0.5927
15	0.3175	0.6350
16	0.3387	-
17	0.3598	-
18	0.3810	-
19	0.4022	-
20	0.4233	-
21	0.4445	-
22	0.4657	-
23	0.4868	-
24	0.5080	-

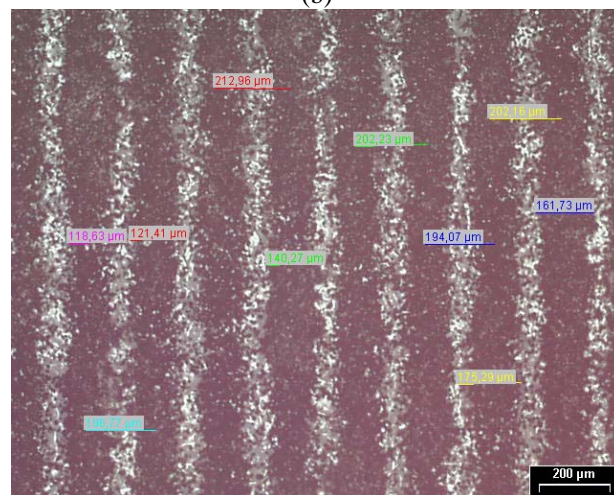
Após alguns testes preliminares, verificou-se que o outro parâmetro limitativo a ter em conta é o comportamento do papel sobre o qual são impressas as redes. Este papel especial (*Toner Transfer System*) é normalmente utilizado em electrónica para transferência de circuitos integrados que são desenhados em programas específicos para as respectivas placas. Após os referidos testes concluiu-se que a espessura mínima é, para ambas as impressoras, de 0.0635 mm. Realizaram-se depois um conjunto testes de impressão que foram posteriormente avaliados no microscópio óptico. Nesta avaliação fizeram-se algumas medições recorrendo ao programa de processamento de imagem integrado no sistema de imagem do microscópio. Na figura 5.1 representam-se alguns exemplos dessa análise.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.1 Ampliação de redes de linhas paralelas (espessura [mm] x espaçamentos [mm]): (a) 0.0635x0.148; (b) 0.1058x0.148; (c) 0.127x0.212.

Da análise da figura 5.1 pode verificar-se que a espessura das linhas não é constante, podendo mesmo ocorrer variações bastante elevadas, o que pode originar uma diminuição da resolução e da qualidade das franjas de interferência com a rede de referência. Após a realização de vários testes com diferentes combinações determinou-se uma resolução máxima em redes de

linhas paralelas de 7 l/mm [3]. Nos casos em que se tentou obter combinações que permitissem uma resolução mais elevada ocorria a sobreposição total ou parcial das linhas adjacentes.

Para além do estudo das redes de Moiré com linhas paralelas, fez-se também uma análise de linhas cruzadas. Estas redes permitem a medição de deslocamentos em duas direcções ortogonais. No caso deste tipo de redes não foi possível obter redes impressas com resolução tão elevada quanto as redes de linhas paralelas, isto por ocorrer a sobreposição de linhas nas duas direcções de medição. Nesta situação a sobreposição de linhas consecutivas ocorreu para frequência inferior à ocorrida para redes de linhas paralelas. Na figura 5.2 estão representados alguns exemplos de imagens ampliadas de redes cruzadas.

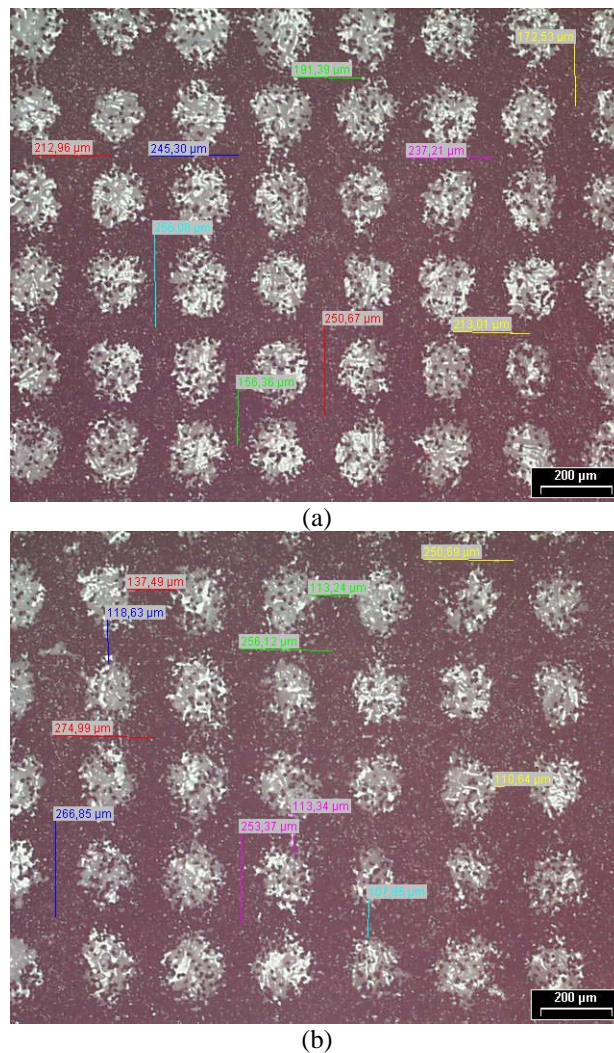


Figura 5.2 Ampliação de redes de linhas cruzadas (espessura [mm] x espaçamentos [mm]): (a) 0.0635x0.233; (b) 0.127x0.254.

A frequência máxima conseguida para redes de linhas cruzadas, utilizando a técnica descrita neste trabalho foi de 5 l/mm [3].

5.1.1.2 Transferência da rede para a superfície a analisar

Antes de se proceder à transferência da rede para Moiré, impressa no papel para a superfície da peça ou componente a analisar foi necessário proceder-se à correcta limpeza e desengorduramento da referida superfície. Nesta operação deve utilizar-se um forte desengordurante como por exemplo a acetona. Só depois da limpeza cuidada da superfície se pode proceder à transferência efectiva da rede para Moiré.

Como a transferência da rede do papel para a superfície é executada por meios termo – mecânicos, foi necessário elaborar um conjunto de testes até se conseguir definir qual a temperatura e pressão ideais para transferir a rede, garantindo a máxima resolução possível. Cuidados na aplicação da temperatura e pressão, garantindo uma distribuição o mais uniformemente possível ao longo da rede a transferir, conduzem aos melhores resultados. Nos casos em que a temperatura é muito elevada ocorrem dois fenómenos que limitam a sua utilização, o papel fica demasiado seco e quebradiço e o *toner* fica muito fluido, espalhando-se pela superfície da peça ou componente. Neste caso as linhas resultam demasiado espessas e, normalmente, acabam por se sobrepor diminuindo, desta forma, a qualidade e resolução da rede. Pelo contrário, se a temperatura for demasiado baixa, não ocorre a transferência da rede. A pressão tem também uma influência importante na qualidade e resolução das redes: pressões muito elevadas provocam um espalhamento do *toner* na superfície da peça (originando a sobreposição de linhas adjacentes), enquanto que se for demasiado baixa, mesmo que a temperatura seja suficientemente elevada, não possibilita transferir a rede de Moiré do papel para a superfície a analisar. Com o intuito de se conseguir alcançar o valor óptimo destas condições de temperatura e pressão fizeram-se diversas combinações entre estes dois parâmetros, os testes foram feitos em diferentes materiais metálicos, poliméricos e em madeira. Os ensaios nos dois últimos materiais não foram muito positivos, pois a temperatura necessária para que a transferência ocorra nestes materiais deve ser muito elevada. Para além do problema da sua baixa condutibilidade térmica que provoca uma concentração de calor na região da transferência da rede, aumentado a temperatura local e dificultando a transferência de redes com qualidade. Foi possível transferir algumas redes para a madeira com uma resolução bastante baixa que, para algumas aplicações, pode ser suficiente, como é o caso do ensaio de flexão estática [4]. No caso de materiais metálicos, como a condutibilidade térmica varia com os vários tipos de materiais, os valores de pressão e temperatura foram diferentes para os casos analisados (aço de construção e ligas de alumínio). Como na maioria das aplicações, a medição de deslocamentos em aço de construção implicam valores muito baixos, optou-se por se fazer um estudo mais aprofundado dos parâmetros referidos nas ligas de alumínio.

O estudo para a determinação das condições de temperatura versus pressão, iniciou-se com várias combinações entre espessura de linhas e espaçamento entre elas (Tabela 5.2). Numa experiência preliminar verificou-se que para espaçamentos muito pequenos ocorria uma sobreposição de linhas adjacentes. Este fenómeno ocorria quando a combinação de temperatura e pressão utilizadas para a transferência da rede provocavam um grande espalhamento do *toner*. Nestes casos as linhas ficam mais espessas e nas combinações em que espaçamento é menor (p. ex. espessura = 0.0635mm / espaçamento = 0.127mm) as linhas adjacentes sobrepõem-se, baixando a qualidade e resolução da rede de forma significativa. As combinações indicadas na Tabela 5.2 foram as que conduziram às melhores transferências da rede de Moiré para superfície de provetes em ligas de alumínio.

Tabela 5.2 Combinações entre espessura de linhas e espaçamento entre elas em redes gravadas em provetes de alumínio.

Impressora	Combinações	
	Espessura da linha [mm]	Espaçamento entre linhas [mm]
1200 dpi	0.0635	0.2540
1200 dpi	0.0635	0.3175
1200/600 dpi	0.1270	0.2540
1200 dpi	0.1270	0.3175
1200/600 dpi	0.1270	0.3810
1200/600 dpi	0.2540	0.5080
1200/600 dpi	0.2540	0.6350

Dos vários testes realizados chegou-se à conclusão que a resolução máxima conseguida na transferência de redes do papel para superfície dos objectos é inferior à alcançada na impressão do papel. No caso da transferência de redes de linhas paralelas para superfícies de ligas de alumínio a máxima frequência obtida é de 4 l/mm. As condições óptimas de pressão e temperatura para conseguir transferir redes com a máxima resolução foi, respectivamente, 120°C e 125 kPa [3].

Simultaneamente com as redes de linhas paralelas foram executados alguns testes para a transferência de redes cruzadas. Nestas experiências surgiu o mesmo tipo de problemas e foram detectadas as mesmas limitações que ocorreram com o primeiro tipo de redes de Moiré. Neste caso, existe a agravante de aumentar o número de linhas por unidade de área, o que significa que a sobreposição ocorre com maior frequência. Com este tipo de redes a resolução máxima conseguida foi de 3 l/mm. Na figura 5.3 estão representados dois exemplos de resolução máxima para a transferência de redes de Moiré (linhas paralelas e cruzadas).

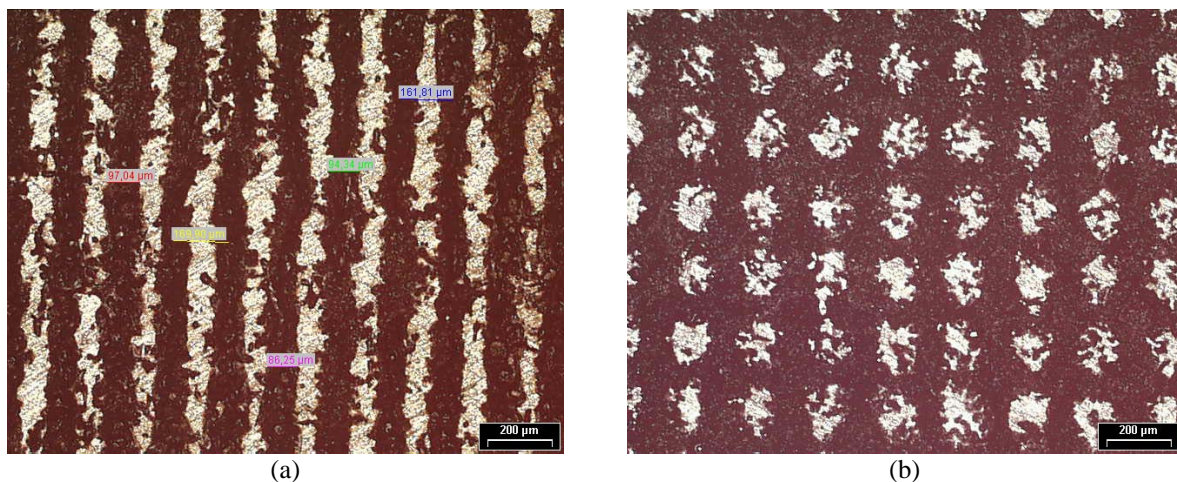


Figura 5.3 Ampliação de redes de Moiré transferidas para uma superfície dum objecto em liga de alumínio: (a) linhas paralelas, frequência de 4 l/mm; (b) linhas cruzadas, frequência de 3 l/mm.

5.1.2 Preparação de superfícies para Moiré interferométrico

As redes para Moiré interferométrico ou redes de difracção têm uma frequência muito elevada (até 3000 l/mm), o que obriga a utilização de luz coerente e a uma preparação mais cuidada da superfície comparativamente ao caso de Moiré geométrico. Também para este caso podem utilizar-se dois tipos de redes: transmissão e reflexão (Figura 5.4).

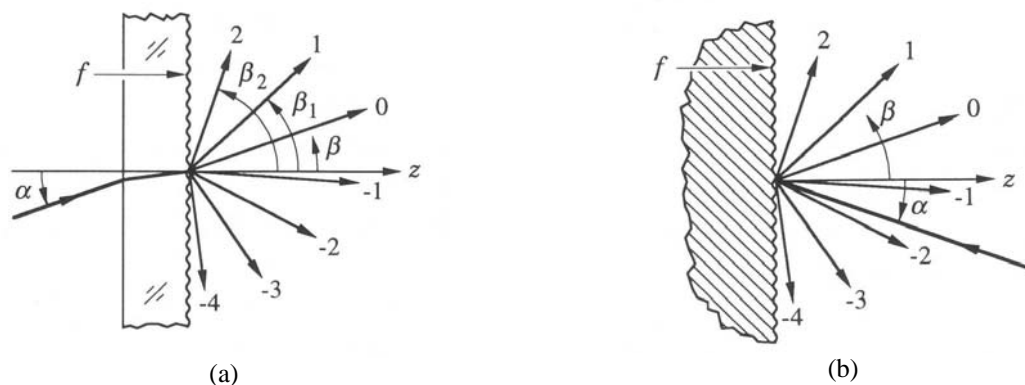


Figura 5.4 A rede para Moiré interferométrico divide, por difracção, o feixe da luz incidente num determinado número de feixes. Neste caso estão representados dois tipos de redes: (a) transmissão; (b) reflexão.

Ao longo deste trabalho foram desenvolvidas aplicações em que são utilizadas redes para Moiré interferométrico de reflexão. A aplicação da rede na superfície da peça na qual se pretende medir os deslocamentos pode ser feita de duas formas. Directamente na superfície ou por replicação duma rede que foi previamente aplicada num molde (rede mestra). O primeiro caso só é aplicável no caso de peças pequenas (provetes) e de fácil manuseamento, o mais comum é a técnica da replicação da rede a partir dum molde.

As geometrias mais comuns para as redes de difracção são as sinusoidais (ou redes de fase) e em dentes de serra. Sendo as redes sinusoidais mais utilizadas em Moiré interferométrico enquanto que as redes em dentes de serra são, geralmente, usadas em aplicações de espectroscopia (astronomia, ciência dos materiais, etc.). Embora estas redes de difracção sejam mais eficientes, as frequências máximas são inferiores às obtidas em redes sinusoidais. Esta diferença nas frequências máximas deve-se aos diferentes processos de fabrico usados para a obtenção dos dois tipos de redes.

O processo de fabrico das redes sinusoidais é baseado num processo holográfico. O primeiro passo na produção duma rede holográfica é o da preparação da superfície do substrato sobre o qual ficará a rede mestra. O substrato poderá ser em vidro ou cobre e a sua superfície deverá ser polida até um décimo do comprimento de onda ($\lambda/10$) e revestida com um material fotossensível (*fotoresiste*). Deverá ser colocada uma pequena quantidade de *fotoresiste* sobre a superfície do substrato, ficando sujeito a elevadas velocidades de rotação num equipamento de *spinning*. Desta forma obtém-se uma fina película de *fotoresiste* com espessura constante em toda a superfície do substrato. Depois desta operação o *fotoresiste* é exposto à radiação luminosa, posicionando o revestimento na região da intercepção de dois feixes de luz monocromática e coerente produzida por um laser. A intercepção dos dois feixes laser gera um padrão de franjas de interferência paralelas e igualmente espaçadas, cujo padrão de intensidades varia de forma sinusoidal (Figura 5.5).

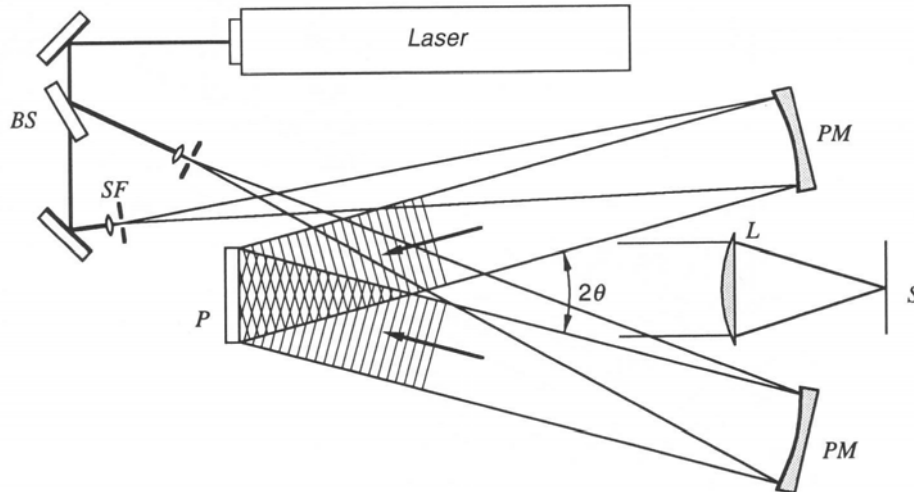


Figura 5.5 Sistema óptico para a exposição da placa de *fotoreviste* à rede de interferência com uma frequência f_s . P: placa revestida de material fotossensível; BS: *beam splitter*; SF: filtro espacial; PM: espelho parabólico; L: lente; S: tela [2].

Este padrão de interferência atinge o *fotoreviste*, sensibilizando-o de forma diferente, função das regiões iluminadas ou obscuras. Uma vez que a solubilidade do *fotoreviste* está dependente da sua exposição à luz, este processo transfere a variação da intensidade das franjas de interferência para a superfície do substrato.

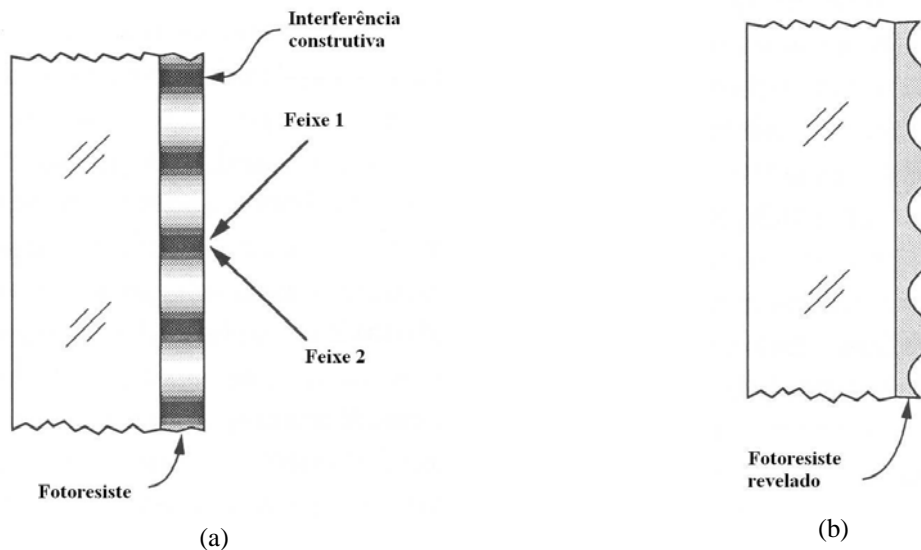


Figura 5.6 Gravação de uma rede sinusoidal em *fotoreviste*.

Após um processo de revelação, o substrato é revestido com um material reflector e posteriormente pode ser replicado sobre a superfície da peça ou estrutura em que se pretende medir. Como as redes holográficas são produzidas por processos ópticos, a forma das estrias e o seu espaçamento são sempre constantes. As redes holográficas estão, desta forma, livres de erros de espaçamento periódicos e aleatórios responsáveis pelos “fantasmas” que ocorrem nas redes em dentes de serra. Desta forma as redes holográficas geram muito menos desvios de luz do que as redes em dentes de serra.

No âmbito desta investigação foi desenvolvido um conjunto de análises e experiências para a replicação de redes de difracção. Neste estudo parte-se de uma rede de difracção preexistente, com 1200 l/mm, adquirida a uma empresa especializada. Como estas redes têm um custo bastante elevado, houve necessidade de produzir uma rede intermédia, a utilizar como carimbo, para replicar a rede na superfície dos objectos. Antes da sua colocação na superfície dos objectos foi necessário proceder-se ao revestimento da rede intermédia por uma camada de material reflector aumentando o seu índice de reflectividade. Para o fabrico da rede intermédia utilizaram-se duas etapas: numa primeira fase, faz-se a replicação directa da rede de difracção a partir dum silicone em seguida faz-se a replicação num carimbo de resina de epóxico. O recobrimento da rede de silicone com uma película de revestimento em material reflector foi o processo mais complexo da replicação de redes para Moiré interferométrico. Dado que não havia, em Portugal, qualquer experiência neste tipo de revestimentos, foi necessário recorrer a vários laboratórios de materiais, que testaram diferentes processos de revestimento e diferentes materiais reflectores.

5.1.2.1 Rede intermédia de silicone

O silicone utilizado deve possuir capacidade para reproduzir fielmente a geometria das grelhas de difracção iniciais. Deverá possuir uma fluidez suficientemente para preencher todas as reentrâncias da rede sinusoidal de difracção. O silicone mais referido na bibliografia tem sido o RTV 615 (GE), pelo facto de se terem obtido resultados satisfatórios. Neste trabalho também se optou por utilizar este silicone embora existam outros no mercado com propriedades similares não são, por vezes, de fácil aquisição. Como o silicone só adere a uma superfície de material diferente se esta for previamente pintada com um primário, escolheu-se o primário apropriado para este silicone, que é o SS4120.

O processo experimental obriga a misturar o silicone com o catalizador, a proceder-se a um estágio da mistura numa câmara de vácuo para retirar todo o ar dissolvido e, finalmente, à colocação do primário numa placa de vidro (ver Figura 5.7) que servirá de base ao carimbo de silicone

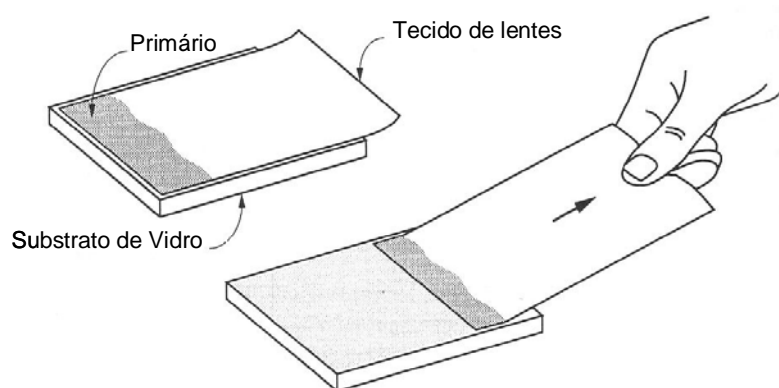


Figura 5.7 Técnica para a colocação do primário num substrato de vidro.

A mistura de silicone é colocada sobre a superfície da placa de vidro uma hora após a colocação do primário (Figura 5.6 a). Procedendo-se, de seguida, à colocação da rede preexistente sobre o silicone conforme ilustra a Figura 5.6 b, especiais cuidados deverão ser tidos para evitar a formação de bolhas de ar entre as duas superfícies. É, também,

necessário restringir os movimentos relativos entre o substrato de vidro e a rede preexistente durante o tempo de cura (Figura 5.6 c)

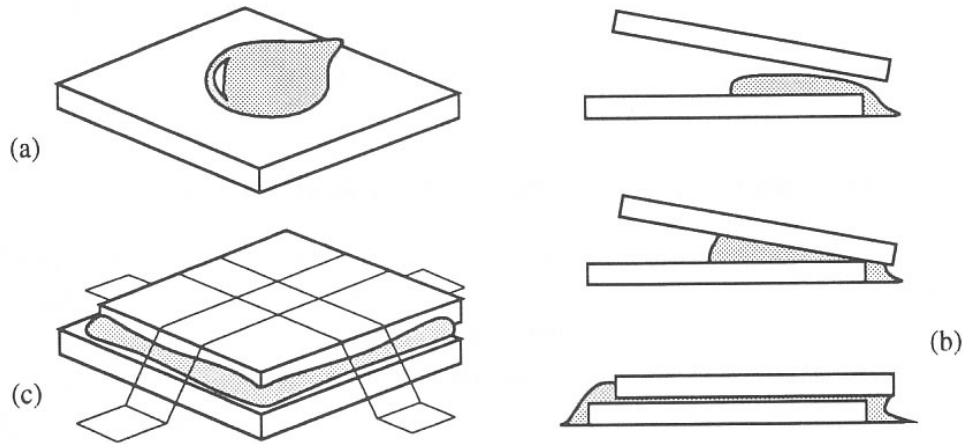


Figura 5.8 Procedimentos para a replicação da rede preexistente sobre o silicone.

A rede de silicone pode ser separada da rede preexistente após 24 horas, contudo a cura do silicone só fica completa após sete dias à temperatura ambiente. Antes da separação, o excesso de silicone que escoou pelos bordos da placa de vidro deve ser cortado e retirado utilizando, para isso, um cortante afiado. Finalmente, faz-se a separação utilizando um mecanismo desenvolvido para o efeito tal como está representado esquematicamente na Figura 5.9. O movimento da separação das grelhas deverá ser lento e controlado de forma a evitar que a rede preexistente seja danificada.

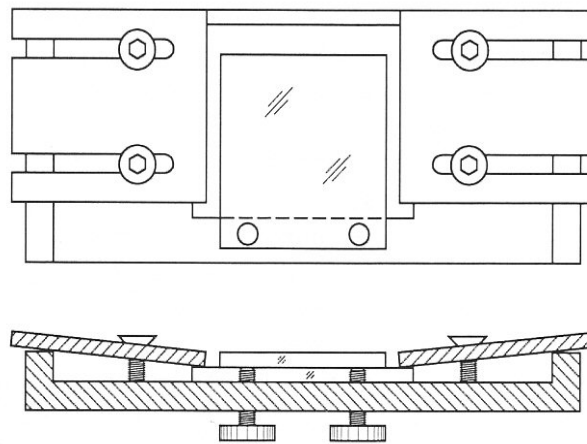


Figura 5.9 Mecanismo de separação das grelhas.

Durante este trabalho foram realizados alguns testes seguindo os passos descritos, tendo-se obtido resultados bastante interessantes. Na figura seguinte pode ver-se a fotografia obtida ao microscópio com uma ampliação de mil vezes duma rede de silicone.

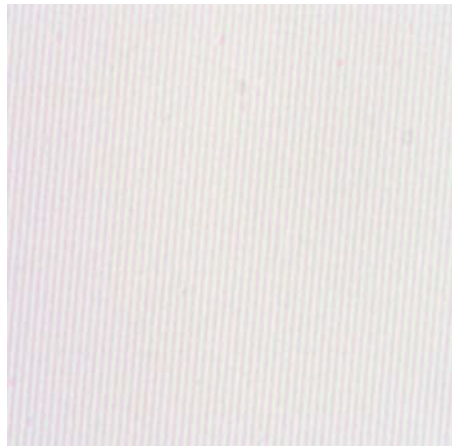


Figura 5.10 Rede de silicone, ampliada mil vezes.

Pela análise da fotografia anterior pode concluir-se que com este método se podem obter redes de boa qualidade. Uma melhoria na qualidade das redes poderia ser obtida se houvesse um melhor controlo ambiental, isto é, ambiente isento de poeiras, humidade controlada, e a limpeza cuidada das redes molde.

Após a obtenção duma matriz em silicone, em que numa das faces se encontra a rede de difracção, deve proceder-se ao revestimento da rede com um material reflector. O material frequentemente utilizado para a película de revestimento é o alumínio puro. O revestimento é geralmente obtido por vaporização do metal com uma resistência eléctrica no interior de uma câmara de vazio. O processo de vaporização do alumínio pode ser descrito duma forma sucinta, a partir da seguinte figura esquemática.

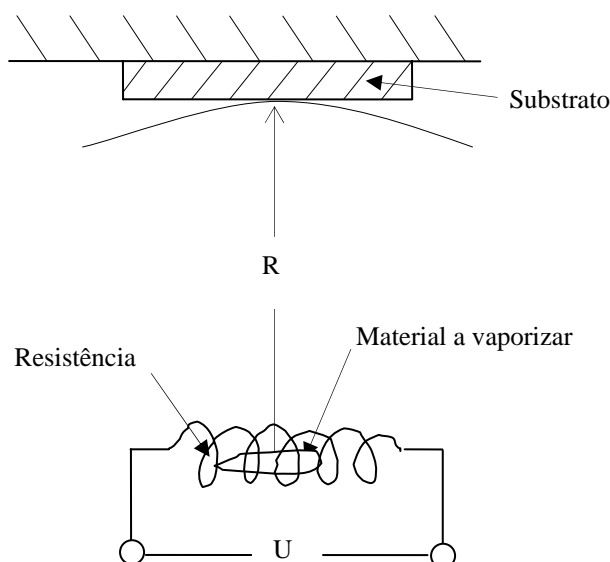


Figura 5.11 Representação esquemática do processo de vaporização de Al.

A evaporação é efectuada num ambiente de gás neutro (árgon, por exemplo) sob vácuo, enquanto uma corrente eléctrica passa pela resistência eléctrica que vaporiza o alumínio. A frente do material evaporado move-se em forma de esferas concêntricas com a fonte.

A espessura da película vaporizada pode ser calculada pela expressão seguinte:

$$e = \frac{m}{4\pi R^2 \rho} \quad (5.1)$$

onde m representa a massa do material, R raio da esfera e ρ a densidade do material.

A largura da peça é um factor muito importante pois a espessura da película é menor nos bordos do que no meio. Para minimizar este efeito a distância entre a peça e a resistência deve ser a maior possível. Os principais cuidados no procedimento para a evaporação da película de alumínio sobre a matriz em silicone são: utilizar alumínio puro; colocar a mesa da câmara de vácuo na posição mais baixa, medir a distância R (normalmente igual a 4 cm); calcular, a partir da equação (5.1), a massa de alumínio para se obter a espessura desejada. Por um lado a espessura deve ser suficiente para assegurar uma reflexão a 100% em toda a matriz. Por outro não deve ser demasiado elevada, de modo a fazer desaparecer o perfil da rede. A espessura óptima, determinada empiricamente, é de 100 nm e a massa de alumínio é aproximadamente de 5.5g; cortar a quantidade necessária de alumínio e desengordurá-la num banho de tricloroetileno; retirar o pedaço de alumínio do tricloroetileno com uma pinça, secá-lo e colocá-lo sobre a mesa na resistência. Evitar sujá-lo e, sobretudo, nunca lhe tocar com os dedos; soprar suavemente sobre a matriz em silicone com ar comprimido seco e colocá-la sobre a mesa da câmara de vácuo, com a rede virada para cima; fechar a câmara de vácuo e fazer um vácuo da ordem dos 10^{-4} mBar (10^{-2} Pa); aumentar a intensidade da corrente até ao alumínio começar a evaporar. Deixar evaporar durante alguns minutos; cortar a corrente, deixar entrar o argón e retirar a matriz da câmara de vácuo. A superfície da rede deve estar reflectora, homogénea e sem traços.

O processo de revestimento das redes replicadas em silicone foi executado, na fase inicial, recorrendo aos laboratórios do INESC Porto, onde existe um equipamento de vaporização de alumínio puro. Para a elaboração desta operação de revestimento de superfície tivemos o precioso apoio do Prof. Paulo Marques da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

Durante este estudo observaram-se algumas dificuldades com o processo do revestimento quando o objectivo é um revestimento uniforme ao longo de toda a área da rede. A optimização deste processo implicou algumas correcções e afinações.

No caso em análise fizeram-se duas amostras, uma primeira amostra (Amostra 1) em que se fez um revestimento de 80 nm (20 + 60 nm), uma segunda amostra (Amostra 2) em que se fez um revestimento de 80 nm (20 + 60 nm). Na Amostra 2 aplicou-se uma película de *wetting agent* (*photo-flo*) entre a primeira e segunda camada.

Numa primeira análise, a olho nu, verificou-se que a qualidade dos revestimentos não parecia ser muito boa. Contudo, comparando as duas amostras a Amostra 1 parecia ter um revestimento mais uniforme, sendo, no entanto, de cor escura e baça com um baixo índice de reflexão. A Amostra 2 era menos uniforme, apresentando zonas com uma aparência muito má, enquanto outras tinham um aspecto de boa qualidade, e elevado índice de reflexão. Nas figuras seguintes mostram-se algumas fotografias das amostras, obtidas no microscópio óptico.

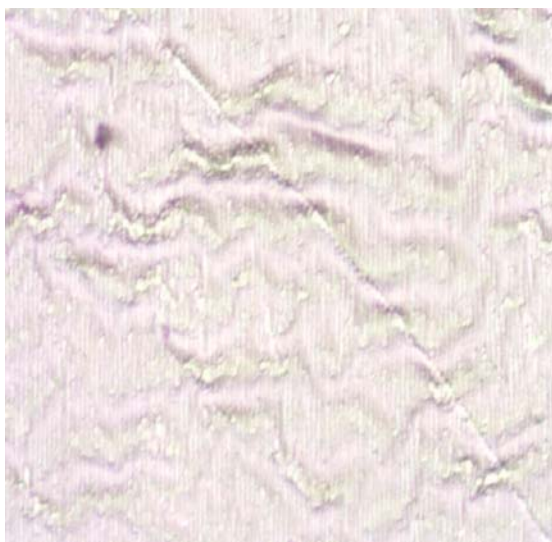


Figura 5.12 Revestimento da rede de silicone com Al na Amostra 1, ampliação 500X.

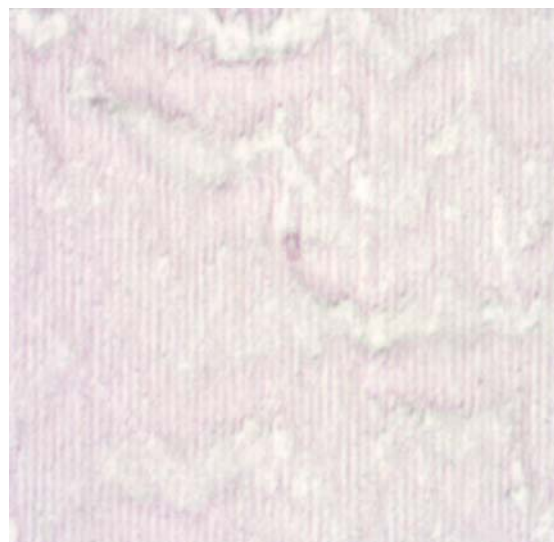


Figura 5.13 Revestimento da rede de silicone com Al na Amostra 1, ampliação 1000X.

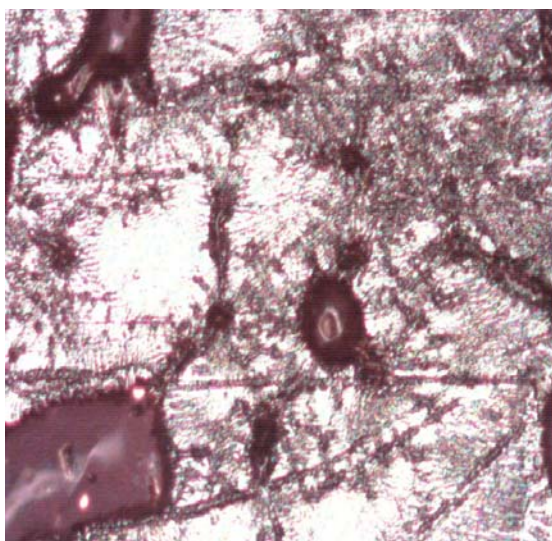


Figura 5.14 Revestimento da rede de silicone com Al na Amostra 2 numa zona de má qualidade, ampliação 50X.



Figura 5.15 Revestimento da rede de silicone com Al na Amostra 2 numa zona de boa qualidade, ampliação 50X.

Pela observação das figuras pode verificar-se que, aparentemente, na Amostra 1 o revestimento não é uniforme, observando-se ondulações da película de alumínio que não acompanham a geometria da rede de difracção. No caso da Amostra 2 tem zonas diferenciadas de boa e má qualidade.

Após a fase de revestimento da rede em silicone é necessário transferi-la para a superfície da peça que se pretende analisar. Esta transferência é feita a partir do molde de silicone revestido com a película de alumínio sobre um filme dum adesivo de epóxico (Spabond 720) que é colocado sobre a superfície da peça em estudo (proвете). A superfície para colocação da rede deve estar bem limpa e desengordurada, deverá ser plana e ligeiramente polida. Assim, para se fazer a replicação da rede de difracção para o provete foi colocado um pouco de adesivo sobre o molde de silicone (ver figura 5.16 a), espalhando-o o mais uniformemente e fino possível, de seguida colocou-se o provete sobre a camada de adesivo, apertou-se o molde com a rede de difracção e o provete utilizando um grampo. Limpou-se com um cotonete o excesso

de adesivo que saiu pelos bordos (figura 5.16 b), esperou-se que a resina polimerizasse e, finalmente, procedeu-se à separação entre o provete e o molde (figura 5.16 c).

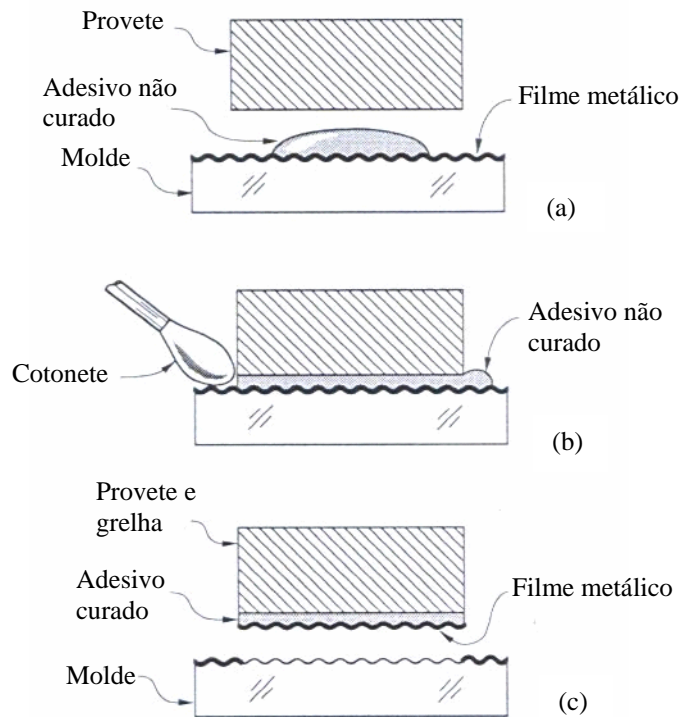


Figura 5.16 Passos para a replicação da grelha na superfície do provete. O filme metálico reflector é transferido para a rede do provete.

Como a interface mais fraca ocorre entre o filme de alumínio e a rede de silicone, significa que o filme vai ficar colado ao adesivo e, conseqüentemente, irá ficar no provete como se pretende. O resultado final é a obtenção duma rede de difracção de elevada frequência com grande índice de reflexão na superfície do provete.

Num dos casos estudados conseguiu-se fazer a replicação da rede no provete, mas dado que o revestimento tinha uma fraca qualidade os resultados não foram os melhores.

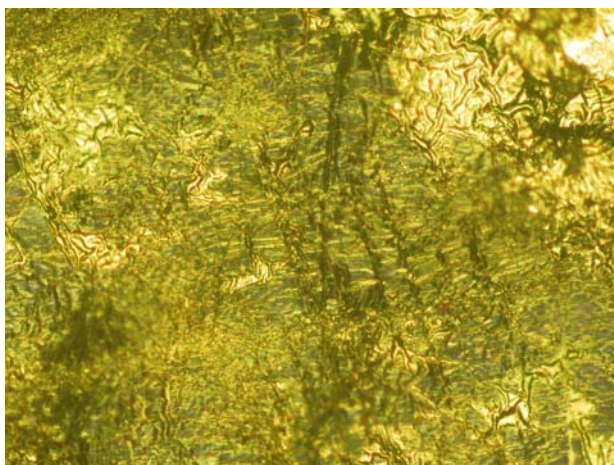


Figura 5.17 Replicação da rede da Amostra 1 no provete, ampliação 200x.

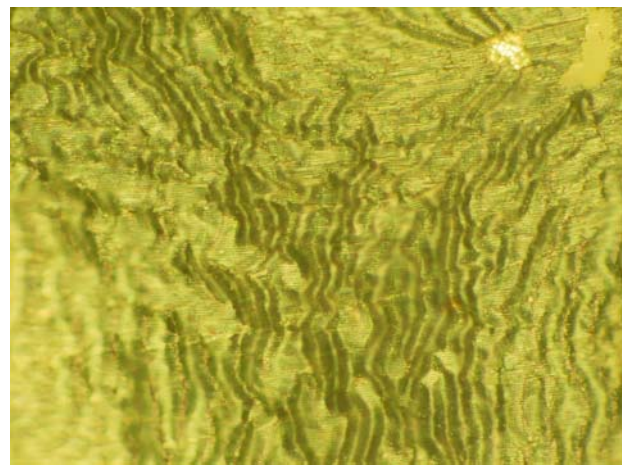


Figura 5.18 Replicação da rede da Amostra 1 no provete, ampliação 500x.

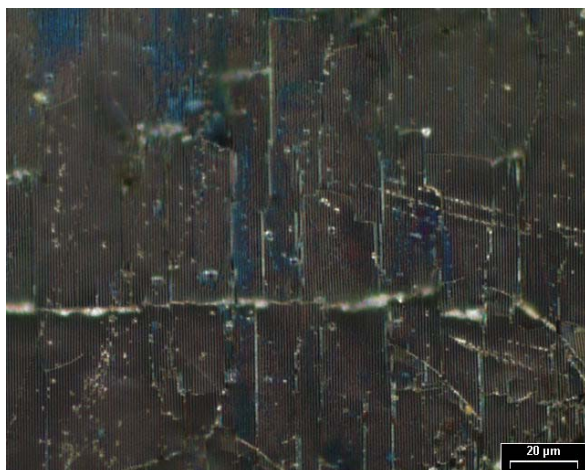


Figura 5.19 Replicação da rede da Amostra 2 no provete, ampliação 500×.

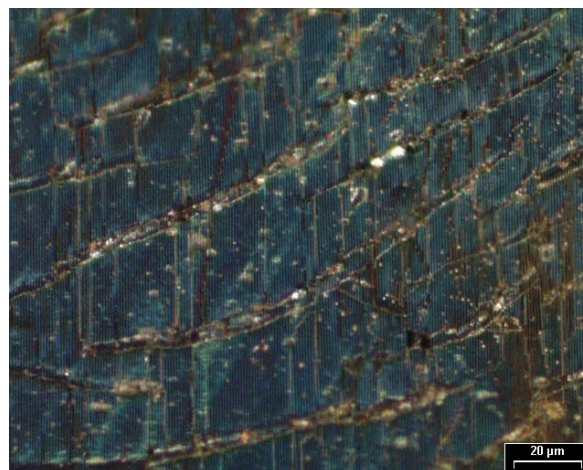


Figura 5.20 Replicação da rede da Amostra 2 no provete, ampliação 500×.

Pela análise das figuras pode concluir-se que a replicação da rede utilizando a Amostra 2 tem melhor qualidade do que a obtida com a Amostra 1. O único problema é que apenas uma pequena parte da Amostra 2 possuía um revestimento com boa qualidade, conseqüentemente só essa área foi replicada com qualidade suficiente para ser utilizada na técnica de Moiré interferométrico.

Desta primeira abordagem ao problema dos revestimentos metálicos das redes de difracção verificou-se que, quer a produção dos moldes de silicone, quer a replicação da rede de difracção na peça/provete foi praticamente conseguida, embora se revela-se a necessidade de algumas afinações para melhoria destes processos. O processo de revestimento metálico encontrava-se ainda numa fase precoce, necessitando de um maior número de experiências e afinações para sua optimização.

Na tabela 5.3 faz-se uma comparação resumida das principais diferenças entre a Amostra 1 e a Amostra 2, bem como os conseqüentes resultados na replicação das redes no provete.

Tabela 5.3 Observação de resultados nas duas amostras, antes e depois da replicação.

	Amostra 1	Amostra 2
Antes da replicação	Revestimento de baixa qualidade (ondulações).	Revestimento: intercalado de baixa e boa qualidade.
	Baixo índice de reflexão.	Índice de reflexão: intercalado de baixo e elevado.
	Fraca difracção da luz.	Difracção da luz: intercalado de zonas com boa difracção com outras de fraca difracção.
Depois da replicação	Revestimento da rede replicada é de baixa qualidade (ondulações e fracturas).	Revestimento da rede replicada varia entre zonas de baixa (mas melhor que na amostra 1) e aceitável qualidade. Aparecem sempre algumas fracturas do revestimento.
	Baixo índice de reflexão da rede replicada.	Índice de reflexão da rede replicada: intercalado de baixo e elevado.
	Dificuldade na difracção da luz da rede replicada.	Difracção da luz da rede replicada: intercalado de zonas com boa difracção com outras de fraca difracção.

Na tentativa de encontrar um método que permitisse um revestimento de melhor qualidade das redes de silicone experimentou-se o processo de *sputtering*. Para tal foi necessário recorrer ao laboratório do Departamento de Física da Universidade do Minho. Pretendeu-se, fundamentalmente, estudar outro processo de revestimento da rede de silicone com alumínio, para analisar a qualidade final da rede replicada no provete.

Após a obtenção da matriz em silicone procedeu-se ao revestimento da rede com alumínio puro utilizando *sputtering*. Revestiram-se duas redes de silicone (Amostras 3 e 4).

Os resultados obtidos estão apresentados nas figuras seguintes. Estas representam a superfície revestida com alumínio ampliadas em microscópio óptico.

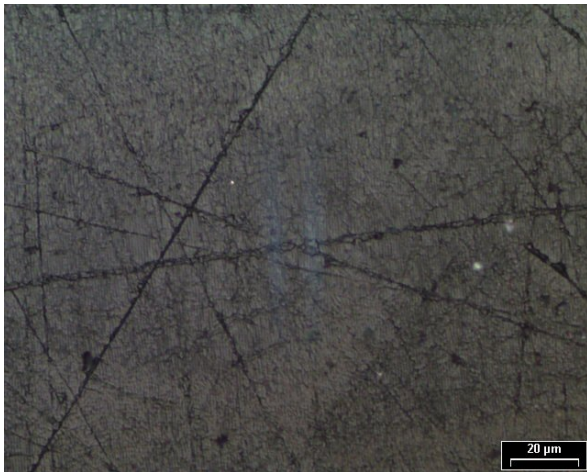


Figura 5.21 Rede de difração da Amostra 3 revestida com A3, ampliação de 500X.



Figura 5.22 Rede de difração da Amostra 4 revestida com A3, ampliação de 500X.

Numa primeira análise, sem qualquer ampliação, a película de Al aparentava ter uma espessura muito fina, tão fina que a superfície parecia transparente. Uma análise ao microscópio óptico revelou que a película de Al recobre por completo e uniformemente a rede impressa no silicone. Embora a rede em silicone contenha alguns riscos estes provêm da matriz e poderão ser evitados utilizando uma grelha original nova.

Sugeriu-se, nesta fase, a utilização de uma película de Al com maior espessura. A utilização de uma rede original poderia ser feita posteriormente quando o processo de deposição do Al na rede de silicone estivesse dominado. A replicação da rede no provete foi executada a partir do molde de silicone revestido com a película de alumínio, seguindo os procedimentos descritos na Figura 5.16.

Como a interface mais fraca ocorre entre o filme de alumínio e a rede de silicone, significa que o filme ficará colado ao adesivo. No caso em estudo conseguiu fazer-se a replicação de uma das redes no provete (Amostra 3), com a outra rede (Amostra 4) não se conseguiu a replicação, isto é, não foi possível transferir a película de alumínio da rede de silicone para o provete. Daqui, pode concluir que a aderência foi diferente para os dois casos em análise ocorrendo uma menor aderência na amostra 3. Nas figuras seguintes, obtidas no microscópio óptico, mostram os resultados alcançados:

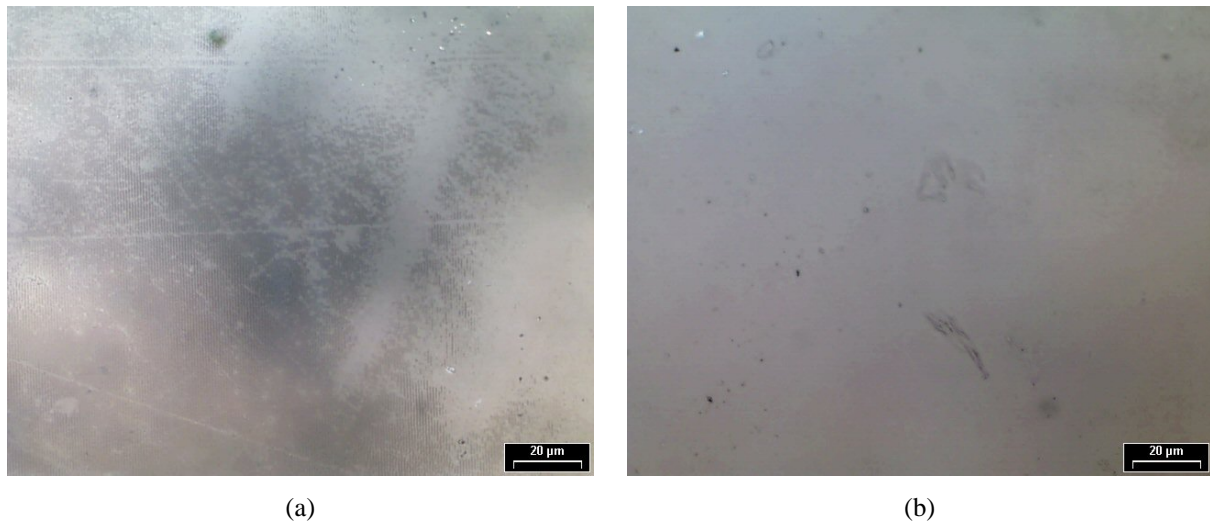


Figura 5.23 Replicação da rede da Amostra 3 em diferentes regiões do provete, ampliação 500×.

Pela análise da Figura 5.23 pode verificar-se que a replicação da rede com a amostra 3 não é uniforme, existem regiões em que a replicação é praticamente perfeita (Figura 5.23 (a)) enquanto noutras (Figura 5.23 (b)) não houve qualquer transferência da película de Al do silicone para o epóxico.

Da análise dos resultados obtidos utilizando a técnica de revestimento *sputtering* podem tirar-se as seguintes conclusões:

- O revestimento da matriz de silicone é bastante uniforme;
- A espessura do revestimento é muito fina. Deve lembrar-se que esta técnica foi desenvolvida para aplicação de revestimentos de espessuras finas;
- Na amostra em que se conseguiu a transferência, esta não foi uniforme, originando regiões com boa transferência e outras em que não se consegue transferir nenhum alumínio;
- A aderência do Al ao silicone numa das amostras foi demasiado elevada, não se conseguindo transferir a película de Al do silicone para o epóxico. Esta técnica tem como principal característica a obtenção de revestimentos com elevada aderência ao substrato. Logo pode concluir-se que este revestimento não é o mais adaptado a aplicação em causa.

Como os resultados obtidos, utilizando o método de *sputtering*, não foram satisfatórios, voltou-se novamente à técnica de vaporização de alumínio, a mais referenciada em aplicações de revestimentos de redes de Moiré interferométrico. Recorreu-se para isso ao Departamento de Física da Universidade de Aveiro. Foram executados revestimentos sobre redes de silicone, em três amostras diferentes, na Figura 5.24 estão representadas as três amostras obtidas.

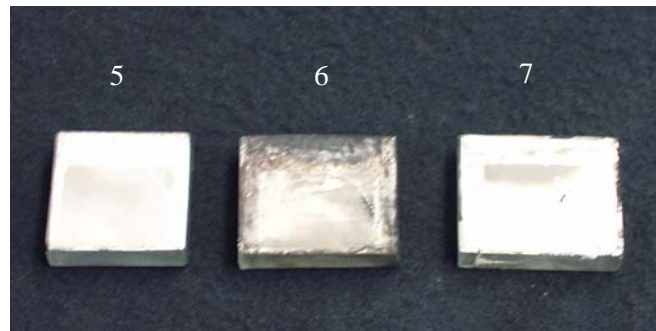


Figura 5.24 Amostras de revestimentos em Al de redes difracção executadas na Universidade de Aveiro.

Numa primeira análise pode verificar-se que a Amostra 5 tem um revestimento com um baixo coeficiente de reflexão, esta amostra não foi replicada para nenhum provete. As Amostras 6 e 7 têm uma reflexão muito mais elevada, embora a Amostra 7 tenha uma região cuja reflexão seja bastante inferior ao resto da superfície da amostra. Fez-se uma análise dos revestimentos recorrendo ao microscópio óptico com o objectivo de verificar o estado superficial para cada uma das amostras.

Na Figura 5.25 estão representadas as imagens obtidas no microscópio óptico observadas com uma ampliação de 500 vezes. Embora tenham sido obtidas várias imagens para cada amostra, só estão representadas as imagens mais representativas para cada uma delas.

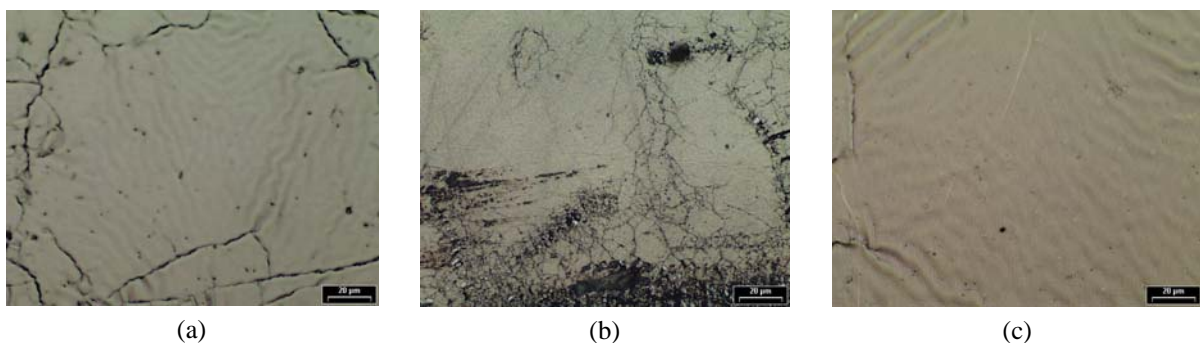


Figura 5.25 Observação da superfície das amostras revestidas com alumínio, com uma ampliação de 500x: (a) amostra 5; (b) amostra 6; (c) amostra 7.

Observando as imagens da Figura 5.25, pode verificar-se que a superfície da Amostra 5 se encontra bastante homogénea, o revestimento acompanha a geometria da rede de difracção, pressupondo-se com uma espessura aproximadamente constante, contudo notam-se algumas ondulações do revestimento, este fenómeno poderá dever-se aos diferentes coeficientes de contracção do silicone e do alumínio, ocorrendo o levantamento da camada de alumínio. Nesta amostra pode, também, verificar-se que a película de alumínio sofreu alguma fissuração.

Na Amostra 6 pode notar-se, que o substrato reagiu com o revestimento de alumínio dando origem a uma camada escura e muito opaca, este reacção terá ocorrido possivelmente devido a um excesso de pó e outros elementos de sujidade que existiam na superfície da rede de silicone. A Amostra 7 é muito parecida com a Amostra 5, tendo um revestimento mais homogéneo. O descolamento da película de alumínio relativamente à rede de silicone ocorreu em menor grau e praticamente não há fissuração da camada de alumínio; isto deveu-se ao facto de terem sido utilizados diferentes parâmetros para a vaporização do alumínio: neste

ultimo caso o processo de vaporização foi feito durante um período maior, utilizando menor energia. Na parte superior da Amostra 7 a superfície ficou com uma aparência similar à existente na Amostra 6, possivelmente devido a uma deficiente limpeza daquela região da amostra.

As redes das Amostras 5 e 7 foram replicadas para provetes que seriam utilizados para medições. O caso da rede da Amostra 5 foi replicado para um provete de tracção em alumínio e cujo ensaio se encontra descrito no capítulo 5, deste trabalho. A rede da Amostra 7 foi replicada para a superfície dum perfil laminado IPE, com o objectivo de medir tensões residuais. Contudo, durante o procedimento de separação do molde parte da película de alumínio ficou agarrada à superfície deste, inviabilizando a sua utilização.

Fez-se, também, um estudo no qual foi utilizado como revestimento da rede de difracção o ouro. O revestimento foi executado no CEMUP (Centro de Materiais da Universidade do Porto), com a colaboração do Dr. Carlos Sá. Foi utilizada a técnica de *sputtering* para revestir a superfície da rede de difracção feita em silicone. Foram realizados vários testes em duas amostras, utilizando máscaras para proteger partes da amostra, permitindo variar os parâmetros desta técnica de revestimento.

Numa amostra foi utilizado como gás de ionização o hélio e na outra o árgon. Foram ainda, utilizados diferentes valores de corrente eléctrica, 5 e 10 mA. A qualidade dos revestimentos foi bastante fraca para ambas as amostras. Contudo o índice de reflectividade foi o mais elevado de todos revestimentos que se fizeram durante este trabalho. Da análise dos resultados, verificou-se que as correntes utilizadas não alteravam significativamente a qualidade dos revestimentos, contudo o gás ionizante provocou dois comportamentos distintos nos revestimentos. Enquanto que o revestimento com árgon originava revestimentos muito fissurados, nos revestimentos com hélio verificou-se uma ondulação muito elevada (várias vezes superior ao passo da rede).

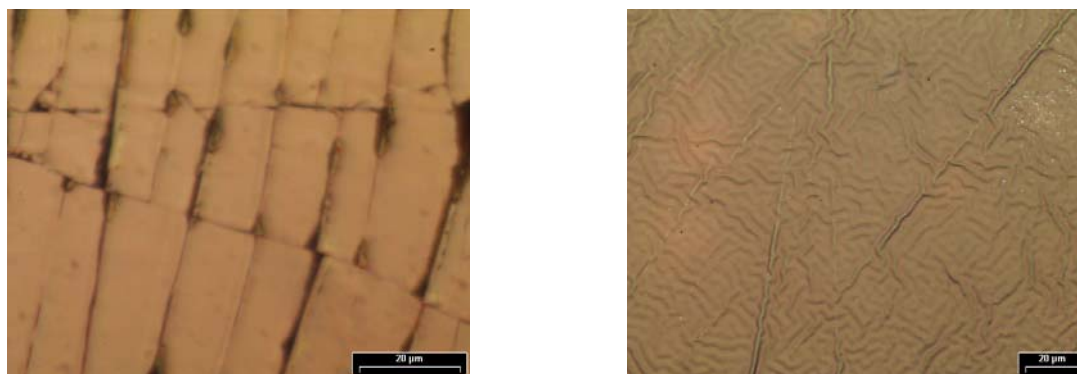


Figura 5.26 Observação da superfície das amostras revestidas com ouro: (a) revestimento fissurado (árgon); (b) revestimento ondulado (hélio).

Algumas zonas do revestimento apresentavam boa qualidade, contudo tratava-se de regiões isoladas e muito pequenas, manifestamente insuficientes para serem utilizadas em qualquer medição. Tendo em conta os testes realizados e os resultados obtidos pode concluir-se que esta técnica não está bem adaptada para o revestimento de redes de difracção fabricadas em silicone.

A utilização de silicone como material para o fabrico de redes intermédias não se mostrou como uma boa solução para a replicação de redes de Moiré interferométrico.

5.1.2.2 Rede intermédia de epóxico

A qualidade da rede de difracção transferida para a superfície do provete utilizando como rede intermédia ou molde em silicone, não se revelou adequada para as aplicações pretendidas. Decidiu-se então optar pela utilização de redes intermédias feitas em epóxico. Este material apresenta uma maior rigidez, a capacidade para suportar temperaturas mais elevadas sem perda significativa das propriedades mecânicas e uma menor reacção com agentes ambientais, principalmente partículas de pó existentes no ar e que posteriormente poderiam reagir com o metal vaporizado. A técnica de replicação da rede é idêntica à descrita no ponto anterior, as únicas diferenças são: a rede preexistente, representada na Figura 5.8, corresponde à rede replicada em silicone. Desta forma é introduzida mais uma etapa que corresponde a replicação da rede de silicone para o epóxico. Esta rede em epóxico é revestida por um material reflector por processos idênticos aos descritos no ponto anterior, e depois transferida para o provete (Figura 5.16). Contudo, foi introduzida uma ligeira diferença no processo de revestimento da rede de difracção fabricada em epóxico. Este processo passou a ser executado em duas fases: na primeira fase em que se procede a um revestimento directo da superfície do epóxico com uma espessura de cerca de 30 nm, na segunda retira-se o molde revestido da câmara de vácuo limpa-se a superfície do material reflector com uma mistura de água e um *wetting agent* (Kodak PhotoFlo[®]), numa proporção de mil partes de água para uma do *wetting agent*. Desta forma é criado um filme muito fino desta mistura sobre a primeira camada de revestimento. Esta mistura passa depois por uma secagem durante cerca de 24 horas, a uma temperatura de 20°C. Após este procedimento o molde é colocado novamente na câmara de vácuo e é realizada a segunda camada de revestimento, que deverá ter cerca de 70 nm. Após esta segunda camada de revestimento a rede de difracção está pronta para ser transferida para a superfície do provete ou peça onde serão medidos os campos de deslocamentos. A transferência da rede de difracção deverá ser feita seguindo os procedimentos descritos na Figura 5.16. Contudo, após a separação do molde do provete, mantém-se a primeira camada de revestimento no molde, este poderá ser novamente revestido. Um molde em epóxico poderá ser utilizado cerca de dez vezes sem sofrer uma grave degradação, obviamente com aumento do número de utilizações a rede vai sofrendo uma degradação progressiva até deixar de poder ser utilizada.

O revestimento da rede intermédia de epóxico foi executado por um processo de vaporização e o material reflector utilizado foi o alumínio puro. Foram feitas algumas amostras cujas imagens ampliadas estão representadas na Figura 5.27.

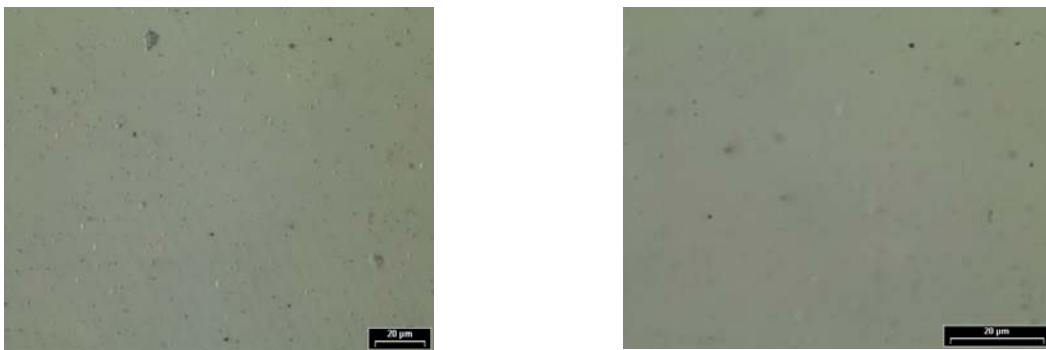


Figura 5.27 Rede intermédia de epóxico revestida com alumínio, após segundo revestimento.

Pela análise da Figura 5.27 pode verificar-se que a qualidade do revestimento das redes melhorou significativamente. Este último processo, obtido em colaboração com o grupo de opto-electrónica da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, permitiu obter as melhores redes que foram depois utilizadas nas medições que integrar os capítulos finais deste trabalho.

5.2 Preparação de superfícies para a técnica de Correlação de Imagem

Quer no Moiré geométrico, quer no Moiré interferométrico é necessário codificar a superfície com um padrão regular. A resolução das medidas e a sua sensibilidade dependem da frequência e orientação dos padrões utilizados. Com o aumento das capacidades dos sistemas de processamento de imagem ganhou importância uma técnica de medição de deslocamentos designada por correlação digital de imagem. Na literatura anglo-saxónica é corrente a designação por DIC – *Digital Image Correlation*. Embora a resolução desta técnica seja bastante inferior à do Moiré Interferométrico e as medições sejam discretas a sua simplicidade justifica a atenção que lhe tem sido dedicada nos últimos anos.

A técnica de correlação de imagem requer um padrão de intensidades aleatório na superfície da peça ou estrutura (amostra) que se pretende medir. Os requisitos na preparação da amostra dependem da ampliação do sistema óptico e das características da superfície do provete. Mas, em geral, a técnica requer informação pontual numa escala de cinzento numa ordem de grandeza de 1 *pixel* para o CCD ou câmara fotográfica utilizados para a gravação da imagem.

Para a medição de macro-deformações é suficiente uma preparação da superfície utilizando um revestimento aleatório pintando pequenos pontos negros. Para ampliações mais elevadas pode ser usada grafite coloidal ou a superfície pode ser alterada de modo a obter-se um contraste localizado. Um polimento pouco fino pode ser suficiente para provocar a alteração de contraste suficiente para algumas aplicações.

As aplicações da técnica de correlação de imagem usadas neste trabalho foram realizadas na medição de macro deformações, como tal foram desenvolvidas algumas técnicas de preparação da superfície que garantissem uma boa codificação das superfícies. Como primeira aproximação pensou-se na utilização de superfícies “granitadas”. Existem no mercado algumas tintas que permitem obter uma textura com essas características. Na Figura 5.28 está representada uma superfície “granitada” utilizada em alguns testes desenvolvidos no âmbito deste trabalho.



Figura 5.28 Superfícies “granitada” utilizada em correlação de imagem (ampliação de 5x).

Após alguns testes e cálculos utilizando os algoritmos de correlação de imagem verificou-se que a textura era demasiado grosseira, originando uma resolução muito baixa para a maioria das aplicações em análise experimental de tensões, contudo mostrou-se bem adaptada para o estudo do campo de deslocamentos de provetes de madeira ensaiados à flexão. Nestes casos as deformações que decorrem são muito elevadas o que permite a utilização deste tipo de textura.

Como a textura “granitada” não está bem adaptada à maioria das aplicações pretendidas, desenvolveu-se uma outra metodologia de preparação de superfícies que permite uma resolução suficientemente elevada para algumas aplicações de ensaios mecânicos. Esta metodologia de preparação das superfícies é executada em duas fases: numa primeira fase o provete é pintado de branco *matt*, de forma a criar uma superfície totalmente homogénea e pouco brilhante; posteriormente pulveriza-se essa superfície, utilizando um *spray* muito fino de tinta preta *matt*. Na Figura 5.29 está representada uma imagem da textura obtida recorrendo à técnica descrita.



Figura 5.29 Superfícies pulverizada com spray muito fino (ampliação de 5x).

Observando a Figura 5.29 pode verificar-se que a resolução (número pontos escuros por unidade de área) obtida com esta técnica é mais elevada. Com esta preparação foi possível medir o campo de deslocamentos em ensaios de tracção com provetes de alumínio.

Ficam assim descritas as técnicas de preparação de superfície utilizadas durante este trabalho para realizar medições de deslocamentos no plano. Deve referir-se que as técnicas interferométricas não necessitam deste tipo de preparação pois utilizam o padrão de *speckle* gerado pela textura microscópica da superfície. Em certas situações, envolvendo reflexões fortes ou muito fracas, é também necessária alguma preparação da superfície recorrendo a pinturas *matt* ou com tinta branca. As pinturas utilizadas para este efeito são normalmente removidas após as medições e não interferem com a textura da superfície, razão pela qual se diz que as técnicas interferométricas não necessitam de preparação das superfícies.

Referências:

- [1] Kujawska, Molgorzata, *Automated in-plane Moiré techniques and grating interferometry*, published by Warsaw University of Technology, 2000.
- [2] Cloude, Gary, *Optical Methods of Engineering Analysis*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998, pg. 159-163.
- [3] Ribeiro, J., Vaz, M. e Piloto, P., *Medição de Campos de Deslocamentos Recorrendo à Técnica de Moiré*, V Encontro Nacional da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET), nos Proc., Coimbra, 2004.
- [4] IGPAI – Repartição de Normalização, 1973, *Ensaio de flexão estática de madeira*, NP619, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

CAPÍTULO 6

MEDIÇÃO DE CAMPOS DE DESLOCAMENTOS NO PLANO COM TÉCNICAS ÓPTICAS

6 MEDIÇÃO DE CAMPOS DE DESLOCAMENTOS NO PLANO COM TÉCNICAS ÓPTICAS

Este capítulo enquadra-se no âmbito deste trabalho, como uma tentativa de encontrar técnicas ópticas de medição que possam ser adaptadas e aplicadas à técnica do furo para medição de tensões residuais. Assim, neste capítulo realizaram-se algumas medições de campos de deslocamentos no plano utilizando Moiré (geométrico e interferométrico) e correlação de imagem, tendo como objectivo a validação destas técnicas de medição.

6.1 Moiré geométrico

Tal como foi referido no capítulo 3 a técnica de Moiré geométrico tem um vasto campo de aplicação para a medição de campos de deslocamento, tendo como principal limitação a sua resolução, que é muito baixa para a maioria das aplicações em mecânica experimental. Contudo, ela pode ser aplicada nos casos em que os deslocamentos são relativamente elevados como por exemplo nos ensaios de tracção de materiais muito dúcteis (algumas ligas de alumínio ou materiais poliméricos), ensaios de impacto em que o material sofre uma elevada deformação antes de atingir a rotura. Assim, estudaram-se duas aplicações em que esta técnica pode ser utilizada com bons resultados.

6.1.1 Ensaio de tracção dum provete de alumínio com furo central

O estudo do campo de deslocamentos num provete de alumínio com furo central implicou três fases: ensaio experimental com Moiré Geométrico, análise dos resultados experimentais recorrendo a programas de processamento de imagem, simulação numérica do ensaio e as conclusões alcançadas a partir dos resultados experimentais e numéricos.

6.1.1.1 Ensaio experimental

O procedimento experimental envolvido neste trabalho dividiu-se em três fases. Numa primeira fase efectua-se a determinação de algumas propriedades mecânicas do material a partir dum ensaio de tracção. A segunda fase corresponde à obtenção das redes para Moiré e sua gravação no objecto e ensaio do provete com a respectiva rede. Para forçar o aparecimento da superfície de rotura no meio do provete, este foi dotado de um furo central com 1,5 mm de diâmetro.

Realizaram-se três ensaios de tracção para a determinação de algumas propriedades mecânicas da liga de alumínio utilizada (1050 com 99,5% de Al [1]), estes ensaios e a determinação das propriedades estão descritas no anexo A. Os valores médios das propriedades obtidas a partir dos ensaios estão indicados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 Valores médios das propriedades mecânicas do alumínio 1050 obtidas nos ensaios de tracção.

Módulo de Elasticidade [GPa]	Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação após ruptura [%]
69	96	102	2.8

As redes de Moiré utilizadas foram obtidas pelos processos descritos no capítulo 5 para Moiré geométrico: desenhando-as num programa de CAD e imprimindo-as num papel especial (*Toner Transfer System*). Os registos assim obtidos foram transferidos para a superfície dos provetes por um processo térmico a pressão constante.

Foram desenhadas dois tipos de redes: redes com linhas paralelas e com linhas cruzadas. O primeiro caso permite a medição numa direcção enquanto que no segundo caso podem medir-se deslocamentos em duas direcções perpendiculares.

Após vários testes foi alcançado um valor máximo de 4 l/mm para o caso de linhas paralelas e 3 l/mm no caso das linhas cruzadas. A partir destes valores ocorria uma sobreposição parcial das linhas impressas, diminuindo drasticamente a qualidade das franjas obtidas na medição. Na figura seguinte representam-se as duas fotografias, obtidas com microscópio óptico, da rede transferida para superfície dos provetes do mesmo material (Al – 1050) utilizado nos ensaios.

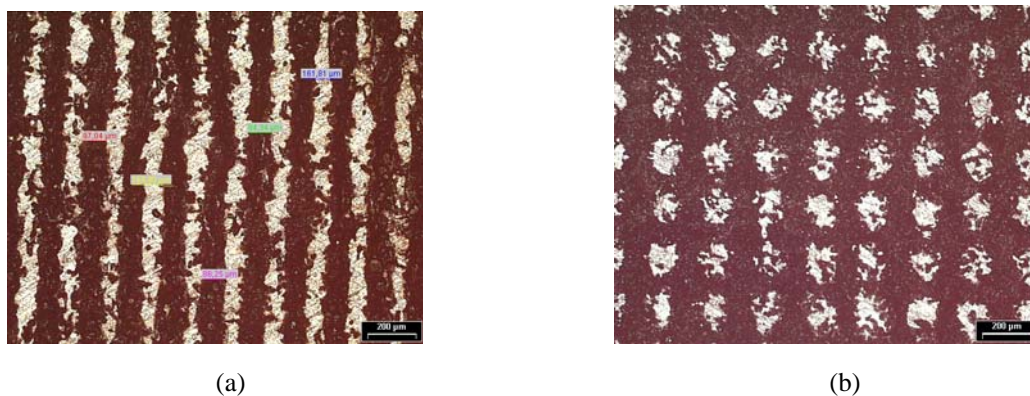


Figura 6.1 Redes transferidas para o Al: rede de linhas paralelas com resolução de 4l/mm (a); rede de linhas cruzadas com resolução de 3l/mm (b).

Depois de otimizar o processo de transferência da rede de Moiré foram realizados ensaios de provetes com redes de linhas paralelas e cruzadas. Foi utilizado um provete idêntico ao do ensaio de tracção mas com um furo de diâmetro 1,5 mm no centro do provete, tal como está representado na figura seguinte.

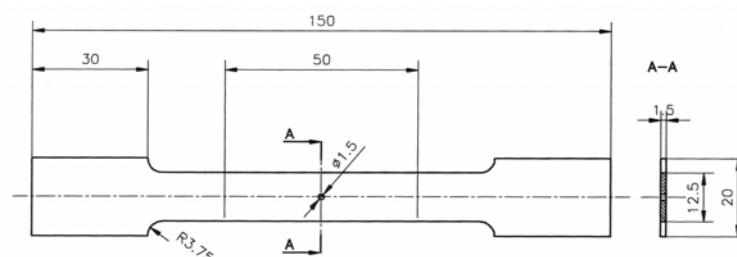


Figura 6.2 Representação do provete ensaiado com as redes de Moiré [2].

Após a transferência das redes de Moiré para a superfície do provete foram realizados os ensaios de tracção. No primeiro ensaio foi utilizado um provete com uma rede de linhas paralelas. Colocou-se o provete nas amarras da máquina de ensaios (ver Figura 6.3) e em frente foi montada uma câmara digital de elevada resolução. Ao longo do ensaio foram registadas várias imagens do provete em diferentes fases do ensaio. Para cada fotografia foi registada a força aplicada (Tabela 6.2). Das doze fotografias registadas na primeira o provete não está carregado e a última foi obtida após rotura do provete. A Figura 6.3 representa a primeira e a última fotografias do ensaio.

Tabela 6.2 Correspondência entre as fotografias e a respectiva força aplicada no provete.

Fotografia	Força [kN]
1	0.000
2	0.440
3	0.771
4	0.940
5	1.200
6	1.420
7	1.610
8	1.570
9	1.400
10	0.988
11	0.682
12	Rotura

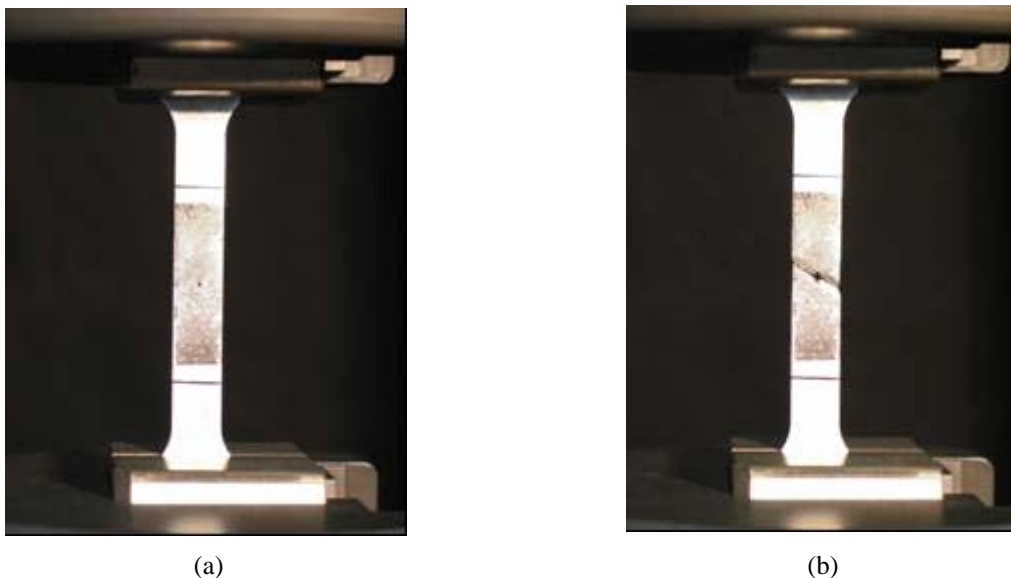


Figura 6.3 Imagens do ensaio de tracção num o provete com rede de linhas paralelas: antes da aplicação de qualquer carga (a); após rotura (b).

Para o provete com rede de linhas cruzadas utilizou-se o mesmo procedimento referido anteriormente. A Tabela 6.3 e a Figura 6.4 indicam os dados registados para este ensaio.

Tabela 6.3 Correspondência entre as fotografias e a respectiva força aplicada no provete.

Fotografia	Força [kN]
1	0.000
2	0.442
3	0.767
4	0.938
5	1.220
6	1.450
7	1.630
8	1.540
9	1.460
10	0.991
11	0.703
12	Rotura

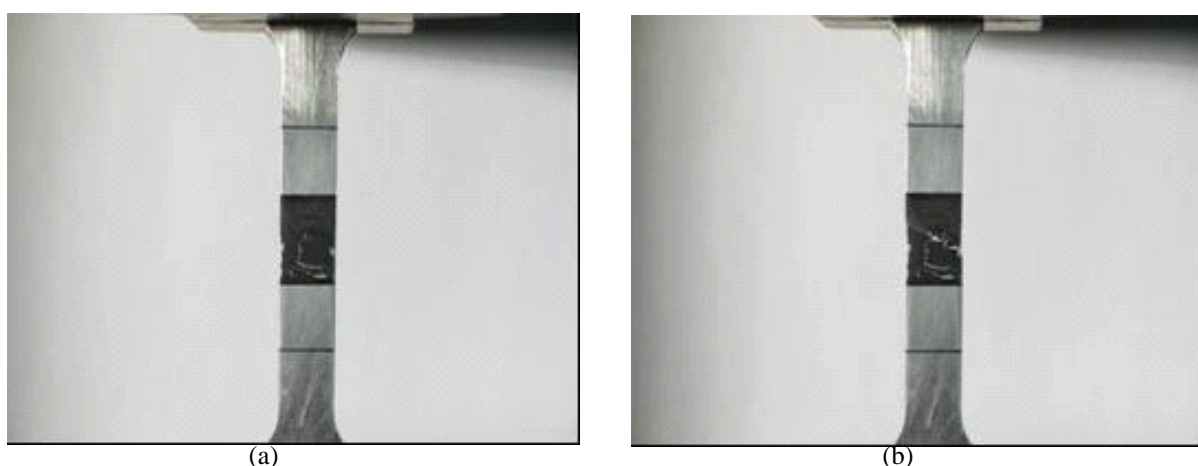
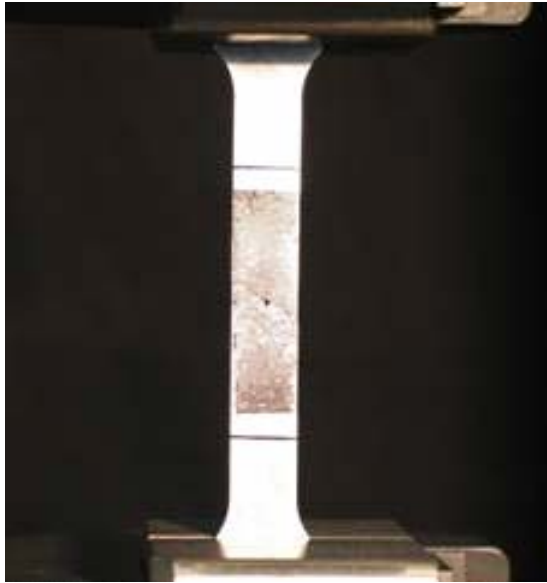


Figura 6.4 Imagens do ensaio de tracção num o provete com rede de linhas cruzadas: antes da aplicação de qualquer carga (a); após rotura (b).

Após a observação da sequência de fotografias verificou-se que só era possível observar a deformação da rede de Moiré para cargas muito elevadas, isto é, já próximo da fase de estrição, e a ocorrência é ainda mais notória no caso da rede de linhas cruzadas. Esta situação deve-se ao facto das redes terem uma resolução muito baixa.

Neste caso apenas foi possível analisar o campo de deslocamentos para o caso da rede de linhas paralelas a partir da fotografia 9 (1.4 kN) e no caso da rede de linhas cruzadas a partir da fotografia 10 (0.991 kN). Optou-se por estudar em pormenor estes dois casos particulares. Na Figura 6.5 estão representadas as fotografias 9 e 10 respectivamente para as redes paralelas e cruzadas.



(a) – linhas paralelas



(b) – linhas cruzadas

Figura 6.5 Fotografias de o ensaio de tracção num provete.

6.1.1.2 Análise de resultados experimentais

Para análise dos resultados obtidos pela deformação da rede de Moiré pode recorrer-se à comparação directa com uma rede mestra não deformada, possuindo a mesma frequência da rede inicial. Para o caso em análise pode proceder-se à utilização dum acetato no qual foi impressa a rede mestra. Sobrepondo a rede mestra com a rede deformada, é possível observar um conjunto de franjas que permitem a determinação do campo de deslocamentos do provete. Outra solução para análise da deformação da rede consiste no recurso a programas de processamento de imagem, solução utilizada neste trabalho.

Os resultados obtidos com as técnicas de Moiré desenvolvidas consistem em padrões de franjas correspondendo a linhas de iso-deslocamento na direcção normal à rede. Nestes padrões, com intensidades variando de forma aproximadamente sinusoidal, a distribuição de fase corresponde ao deslocamento. Por isso optou-se por recorrer a algoritmos de cálculo de fase espaciais que permitem uma análise mais rápida de resultados. Nestes, são normalmente utilizadas FFT's para desmodular a portadora de informação, frequência espacial da rede gravada e podem ser aplicados com apenas um padrão de franjas. Neste caso são obtidos mapas de fase possuindo descontinuidades de $-\pi$ a π . Para resolver esta limitação é necessário recorrer a um algoritmo que permita desembrulhar a fase (*unwrapping*) e assim determinar o campo de deslocamentos de forma contínua.

Para análise dos resultados obtidos experimentalmente recorreu-se aos programas de processamento de imagem referidos que permitem obter o campo de deslocamentos. No caso em estudo optou-se por fazer uma análise mais pormenorizada numa região próxima do furo. Na Figura 6.6 estão representadas as regiões dos provetes que foram analisadas [2].

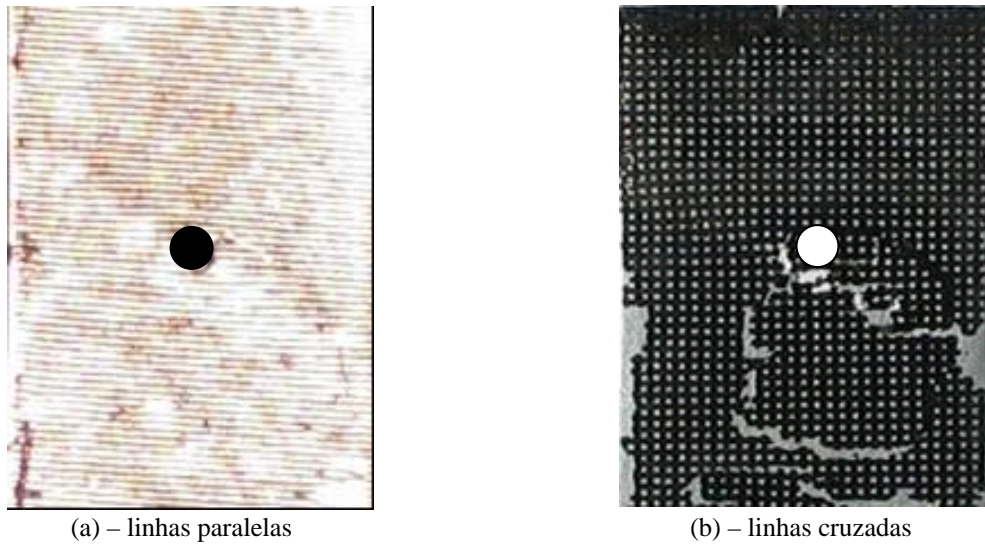


Figura 6.6 Superfície dos provetes analisada.

A partir da Figura 6.6 é possível, recorrendo às metodologias descritas no parágrafo anterior, determinar os respectivos mapas de fase.

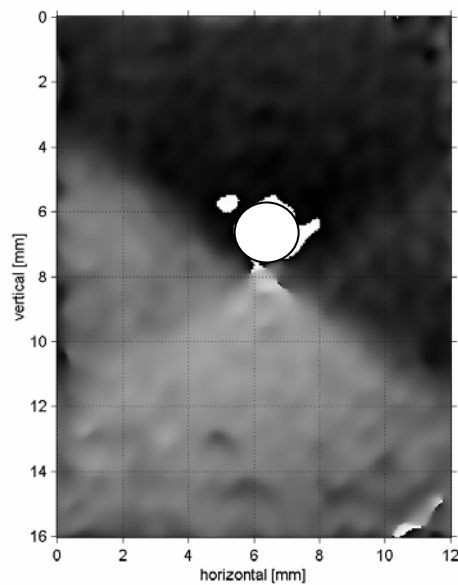


Figura 6.7 Mapa de fase da região do provete com rede de linhas paralelas.

O mapa de fase para o provete com redes de linhas cruzadas vai utilizar a portadora da direcção vertical e horizontal. Assim podemos obter os seguintes mapas de fase.

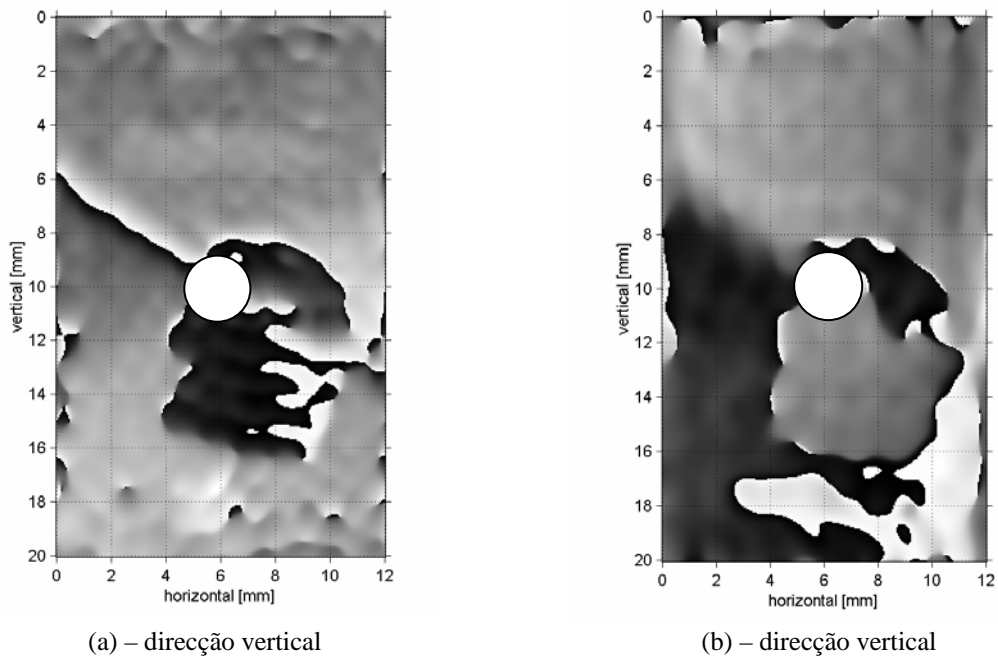


Figura 6.8 Mapa de fase da região do provete com rede de linhas cruzadas na direcção: vertical (a) e horizontal (b).

Como se pode ver na Figura 6.8 ao utilizar menor resolução para medir o campo de deslocamentos reduz-se significativamente a razão sinal ruído. Uma forma de contornar este problema consistiria em analisar apenas a região da vizinhança do furo que sofreu maiores deformações.

Após o cálculo do *unwrapping* sobre os mapas de fase, obtêm-se os seguintes campos de deslocamentos para as regiões do provete que se encontram representadas na Figura 6.6.

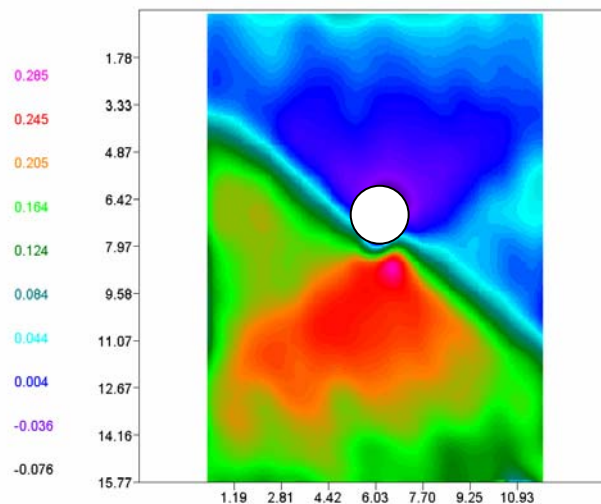


Figura 6.9 Campo de deslocamentos dos provetes com redes de linhas paralelas. Valores dos deslocamentos em milímetros.

Para o caso de linhas cruzadas determinou-se também o campo de deslocamentos contínuos

nas direcções vertical e horizontal, tal como se representa na Figura 6.10.

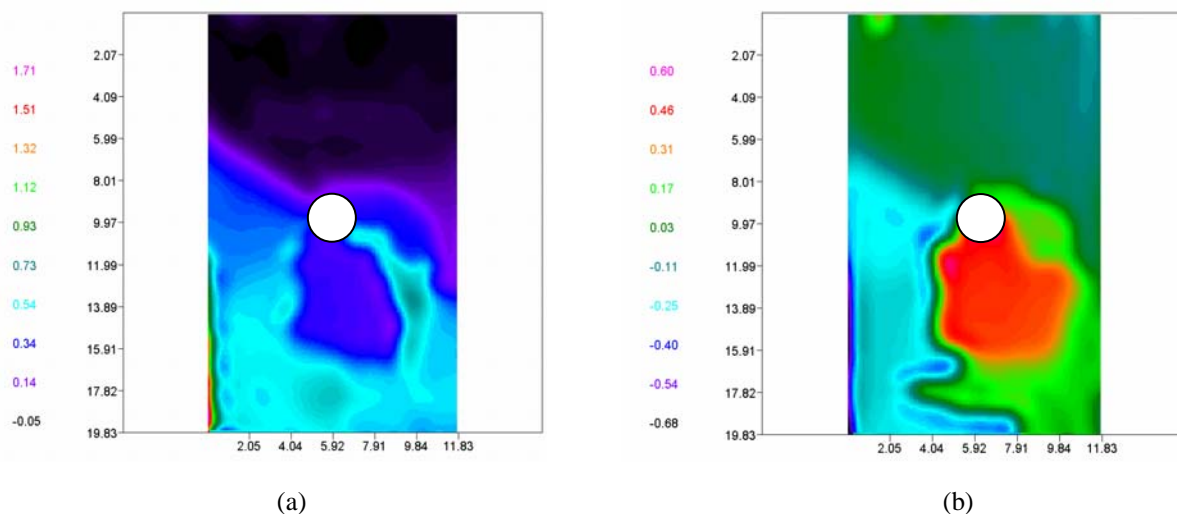


Figura 6.10 Campo de deslocamentos, em milímetros, dos provetes com redes de linhas cruzadas na direcção: vertical (a) e horizontal (b).

Da análise das Figura 6.9 e Figura 6.10(a), pode observar-se uma diferença no campo de deslocamentos obtido. Tratando-se de situações equivalentes, deveriam ter sido obtidos comportamentos semelhantes. Estas diferenças devem-se fundamentalmente à menor resolução da segunda rede.

6.1.1.3 Simulação numérica do ensaio

A simulação numérica do ensaio experimental descrito anteriormente foi realizada recorrendo ao programa de elementos finitos ANSYS®. Com o objectivo simular o ensaio de tracção do provete foi feita uma análise numérica incremental e iterativa do efeito provocado pelo orifício circular. Foi criado um modelo com geometria e dimensões idênticas ao utilizado experimentalmente e gerada a respectiva malha, impondo-se uma carga de tracção variável linearmente (0 a 1600 N). Foram utilizadas nessa modelação as propriedades do alumínio ($E=69$ GPa, $\nu = 0,3$), gerada uma malha de 3600 elementos isoparamétricos quadráticos com 8 nós [3], este tipo de elemento é denominado como *PLANE82* [4]. A malha utilizada no modelo do provete está representada na Figura 6.11.

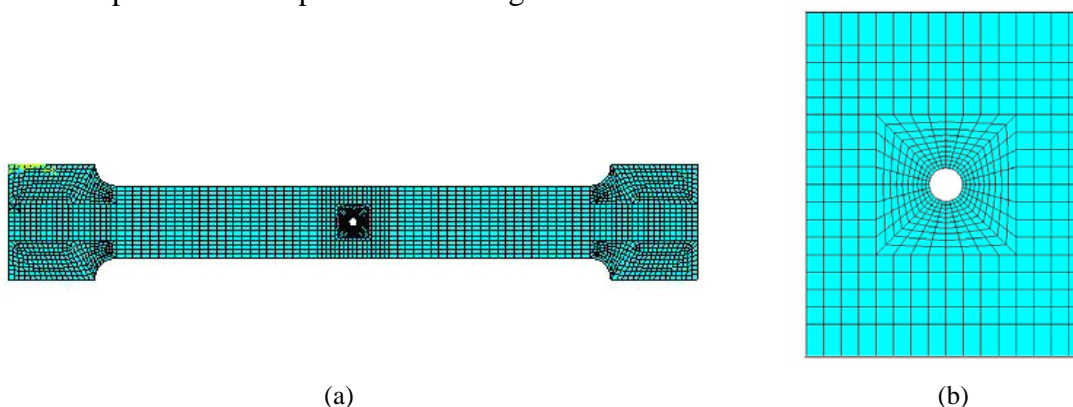


Figura 6.11 Malhagem do modelo criado para simular o provete de tracção: totalidade do provete (a), pormenor do centro do provete (b).

Neste cálculo foi obtida a distribuição do campo de deslocamentos nas direcções horizontal e vertical, para uma carga de 1600 N.

O modelo matemático utilizado na simulação utilizou um comportamento elasto-plástico multi-linear para simular o comportamento do material. No carregamento foi utilizada uma carga incremental até serem obtidas tensões superiores à tensão de cedência do material. Na Figura 6.12 estão representados os campos de deslocamentos obtidos nas direcções vertical e horizontal para uma carga de 1600 N.

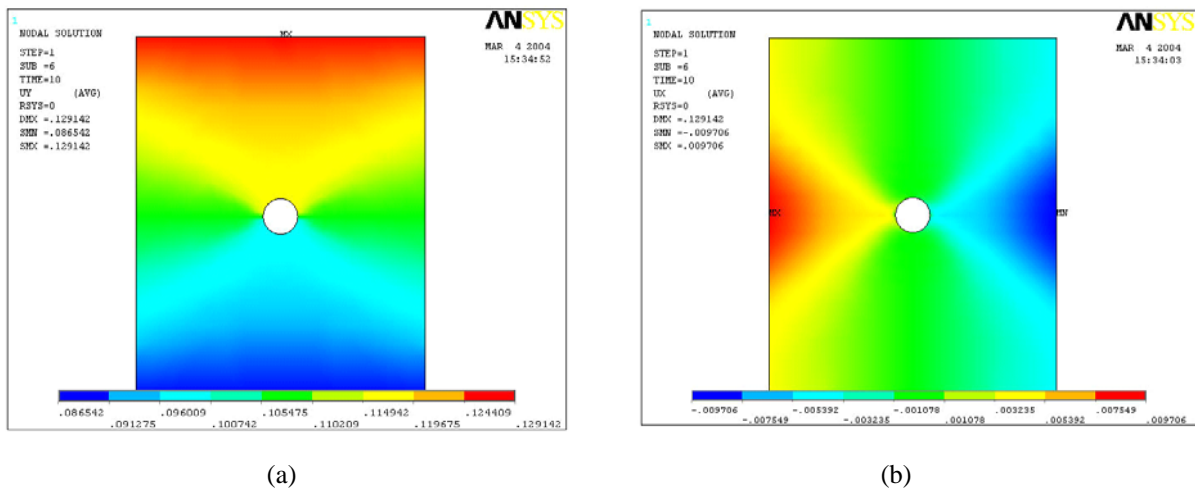


Figura 6.12 Campo de deslocamentos, em milímetros, obtidos numericamente para uma carga de 1600N na direcção: vertical (a) e na direcção horizontal (b).

Na Figura 6.13 está representada a distribuição de tensões de Von-Mises na vizinhança do furo. Como se pode observar existem duas regiões orientadas a 45° com a direcção de solicitação às quais corresponde um nível de tensão superior à tensão de cedência do material. Esta região encontra-se bem definida na maior parte dos registos obtidos experimentalmente.

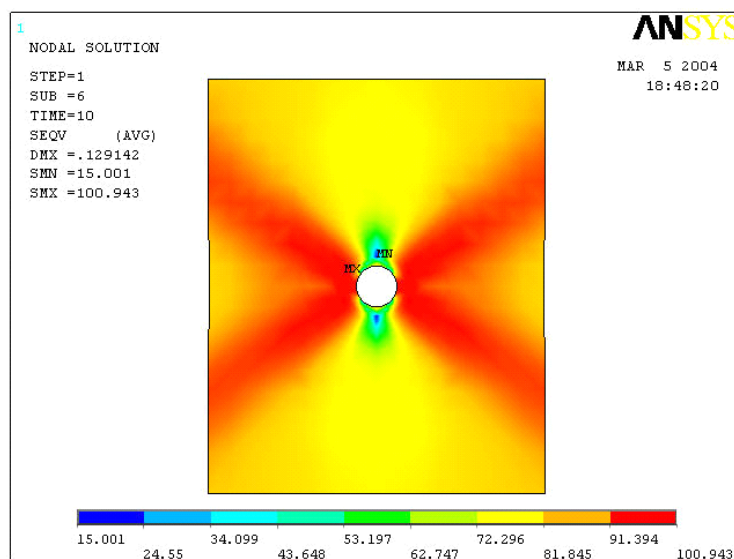


Figura 6.13 Tensões de von-Mises calculadas para a vizinhança do furo. Valores de tensão em MPa.

6.1.1.4 Conclusões

As técnicas de Moiré revelaram-se bem adaptadas à medição de campos de deslocamentos no plano. Estas técnicas permitem realizar medições além do limite elástico do material. A utilização de técnicas de processamento de imagem permite aceder ao campo de deslocamentos com facilidade.

A técnica de gravação de redes permitiu atingir frequências espaciais de 4 l/mm e 3 l/mm nos casos de redes de linhas paralelas e linhas cruzadas respectivamente. Estas resoluções são manifestamente insuficientes para analisar com detalhe o comportamento de materiais como o ensaiado neste trabalho. Contudo, os resultados obtidos com a aplicação de rotinas de processamento de imagem, especialmente desenvolvidas para o efeito, são satisfatórios.

As técnicas de Moiré geométrico para a medição de deslocamentos têm com principal vantagem a possibilidade de ajustar a frequência da rede, isto é, a resolução da medida à amplitude máxima dos deslocamentos que se pretendem medir.

6.1.2 Ensaio de tracção a elevadas velocidades de deformação

Os ensaios de impacto têm como principal objectivo a caracterização dinâmica de materiais e estruturas sob cargas súbitas [5]. Neste tipo de ensaios os provetes ensaiados deformam-se até à rotura e no caso de alguns materiais mais dúcteis a deformação pode ser muito elevada. Para estas aplicações torna-se muito interessante o recurso à técnica de Moiré geométrico. A técnica de Moiré pode ser utilizada em duas situações, acompanhando o ensaio de impacto, recorrendo a câmaras da alta velocidade, ou na análise do campo de deformações após o ensaio. Como técnica de Moiré só permite a obtenção directa do campo de deslocamentos há sempre a necessidade de o derivar recorrendo a um programa de processamento de imagem. A obtenção do campo de deslocamentos pode ser feita directamente sobrepondo a rede mestra (de referência) ou recorrendo a um programa de processamento de imagem. Duma forma sintética, pode representar-se o algoritmo do programa de processamento de imagem referido pelo seguinte organograma.

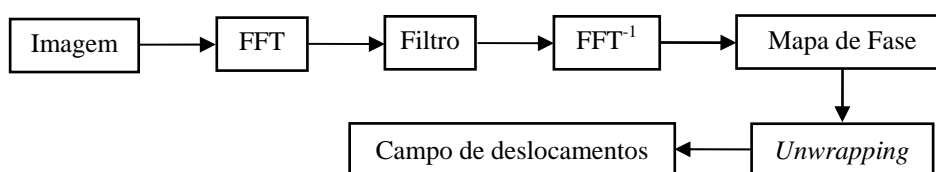


Figura 6.14 . Organograma dum programa de processamento de imagem para a determinação do campo de deslocamentos a partir da deformação da rede inicial [6].

Como o LOME não dispõe duma câmara de alta velocidade não foi possível fazer a análise da deformação do provete durante o ensaio de impacto, sendo, apenas, possível o estudo do campo de deformações após a realização do ensaio.

Para estes ensaios foi seleccionada uma liga de alumínio cuja designação é 1050 H14 pela norma ASTM B-209M. A escolha deste material teve em conta a sua boa deformabilidade e baixa dureza que permitem uma fácil maquinagem e fixação nas amarras do equipamento utilizado no ensaio de impacto (*Split Hopkinson Bar Technique* - SHBT). Na Figura 6.15 pode observar-se a forma do provete utilizado e a elevada deformação após rotura.

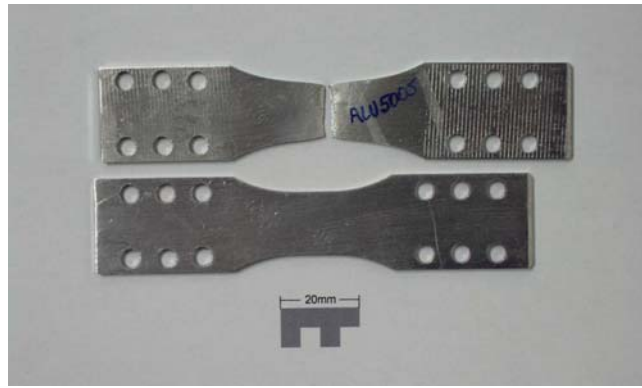


Figura 6.15 . Forma típica dos provetes de alumínio em tracção e deformação após rotura [5].

Por consulta da norma ASTM B-209M, foram obtidas as características para este tipo de liga. Na Tabela 6.4 estão indicadas os valores das principais propriedades da liga de alumínio utilizada.

Tabela 6.4 Características mecânicas e físicas da liga de alumínio 1050.

Liga e trata. térmico	Tensão de cedência [MPa]	Tensão de rotura [MPa]	Deformação após rotura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
1050 O	60	65 – 95	23 – 27	69
1050 H14	70	100 – 125	6 – 7	69
1050 H18	110	130	3 – 4	69

A rede utilizada foi obtida pelo processo descritos no capítulo 5 para Moiré geométrico. Utilizou-se uma rede de linhas paralelas e estas foram dispostas na direcção do alinhamento do provete, com uma resolução de 3 l/mm. Na Figura 6.16 está representado o provete utilizado com duas redes para Moiré gravadas em superfícies opostas, tendo cada uma o objectivo de medir os deslocamentos em diferentes direcções. As linhas horizontais permitem a medição dos deslocamentos na vertical enquanto as linhas verticais são usadas para a medição na direcção horizontal.

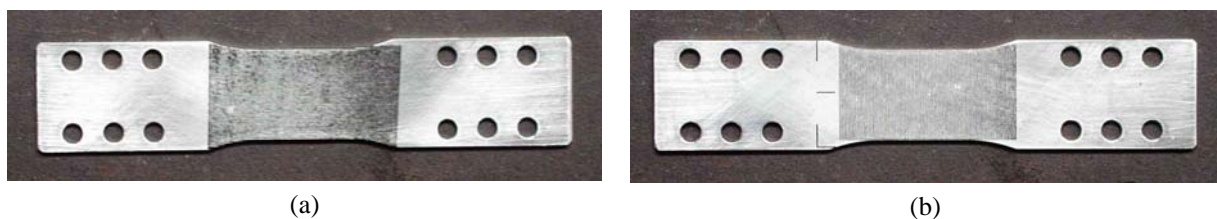


Figura 6.16 Provette de alumínio para o ensaio de impacto com duas redes de Moiré gravadas em superfícies opostas: (a) linhas horizontais e (b) linhas verticais.

Após a realização do ensaio fez-se a análise do campo de deslocamentos recorrendo ao algoritmo referido anteriormente e que foi desenvolvido no LOME. Os mapas de fase obtidos para as duas direcções principais (vertical e horizontal) estão representados na Figura 6.17. Contudo, tal como referido anteriormente, estes mapas de fase possuem descontinuidades em π e $-\pi$, estas poderão ser eliminadas recorrendo a um algoritmo de *unwrapping*.

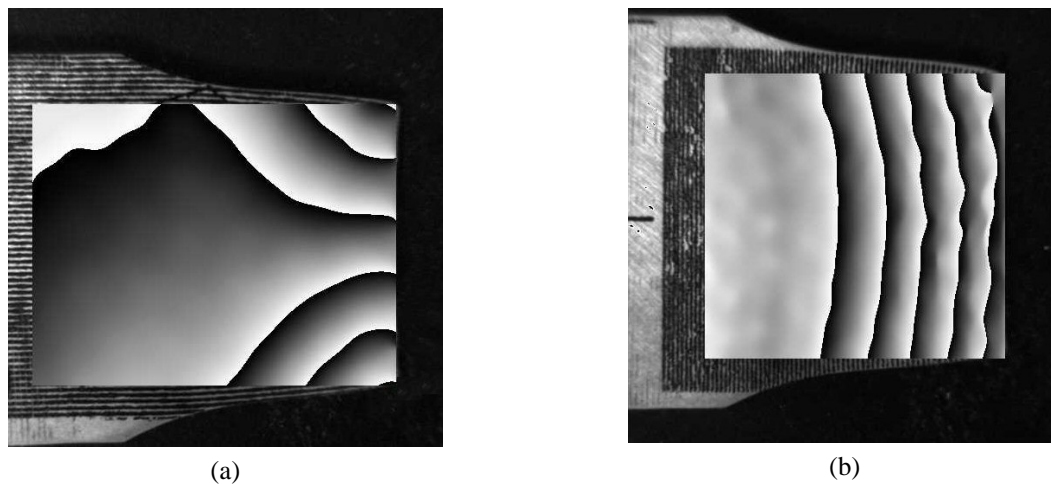


Figura 6.17 Mapas de fase segundo as direcções principais: (a) vertical e (b) horizontal.

Na Figura 6.18 estão representados o campo de deslocamentos segundo as direcções principais após o cálculo de *unwrapping* sobre os mapas de fase.

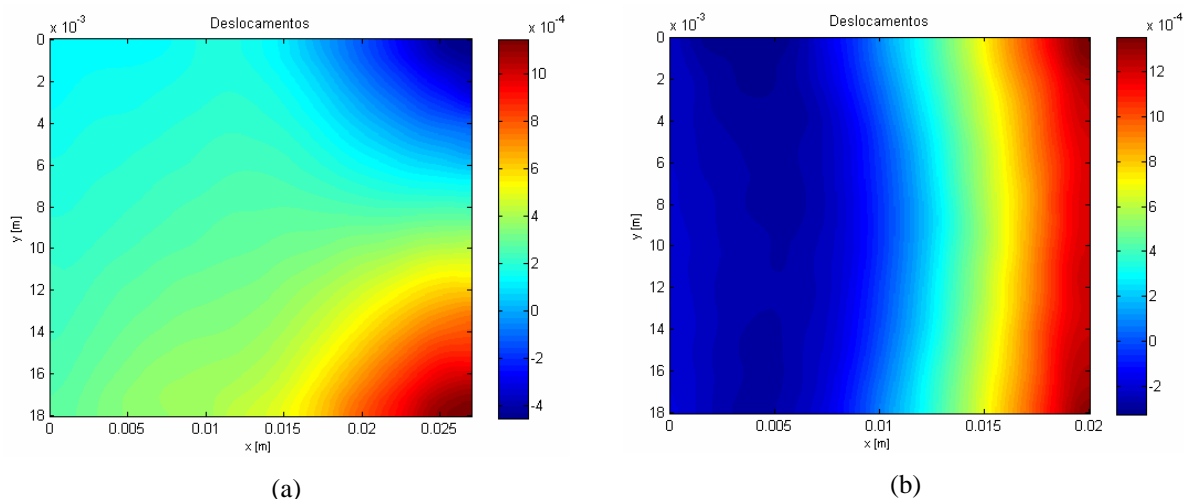


Figura 6.18 Campo de deslocamentos segundo as direcções principais: (a) vertical e (b) horizontal.

Para obter o campo de deformações ter-se-ia que derivar o campo de deslocamentos para cada uma das direcções representadas. Dado que se trata medições experimentais contém sempre ruído, o que dificulta a sua derivação. Para obter informação compatível com o comportamento do material é necessário dispor de rotinas de processamento de imagem que realizem simultaneamente a derivação e o amaciamento. Estas ferramentas estão em fase de desenvolvimento no LOME [7] e não se encontravam disponíveis na altura em que foram realizadas estas medições. Como a intenção deste trabalho era verificar a aplicabilidade do Moiré geométrico a este caso não foram efectuadas nem a derivação nem a simulação numérica.

Em conclusão da análise feita neste ponto, pode afirmar-se que a técnica de Moiré geométrico poderá ser utilizada com vantagens, para o estudo do campo de deformações *post mortem* dum provete. Com esta técnica seria possível, ainda, analisar-se como ocorria deformação do provete durante o ensaio, desde que, fosse utilizada uma câmara de alta velocidade, que permitisse registar várias imagens durante o ensaio.

6.2 Montagem óptica para Moiré interferométrico

Neste ponto descreve-se a medição de deslocamentos e deformações de alguns casos simples utilizando a técnica de Moiré interferométrico. Procurou-se com este trabalho conhecer com maior detalhe esta técnica de medição e analisar a sua aplicabilidade na caracterização de campos de tensões residuais utilizando a técnica do furo.

A montagem utilizada na medição dos deslocamentos está representada esquematicamente na Figura 6.19.

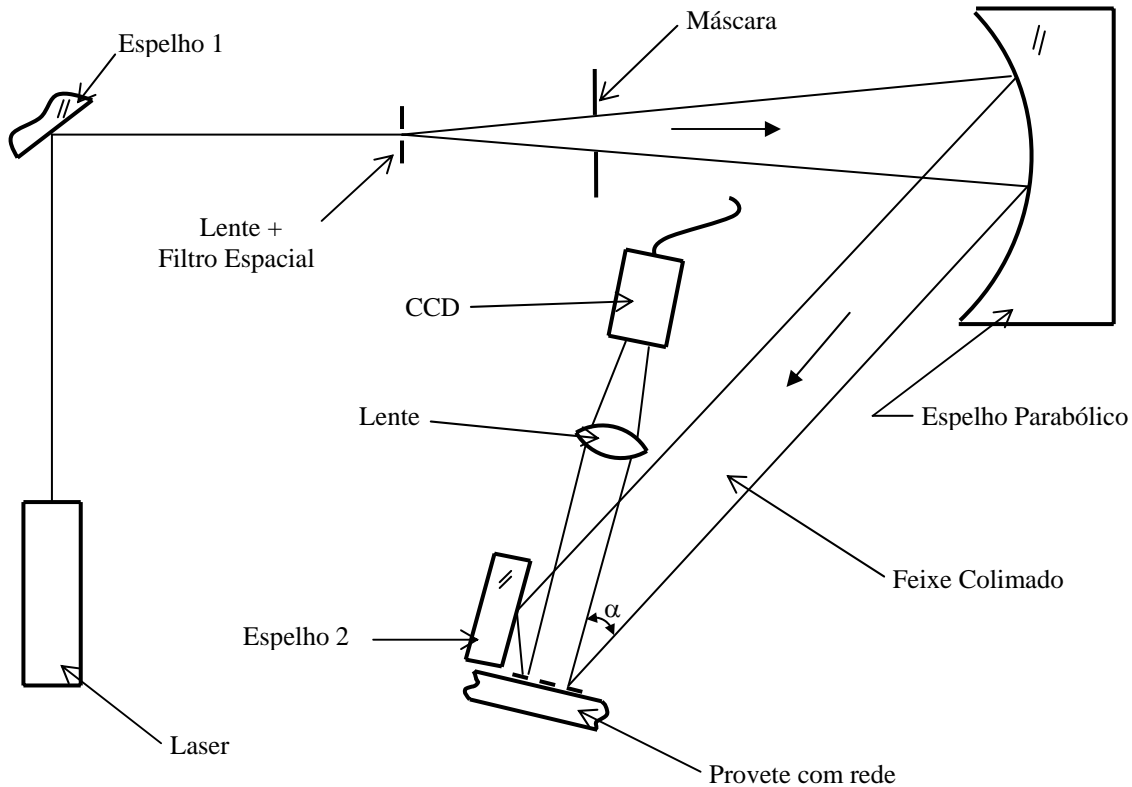


Figura 6.19 Representação esquemática da montagem usada na interferometria de Moiré [8].

Nesta montagem o feixe de luz monocromática polarizada emitido por um laser, é desviado por um primeiro espelho é aberto por uma lente com pequena distância focal e passa por um filtro espacial que apenas deixa passar o termo contínuo (as frequências geradas pela difracção nas partículas de pó, não se propagando axialmente, são removidas). Após filtragem o feixe passa por uma máscara que define a área iluminada e é reflectido por um espelho parabólico, com foco fora do eixo, que o torna colimado. Cerca de 50% do feixe de luz colimado vai incidir no espelho enquanto a radiação restante incide directamente na rede de difracção colocada no provete. A luz reflectida no espelho 2 vai interferir com a luz proveniente do espelho parabólico, criando uma rede de interferência que corresponde a uma rede virtual. Por sua vez a luz que incide na rede do provete sofre difracção, pois as redes utilizadas têm frequências espaciais elevadas, neste caso 1200 l/mm. Com esta configuração apenas as ordens de difracção +1 e -1 são utilizadas na medição. Se não houver qualquer deformação o campo de deslocamentos é nulo. Quando o provete se deforma surgem franjas que serão proporcionais à deformação do provete. Estas franjas correspondem à interferência

dos feixes difractados no provete (ordens +1 e -1) com a rede virtual e caracterizam o campo de deslocamentos gerado.

Antes de se proceder à medição da deformação do provete com a técnica de Moiré interferométrico é necessário fazer-se o alinhamento de todo o sistema de medição. Esta tarefa assume especial importância dada e elevada resolução que é possível atingir com esta técnica. Para se obter uma montagem óptica devidamente afinada é possível realizar o seu alinhamento seguindo os seguintes passos:

- 1- Alinhar o feixe à saída do filtro espacial de modo a não coincidir com o centro do espelho parabólico.
- 2- Ajustar o espelho 2 para uma primeira aproximação ao ângulo α , ângulo entre o plano do espelho e a direcção do feixe de luz colimado.

$$f = \frac{2}{\lambda} \sin \alpha \quad (6.1)$$

Em que f é a frequência da rede virtual; λ é o comprimento de onda da luz utilizada.

No caso em estudo utilizou-se uma frequência, $f = 2400$ linhas/mm e um comprimento de onda, $\lambda = 514$ nm.

Deve referir-se que ao utilizar as primeiras ordens de difracção o ângulo entre feixes se reduz a metade e a frequência espacial passa para o dobro.

O valor do ângulo α pode ser determinado a partir da equação (6.1) e corresponde a um valor de $\alpha = 38.08^\circ$.

- 3- Instalar o provete com uma rede de difracção montada na sua superfície. Esta rede deverá possuir uma reflectividade adequada e uma frequência espacial de $f/2$.
- 4- Iluminar a rede colocada na superfície do provete com o feixe colimado reflectido pelo espelho parabólico. O feixe de iluminação sofrerá difracção sendo as ordens de difracção ± 1 utilizadas nas medições. Estas ordens deverão imergir segundo a direcção normal à superfície iluminada do provete. Para facilitar o alinhamento deverá ser colocada uma lente em frente à superfície iluminada e fazer o alinhamento dos feixes no seu plano de Fourier. Neste plano ambos os feixes deverão convergir num ponto o que se obtém por ajuste do espelho 2. Convém utilizar um filtro no plano de Fourier que elimine o termo de ordem zero e a ordens de difracção que não estejam a ser utilizadas.
- 5- Colocar uma câmara de vídeo para registar os padrões de interferência. Observar o padrão de Moiré registado pela câmara. Nesta fase dever-se-á observar um padrão de franjas. Se necessário poderá utilizar-se um sistema de lentes para facilitar a observação. Não sendo visível qualquer padrão de franjas deve ajustar-se com maior precisão a sobreposição dos pontos no plano de Fourier. A seguir ajusta-se o espelho 2 para diminuir o número de franjas, se possível até obter um campo de franjas nulo, isto é, um campo com o número mínimo de franjas [9]. Deve referir-se que normalmente não se obtém um verdadeiro campo nulo (um campo completamente isento de franjas). Isto deve-se fundamentalmente a três razões principais: os feixes que formam a rede

virtual não têm frentes de onda perfeitamente planas; a rede do provete não está perfeitamente alinhada com o plano da superfície do provete nem as suas linhas são uniformemente espaçadas. Tipicamente, num campo com 25 mm aparecem uma ou duas franjas circulares ou em forma de cela como o melhor resultado de campo nulo [9]. Este campo inicial, geralmente não tem influência quando aparecem muitas franjas devidas ao carregamento. Em todo o caso, as ordens das franjas no padrão inicial devem ser subtraídas às franjas do padrão final para eliminar a sua influência.

Para fazer o alinhamento da montagem, bem como a afinação da mesma utilizou-se uma rede de difracção adquirida. Esta rede é sinusoidal, com uma frequência unidireccional de 1200 l/mm e com muito boa reflectividade (aproximadamente 60%).

Após a determinação analítica do ângulo α , fez-se uma primeira aproximação ao seu valor como está indicado na Figura 6.20.

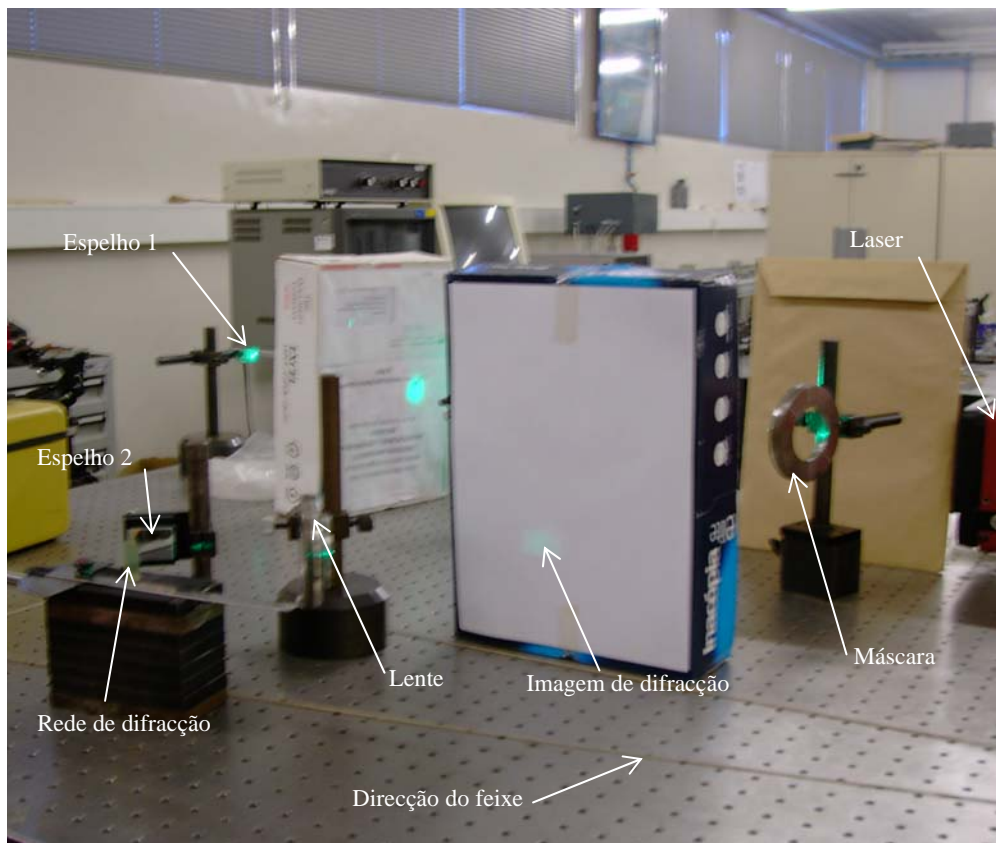


Figura 6.20 Pormenor da montagem, em que se pode observar a rede de difracção e o espelho 2, bem como a direcção do feixe de luz colimado.

Para uma melhor definição do ângulo α utilizou-se um posicionador angular de precisão. Na Figura 6.21 está indicado o pormenor da montagem do espelho 2 e da rede de difracção no posicionador angular.

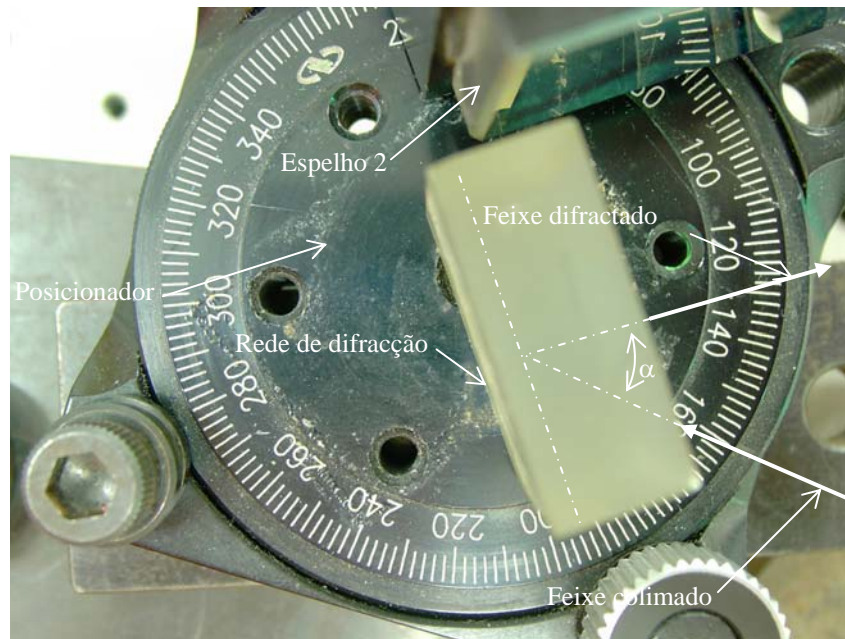


Figura 6.21 Pormenor da afinação do ângulo α utilizando um posicionador angular.

Na fase final do alinhamento deverão ser obtidos padrões de franjas de interferência semelhantes aos que se apresentam na Figura 6.22. Como se pode verificar tratar-se de padrões com elevado contraste em que o número das franjas depende do ângulo entre os feixes que definem a rede virtual.

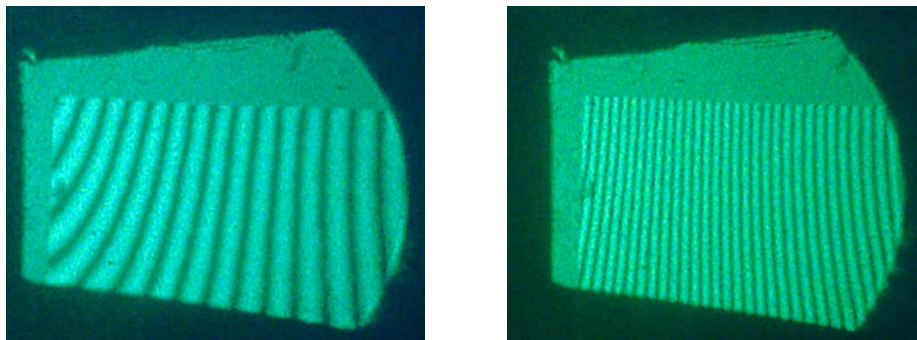


Figura 6.22 Padrões de franjas de interferência obtidos com a rede de difracção utilizada.

6.3 Ensaio de Tracção

No sentido de caracterizar a técnica de Moiré interferométrico foi realizado um conjunto de ensaios preliminares realizando medições em casos onde é necessário obter o campo de deslocamentos no plano. Como primeiro ensaio foi utilizado o ensaio de tracção, medindo o campo de deslocamentos ao longo da secção média de um provete. O ensaio foi realizado sobre uma mesa óptica pois a utilização de redes com 1200 l/mm implica uma elevada resolução (da ordem das dezenas de micrómetro). Para garantir a estabilidade da montagem durante a medição foi construído um mecanismo para traccionar o provete. Os desenhos de definição e de conjunto da estrutura encontram-se no anexo B.

A geometria do provete de tracção foi desenvolvida a partir da norma NP 10002-1 [10], embora com algumas diferenças, devido à necessidade de adaptação a um ensaio que decorreria sobre uma mesa óptica. Optou-se por um provete plano numa liga de alumínio (1050 com 99.5 de Al) [11]. As dimensões e geometria do provete encontram-se no anexo C.

6.3.1 Ensaio experimental

Neste ensaio foi utilizada a instrumentação representada na Figura 6.23. O provete foi fixado e colocado na posição de ensaio pelo mecanismo de tracção construído. Na superfície do provete colou-se uma rede de difracção unidireccional e na face oposta um extensómetro para ligas de alumínio, tal como se pode ver na Figura 6.23.

Na primeira fase do ensaio fez-se a replicação da rede de difracção para uma das faces do provete. Nesta fase, foram executados os passos habituais, começando com a limpeza cuidadosa da superfície do provete que iria receber a rede utilizando uma mistura de álcool com éter. Seguiu-se a preparação da resina de epóxido, com uma quantidade de endurecedor um pouco inferior ao recomendado para haver um maior período de manuseamento da resina. De seguida, colocou-se uma fina camada de resina sobre a região do provete onde foi colocada a rede. Finalmente colocou-se sobre essa camada a placa de vidro na qual se encontrava a rede de difracção com duas direcções ortogonais. Foi aplicada uma ligeira pressão sobre a placa de vidro e esperou-se cerca de 12 horas para que ocorresse a polimerização da resina. Após a polimerização da resina procedeu-se à fase de “arrancar” a placa de vidro do provete. Esta operação é muito delicada pois podem ocorrer dois problemas: a rede não ficar totalmente colada no provete ou a placa de vidro partir o que dificulta enormemente a sua remoção do provete.

Na outra face provete foi colado um extensómetro para ligas de alumínio, tendo o devido cuidado na preparação da superfície: polimento e uma limpeza cuidada com acetona.

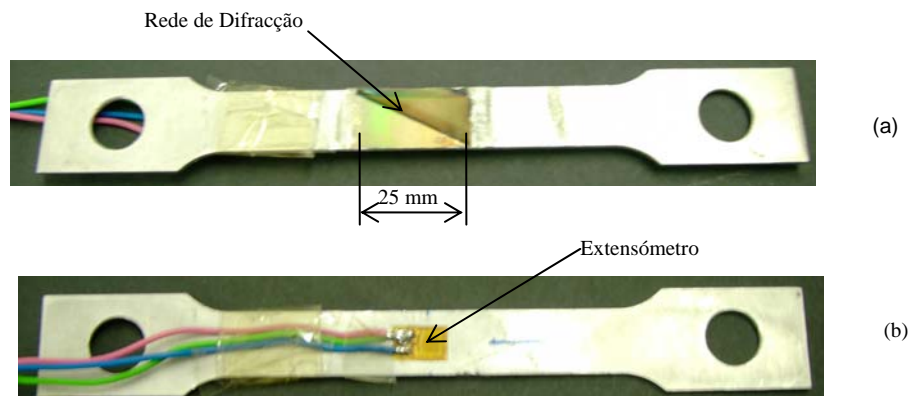


Figura 6.23 Provete utilizado no ensaio de tracção: (a) face com a rede de difracção unidireccional; (b) face com o extensómetro.

A utilização do extensómetro permitiu medir pontualmente a deformação durante a realização do ensaio, Deve referir-se que nesta situação a deformação é praticamente constante ao longo da zona útil do provete. Os primeiros ensaios, realizados com diferentes deslocamentos, permitiram verificar que a sensibilidade das duas técnicas é muito diferente, sendo a do Moiré Interferométrico cerca de uma ordem de grandeza superior. Assim, para conseguir ler-se algum valor no extensómetro é necessário um deslocamento, que conduz a um número de franjas de difícil contagem.

Numa primeira análise foi utilizado o extensómetro para medir a deformação gerada quando os pinos de carga do provete sofriam um afastamento de 0.07 mm. Este deslocamento era medido por comparadores encostado na superfície dos pinos de fixação como se pode ver na Figura 6.24. Para um deslocamento de 0.07 mm entre os pinos o extensómetro mediu uma deformação de aproximadamente 386×10^{-6} . Deve referir-se que a colocação de comparadores em ambos os pinos de carga permite determinar qualquer deslocamento de corpo rígido devido à deformação da estrutura de carga.

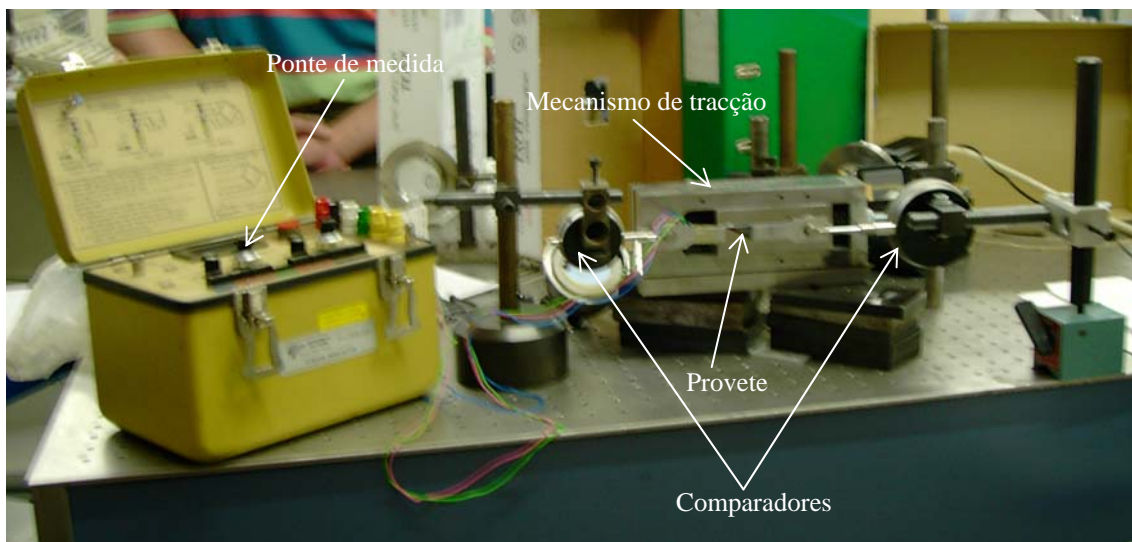


Figura 6.24 Verificação da variação da deformação constante ao longo do provete, usando dois comparadores.

O extensómetro leu uma deformação de aproximadamente $386 \mu\text{m/m}$.

Após o ensaio com a extensometria fez-se o ensaio recorrendo à técnica de Moiré Interferométrico. Para a realização deste ensaio recorreu-se à montagem representada esquematicamente na Figura 6.19 e que pode ver-se na Figura 6.25.



Figura 6.25 Montagem usada para a medição do campo de deslocamentos usando a interferometria de Moiré.

O ensaio consistiu na aplicação de um deslocamento de dois centésimos de milímetro entre os pontos de fixação do provete, medidos com um par de comparadores. Da análise dos valores medidos constatou-se que o deslocamento aplicado era efectivamente de dois centésimos de milímetro. Com uma câmara de CCD foram registadas duas imagens, antes e depois da

aplicação do deslocamento. Na Figura 6.26 podem ver-se as imagens captadas pelo CCD. Em ambas as imagens pode ser vista uma linha diagonal que corresponde ao limite da região onde a grelha colocada apresentava melhor qualidade. Como é visível a área abaixo dessa linha apresenta um padrão de franjas com maior contraste pois a grelha possui, nessa área, uma maior reflectividade.

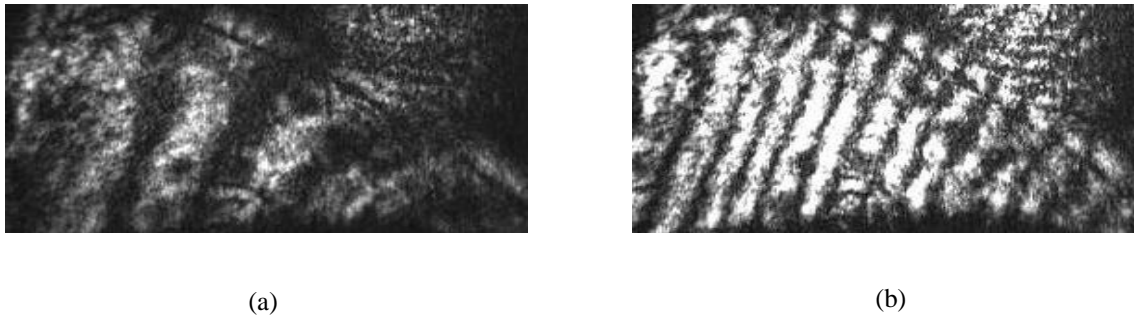


Figura 6.26 Imagens do padrão de franjas de Moiré: (a) inicial; (b) após aplicação dum deslocamento de 0.02 mm.

Da análise da Figura 6.26 pode observar-se um aumento do número de franjas após a imposição do deslocamento. Como pode ver-se na Figura 6.26 a) a melhor imagem que se conseguiu obter para o campo nulo foi com cinco franjas, isto deve-se fundamentalmente a possíveis defeitos da rede de difracção e eventualmente a um desalinhamento entre a superfície da rede e o plano do provete. Também se pode verificar que as franjas estão ligeiramente inclinadas relativamente à direcção perpendicular ao eixo do deslocamento. Tal facto poderá dever-se possivelmente a duas razões: ou o deslocamento imposto provocou alguma rotação ao provete, ou poderá dever-se ao facto do feixe não estar perfeitamente colimado.

Pela observação das imagens pode verificar-se que após a aplicação do deslocamento, há um aumento de cerca de 6 franjas relativamente à imagem inicial (antes do deslocamento). O que significa que o deslocamento da zona central do provete, onde foi colada a rede de difracção, pode ser determinada pela expressão seguinte:

$$U_x = \frac{1}{f} N = \frac{1}{2400} 6 = 0,0025 \text{ mm}$$

No regime elástico a deformação será linear na zona útil do provete. Como a zona útil do provete é de cerca de 66 mm e sabendo que a rede tem um comprimento de 25 mm pode calcular-se o valor total do deslocamento na zona útil do provete e que será determinado através da expressão seguinte:

$$U_{xUtil} = \frac{l_{util}}{l_{rede}} U_x = \frac{66}{25} \times 0,0025 = 0,0066 \text{ mm}$$

O deslocamento da zona útil do provete é de cerca de 6.6 μm .

6.3.2 Simulação numérica

Para a simulação numérica do ensaio de tracção descrito anteriormente foi utilizado o código de elementos finitos ANSYS®. Considerou-se um estado plano de tensão em regime linear elástico. Foi criado um modelo com geometria e dimensões idênticos ao utilizado experimentalmente e gerada a respectiva malha, à qual foi imposto um deslocamentos de 0.07 e 0.02 mm. Foram utilizadas nessa simulação as propriedades do alumínio ($E=69$ GPa, $\nu = 0,3$), gerando uma malha de 644 elementos isoparamétricos quadráticos com 8 nós. Na Figura 6.27 representa-se o modelo criado.

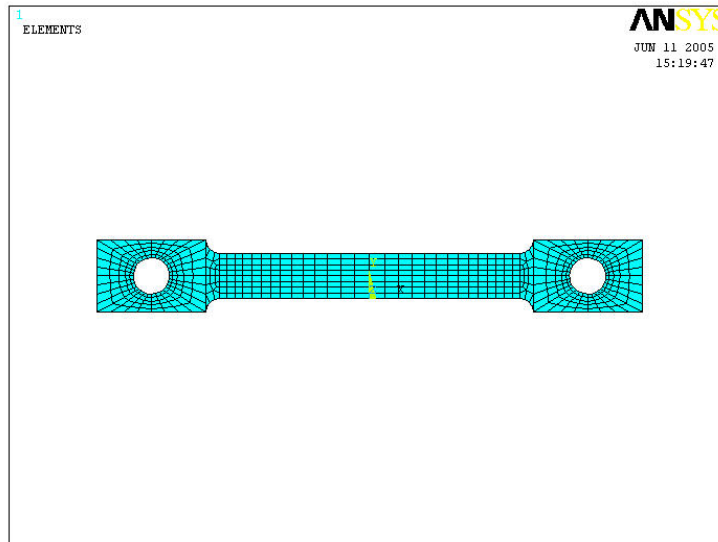


Figura 6.27 Malha de elementos finitos do modelo utilizado na simulação numérica do ensaio experimental.

Fizeram-se duas simulações diferentes, uma impondo um deslocamento 0.07 mm e outra uma deslocamento de 0.02 mm para comparar os resultados com os valores lidos no extensómetro e com a técnica de Moiré Interferométrico, respectivamente. As condições de fronteira utilizadas nas simulações encontram-se representadas na Figura 6.28.

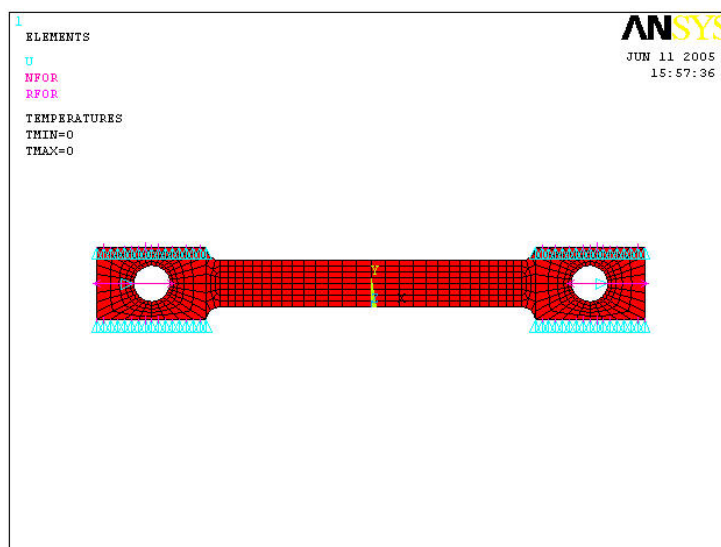


Figura 6.28 Condições de fronteira utilizados nas simulações numéricas.

6.3.2.1 Cálculo das deformações e deslocamentos

Utilizando o modelo numérico referido anteriormente foi realizada uma simulação impondo um deslocamento de 0.07 mm. Desta forma foi determinado o campo de deformações na região central do provete obtendo valores para comparar com os medidos com o extensómetro. Como seria de esperar obteve-se um campo de deformações uniforme ao longo do fuste do provete. Para uma análise mais detalhada do campo de deformações foi calculada a deformação ao longo do eixo do provete, neste caso designada por ϵ_x . Na Figura 6.29 mostra-se como varia essa deformação ao longo do eixo do provete.

Para uma análise mais detalhada do campo de deformações há todo interesse em conhecer a variação da deformação ϵ_x ao longo da direcção x na zona central do provete. Na Figura 6.29 representa-se a variação do campo de deformações.

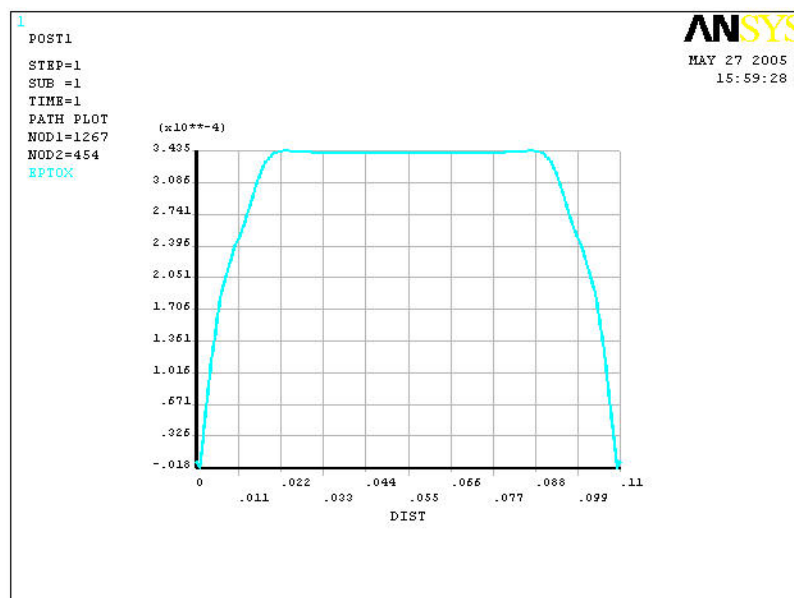


Figura 6.29 Variação do campo de deformações ϵ_x entre as amarras, ao longo do eixo central do provete, valores do comprimento (DIST) em m e das deformações em $\mu\text{m}/\text{m}$.

Da observação da Figura 6.29 pode verificar-se que a região do provete em que a deformação é aproximadamente constante (zona útil) encontra-se entre 22 mm e 88 mm, logo corresponde a um comprimento de cerca de 66 mm. Como tal, todos os cálculos e comparações que se fizerem com os valores experimentais corresponderão a este valor de comprimento útil.

No caso em análise pode verificar-se o valor da deformação da zona útil, para um deslocamento imposto de 0.07 mm, é de aproximadamente 343 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Foi também realizada uma simulação em que foi imposto um deslocamento de 0.02 mm com o objectivo de determinar o campo de deslocamentos na região central do provete obtendo valores para comparar com os medidos com Moiré Interferométrico. Na Figura 6.30 está representado o campo de deslocamentos U_x , calculado na simulação numérica.

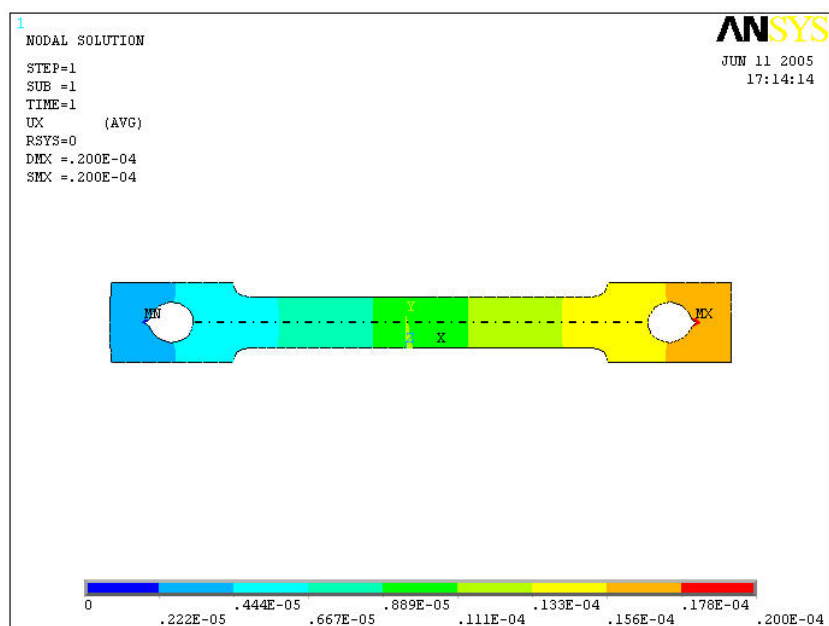


Figura 6.30 Campo de deslocamentos U_x determinado numericamente, valores em [m].

Neste caso foram calculados os deslocamentos ao longo do eixo do provete. Como pode observar-se na Figura 6.31 o deslocamento aumenta a razão constante ao longo do eixo do provete, isto é, a deformação calculada, o declive da recta, tem uma distribuição uniforme na região em estudo.

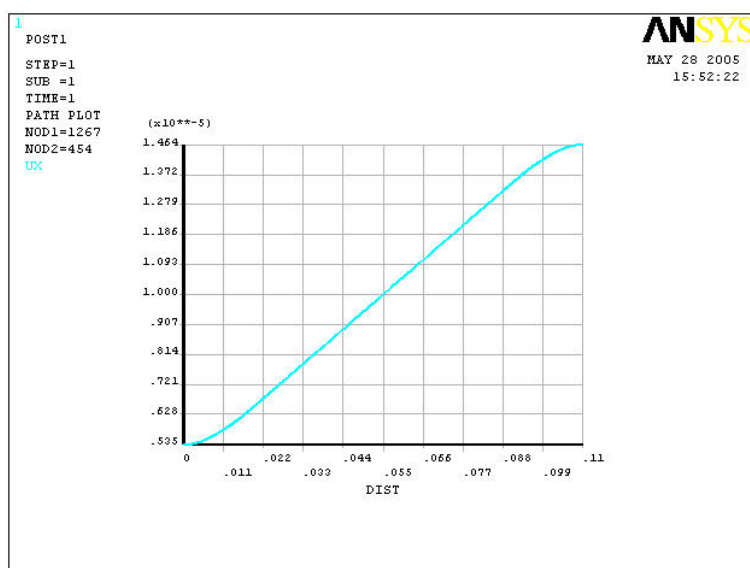


Figura 6.31 Variação do campo de deslocamentos U_x entre as amarras, ao longo do eixo central do provete, os valores do comprimento (DIST) e de deslocamentos estão em [m].

Analisando a zona útil do provete podemos verificar que:

Tabela 6.5 Valor de U_x nos pontos limite da zona útil do provete.

DIST [m]	0.022	0.088
U_x [m]	0.675×10^{-5}	1.311×10^{-5}

Então, o deslocamento total da zona útil do provete, determinado numericamente, pode determinar-se pela seguinte diferença:

$$1.311 \times 10^{-5} - 0.675 \times 10^{-5} = 0.636 \times 10^{-5}$$

O deslocamento da zona útil do provete é de cerca de 0.0064 mm.

6.3.3 Discussão de resultados

Os resultados obtidos numericamente estão relativamente próximos dos valores medidos, sendo a maior diferença verificada entre os valores medidos por extensometria e os resultados calculados pelo método dos elementos finitos.

Quando comparamos o valor lido no extensómetro (386 $\mu\text{m}/\text{m}$) com o valor calculado com os elementos finitos (343 $\mu\text{m}/\text{m}$) verificamos que o erro obtido, cerca de 12%, está já no limite do admissível. Contudo, estes valores devem ser analisados com algum cuidado pois a escala usada é muito pequena e a observação experimental foi feita directamente na escala do comparador, assim um pequeno erro na leitura do comparador (exemplo 3 milésimas de milímetro) implica que o resultado nos elementos finitos seria de aproximadamente 360 $\mu\text{m}/\text{m}$, muito mais próximo do valor lido extensómetro, isto é, passa-se duma diferença de 12.5% para uma de 5.0%. Outros factores podem também contribuir para esta disparidade tais como a não utilização de compensação da temperatura. Contudo, comparando os resultados experimentais com os resultados obtidos nos elementos finitos, pode concluir-se que a deformação é aproximadamente constante ao longo da zona útil do provete (66 mm).

Para o caso da aplicação dum deslocamento de 0.02 mm no pino de amarração do provete os valores medidos experimentalmente com a técnica de Moiré Interferométrico, correspondentes à zona útil do provete, foram de aproximadamente 0.0066 mm enquanto que o valor de deslocamento calculado numericamente foi de cerca de 0.0064 mm. Como se pode verificar estes valores estão muito próximos, correspondendo a uma diferença de apenas 3.1%.

6.3.4 Conclusões

Da análise dos sub capítulos anteriores, pode-se concluir que o provete tem um comportamento linear elástico numa zona útil, cerca de 66 mm; que existe uma boa concordância entre os valores medidos e os calculados numericamente. Apesar dessa concordância ser mais perceptível com o método experimental de Moiré Interferométrico do que com a extensometria tal facto dever-se-á à necessidade de impor maiores deslocamento na realização das medições com extensometria. A maior carga sobre a estrutura de carregamento poderá ter conduzido a um menor controlo sobre as medições. A técnica de Moiré Interferométrico é muito mais sensível, cerca de uma ordem de grandeza, do que a extensometria. O método experimental de Moiré Interferométrico é muito sensível e permite medir deslocamentos muito pequenos com uma boa resolução, condicionada pela rede seleccionada para a medição.

6.4 Estudo de um problema de Mecânica da Fractura

Este ensaio teve como objectivo o estudo do campo de deslocamentos num provete 3PB pré-fissurado quando submetido a uma solicitação de flexão em três pontos. A análise foi realizada junto da raiz da fissura, pois é nessa região de concentração de tensões que ocorrem os valores mais elevados.

6.4.1 Ensaio experimental

O provete esteve inicialmente sujeito a um ensaio de fadiga que lhe provocou uma fissura com um comprimento de aproximadamente 7 milímetros. Após o ensaio de fadiga foi replicada uma rede de difracção bi-direccional com 1200 l/mm, e direcções de medição ortogonais (U, V). Na Figura 6.32 está representado esquematicamente o provete ensaiado, com as dimensões, as condições de fronteira e o posicionamento da rede de Moiré. As medições foram realizadas tendo em atenção alguns parâmetros definidos na norma ASTM E399-90 [12] tais como: dimensões do provete, distância entre apoios e do carregamento, diâmetro dos pinos de apoio.

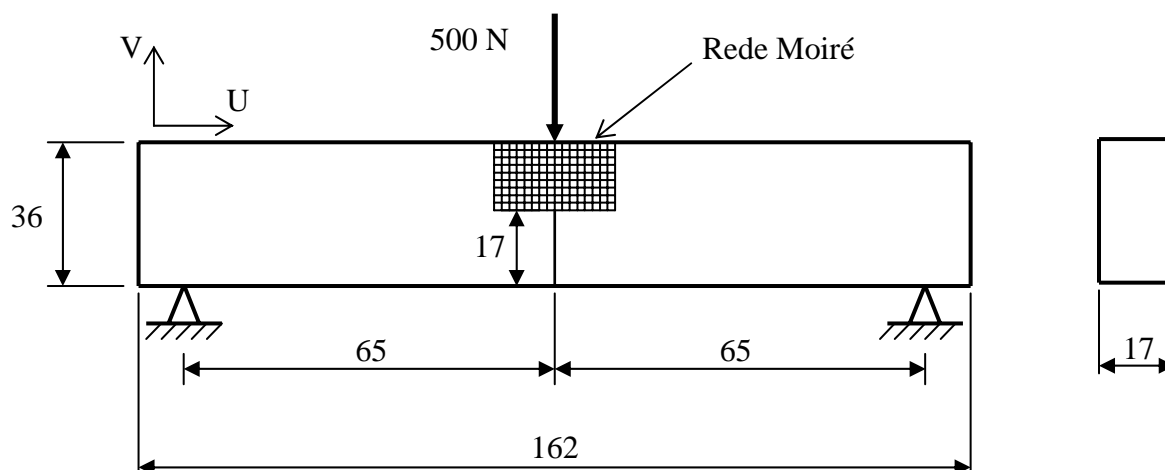


Figura 6.32 Representação esquemática do provete ensaiado: dimensões, condições de fronteira e posicionamento da rede de Moiré.

Para a medição do campo de deslocamentos com Moiré interferométrico recorreu-se a uma montagem óptica similar à representada esquematicamente na Figura 6.33 [13]. A vantagem desta montagem relativamente à do ponto anterior é de permitir medir os deslocamentos em duas direcções diferentes: as direcções definidas pela rede de difracção.

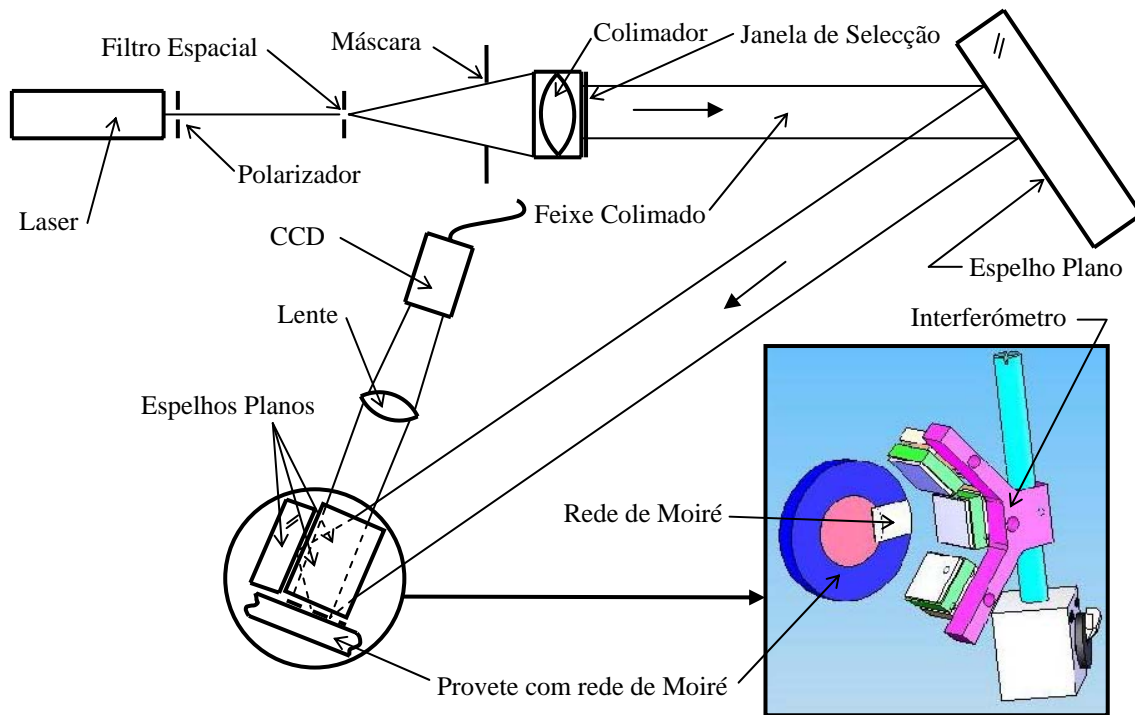


Figura 6.33 Representação esquemática da montagem óptica para quatro feixes utilizada.

Construí-se um mecanismo para a flexão em três pontos (Figura 6.34). O provete foi montado, com a rede de Moiré colada na sua superfície, e o ponto de aplicação da carga junto da raiz da fissura. Na Figura 6.34 pode observar-se o pormenor da montagem do provete no mecanismo de flexão e o interferómetro utilizado. O interferómetro utilizado na montagem óptica de quatro feixes foi especialmente desenvolvido e projectado, no âmbito deste trabalho, para medições em duas direcções com Moiré interferométrico, no anexo D pode ver-se, em pormenor, o modelo do interferómetro utilizado.

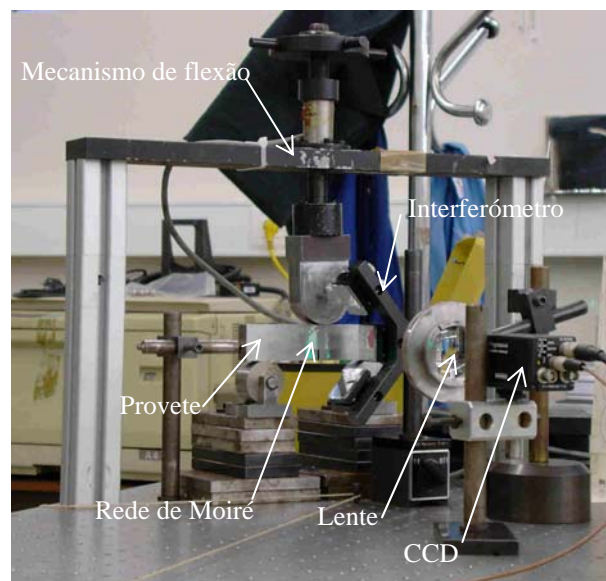


Figura 6.34 Montagem do provete no mecanismo de flexão e interferómetro desenvolvidos no LOME.

O ensaio foi realizado comparando dois estados: provete não carregado e provete sujeito a um carregamento de 500 N. Para cada estado foram gravadas quatro imagens para cada uma das direcções ortogonais. No caso do provete não carregado registaram-se quatro imagens na direcção U e quatro na direcção V. Para as imagens na direcção U, foi utilizada como rede de referência a rede virtual criada pelo espelho central do interferómetro. As imagens da direcção V foram obtidas a partir da rede virtual de interferência provocadas pelos espelhos superior e inferior do interferómetro, como se explicou anteriormente. A utilização quatro imagens com uma técnica de *phase shifting* permite realizar cálculos de fase menos sensíveis aos erros verificados na imposição dos saltos de fase [14]. Nesta técnica são impostos deslocamento de fase relativo de $\pi/2$ entre imagens e a fase é calculada da seguinte forma:

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right] \quad (6.2)$$

O desfasamento de fase (*phase shifting*) foi realizado utilizando uma placa de vidro de faces paralelas. A experiência desenvolvida no LOME relativa ao cálculo de fase recorreu a um algoritmo que utilizou quatro imagens.

Na segunda fase do ensaio foi aplicada uma carga de 500 N no provete e executados os mesmos procedimentos descritos na fase anterior (sem carregamento). Como a situação inicial, provete descarregado, corresponde um campo nulo ou infinito, não há necessidade de utilizar estas imagens para o cálculo final do campo de deslocamentos, sendo apenas utilizado o campo de deslocamentos provocado pelo carregamento. Na Figura 6.35 e Figura 6.36 estão representadas as quatro imagens, nas duas direcções (U e V), utilizadas para o cálculo de fase.

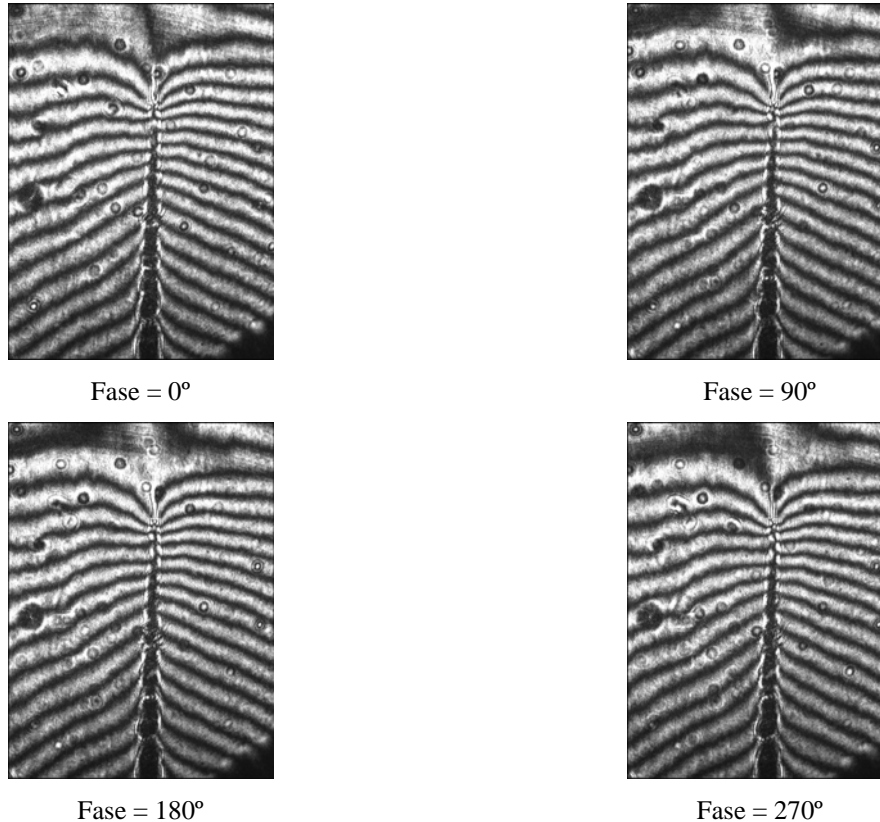


Figura 6.35 Padrão de franjas para o deslocamento U, provocado por um carregamento de 500 N.

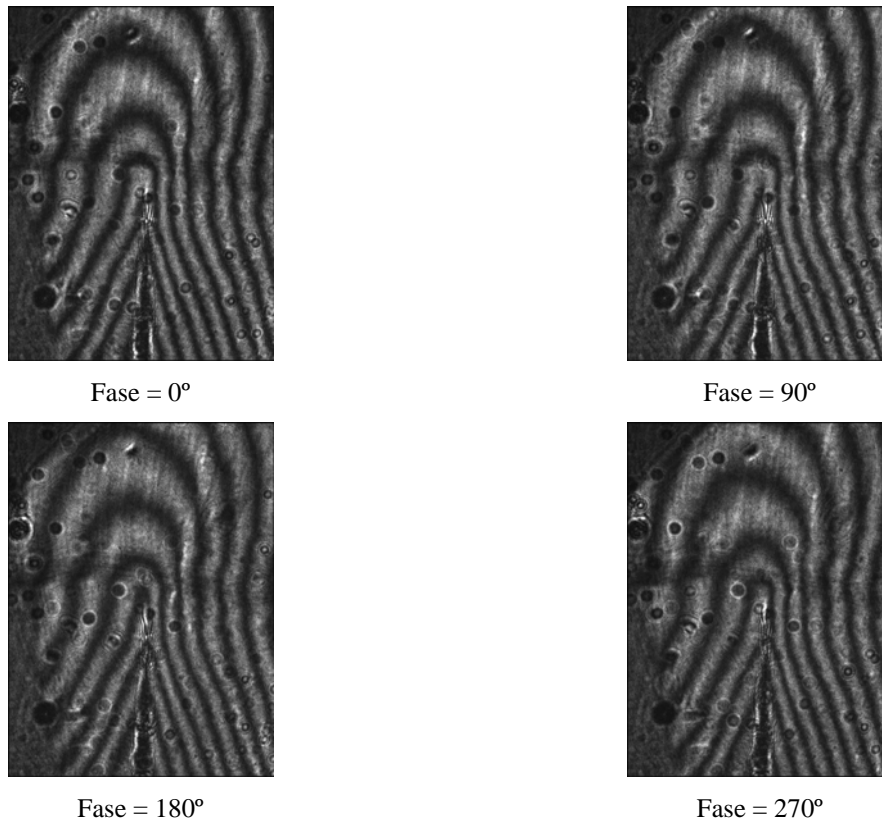


Figura 6.36 Padrão de franjas para o deslocamento V, provocado por um carregamento de 500 N.

Utilizando as imagens da Figura 6.35 e Figura 6.36 pode calcular-se o mapa de fase recorrendo à equação (6.2), tal como se pode ver na Figura 6.37. É de salientar que as imagens apresentadas correspondem a mapas de fase que foram sujeitos a uma filtragem passa-baixo que aumenta significativamente a qualidade das franjas obtidas.

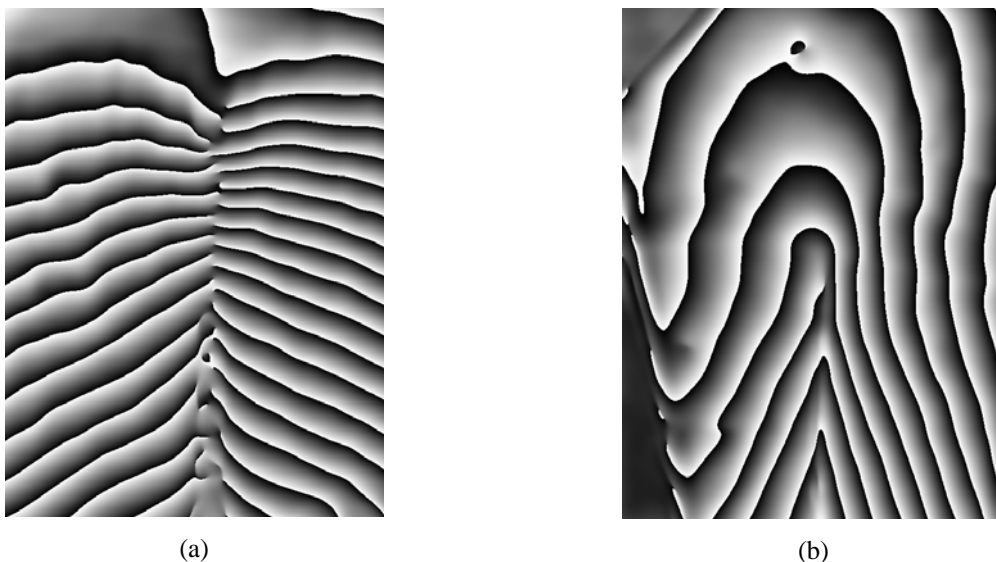


Figura 6.37 Mapas de fase correspondente à: (a) direcção U; (b) direcção V.

Analisando a expressão (6.2) verifica-se que existem descontinuidades para valores da fase de $-\pi$ e π em resultado da função arctg. Estas descontinuidades são eliminadas utilizando

algoritmos desenvolvidos para esse efeito (*unwrapping*). Desta forma, obtém-se o campo de deslocamentos no plano segundo ambas as direcções. Na Figura 6.38 estão representados os campos de deslocamentos para as duas direcções U e V, é de salientar que as imagens desta figura se encontram rodadas 90° para a direita relativamente às imagens representadas na Figura 6.36 e na Figura 6.37.

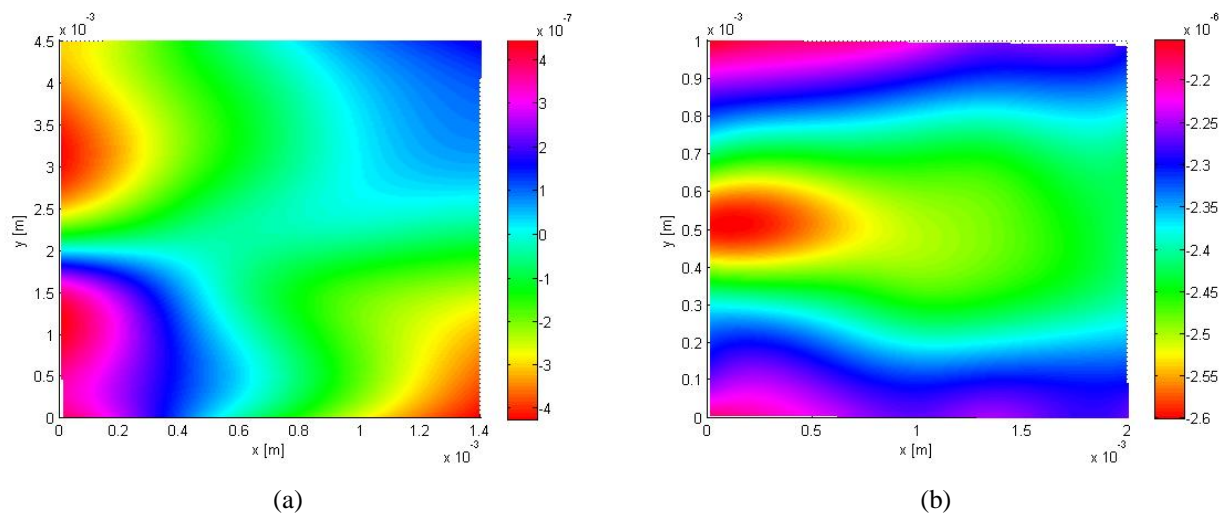


Figura 6.38 Campos de deslocamentos na: (a) direcção U; (b) direcção V; (unidades em m).

Durante a realização das medições constatou-se que a carga aplicada estava ligeiramente descentrada relativamente à fenda. A distância dos pontos de apoio, do ensaio da flexão em três pontos, relativamente aos topos do provete era ligeiramente diferente. Por sua vez os topos do provete estavam constringidos na direcção U para evitar o seu escorregamento nos apoios. Por estas razões o campo de deslocamentos obtido não apresenta simetria relativamente ao plano da fenda.

6.4.2 Simulação numérica

A simulação do ensaio de flexão em três pontos dum provete da mecânica da fractura foi efectuada recorrendo ao programa de elementos finitos ANSYS®. Foi criado um modelo com geometria e dimensões idênticos ao utilizado experimentalmente e gerada a respectiva malha. Neste modelo foi imposta uma carga de 500 N e considerou-se um estado plano de tensão em regime linear elástico. Foram utilizadas as seguintes propriedades para o aço ($E=210$ GPa, $\nu = 0,29$), e gerada uma malha de 5501 elementos isoparamétricos quadráticos com 8 nós. Na Figura 6.39 representa-se a malha do modelo criado.

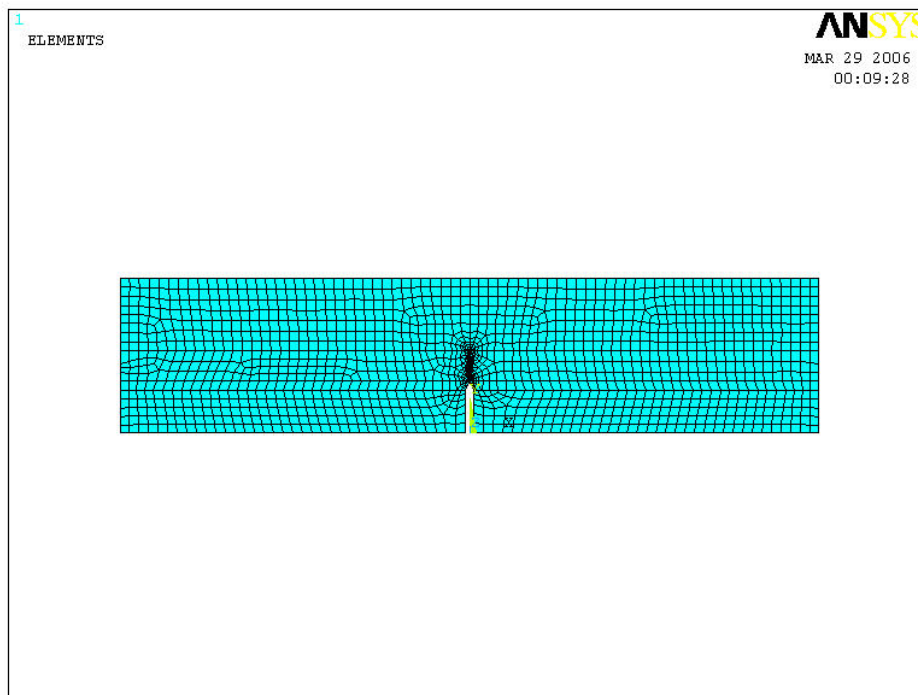


Figura 6.39 Malha de elementos finitos do modelo utilizado na simulação numérica.

Foram utilizadas condições de fronteira o mais próximo possível do ensaio executado: ligeira descentragem da fenda em relação à carga e constrangimentos na direcção U nos topos do provete. Na Figura 6.40 está representado o modelo com as condições de fronteira consideradas.

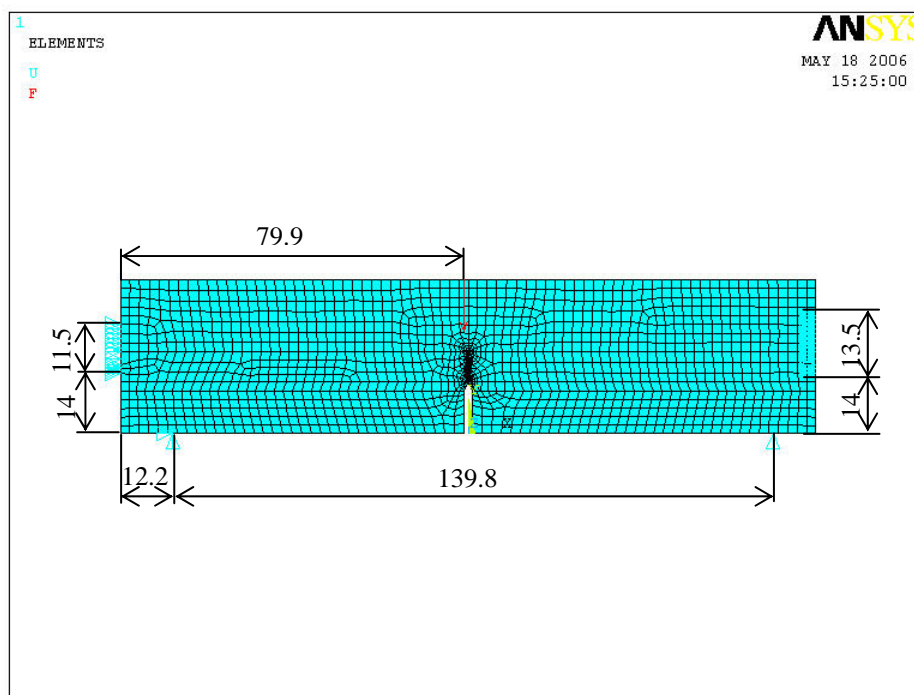


Figura 6.40 Condições de fronteira utilizadas na simulação numérica (unidades em mm).

A análise desta simulação concentrou-se na zona próxima da fissura obtida no ensaio de fadiga, mais precisamente na ponta da fissura. Nessa zona de análise foram obtidos os deslocamentos nas duas direcções (U e V), correspondente à região que foi analisada no ensaio experimental. Neste caso, as imagens da Figura 6.41 encontram-se na direcção em que foi executado o ensaio (na vertical) enquanto que as imagens obtidas experimentalmente (Figura 6.38) se encontram rodadas 90° para a direita.

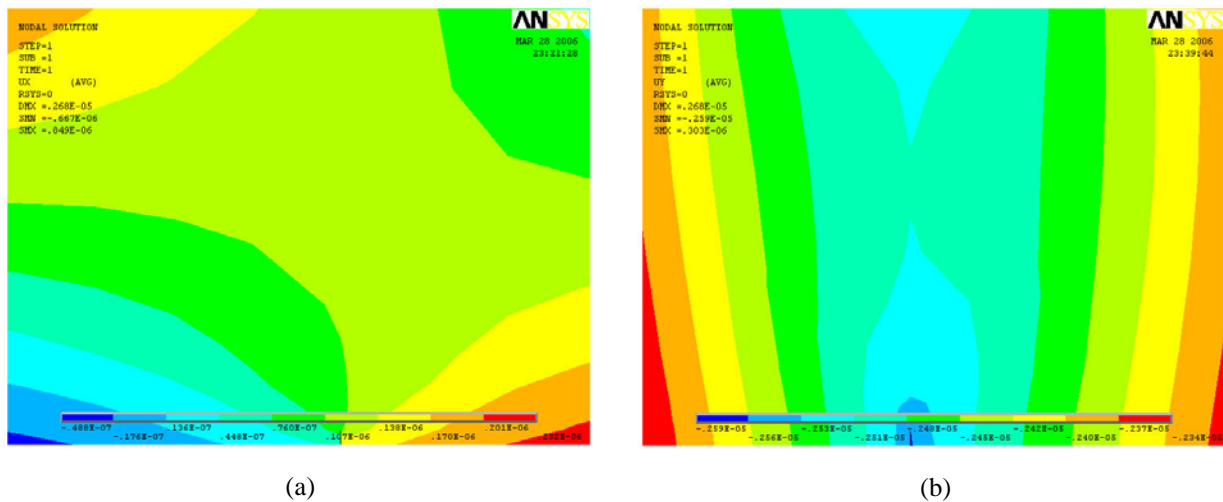


Figura 6.41 Campos de deslocamentos obtidos por simulação numérica: (a) direcção U; (b) direcção V; (unidades em m).

Tal como acontecia no ensaio experimental, também na simulação numérica a distribuição do campo de deslocamentos não é simétrica, relativamente a um eixo vertical que passe pela ponta da fenda. Este facto deve-se ao tipo de condições de fronteira impostas simularem, com boa precisão o ensaio experimental.

6.4.3 Discussão de resultados

Comparando os resultados numéricos com os experimentais pode verificar-se que o provete ensaiado tem um comportamento similar, apesar dos valores de deslocamentos serem ligeiramente diferentes. Essa diferença é mais notória na direcção U, em que os deslocamentos são menores. Este facto poderá dever-se às restrições que foram impostas nessa direcção. Deve referir-se que as restrições impostas experimentalmente por elementos mecânicos comportam sempre alguns erros. Estes elementos não são totalmente rígidos, o pode originar alguma cedência de material e, por essa razão, o valor dos deslocamentos ser ligeiramente inferior nos resultados experimentais. Nos casos em que se considerou que os nós tinham deslocamento nulo era esse o valor utilizado na simulação numérica. No caso dos deslocamentos na direcção V, como não havia nenhuma restrição nessa direcção além dos dois pontos de apoio, os valores medidos experimentalmente encontram-se bastante próximos dos obtidos na simulação numérica.

Tal como seria de esperar os maiores valores de deslocamento ocorreram na direcção V, que correspondia à direcção da aplicação da carga. Para uma carga de 500 N obteve-se um valor máximo de aproximadamente 2.6×10^{-6} m, este valor foi igualmente obtido pelas duas vias (numérica e experimental) e ocorre numa região do provete que se encontra junto da ponta da fissura, zona de maior concentração de tensões. O valor dos deslocamentos vai diminuindo à

medida que os pontos de medida se afastam da ponta da fissura. O campo de deslocamentos seria simétrico se não tivesse havido a necessidade de introduzir as restrições referidas anteriormente. A queda do valor dos deslocamentos é um pouco mais acentuada nos resultados experimentais. Esta diferença é mais notória em zonas mais afastadas da ponta da fissura e pode dever-se a duas razões: por um lado a simulação numérica considera uma situação ideal, por muito próximo da realidade que se considerem as condições de fronteira e propriedades do material há sempre algumas diferenças das condições reais, mesmo utilizando uma malhagem muito fina, por outro lado, no programa de processamento de imagem fez-se uma filtragem que pode alterar ligeiramente o resultado final.

Os valores dos deslocamentos na direcção U são inferiores aos que ocorrem na direcção V, primeiro porque o carregamento é aplicado na vertical (direcção V), segundo porque há algumas restrições nos topos do provete na direcção U (ver Figura 6.40). Estas restrições são devidas ao atrito e impedem que ocorra um deslocamento livre nessa direcção. Pelas imagens do campo de deslocamentos U, em ambas as situações, podem verificar-se dois fenómenos interessantes, a descentragem do carregamento provoca uma ligeira rotação em torno dum eixo perpendicular ao plano frontal do provete e que passa pela ponta da fissura, esse fenómeno é visível pela forma em como as franjas se encontram rodadas. O outro aspecto que pode ser salientado consiste na existência de uma “quase” anti-simetria, que só não é mais efectiva pelas razões já anteriormente referidas e que se relacionam com a posição da força aplicada e das restrições impostas. Do lado direito (Figura 6.41 (a)) ou superior (Figura 6.38 (a)) das imagens, surgem deslocamentos com sinal negativo enquanto que nos lados opostos o sinal é positivo.

6.4.4 Conclusões

Deste trabalho pode concluir-se que a técnica de Moiré interferométrico está bem adaptada para a medição do campo de deslocamentos neste tipo de ensaio, isto é, junto de singularidades geométricas, verificação que pode ser corroborada pelos resultados obtidos na simulação numérica. Na direcção V há uma maior concordância entre os valores de deslocamentos medidos com Moiré interferométrico e os determinados numericamente. Os deslocamentos segundo a direcção U são mais influenciados pelas condições de fronteira e de carregamento pelo que a sua correcta simulação numérica se revelou mais difícil.

6.5 Juntas Coladas

As ligações estruturais entre mais do que um componente têm conhecido ao longo dos tempos uma evolução bastante grande, tanto na diversificação de processos de ligação, como no progresso associado às tecnologias utilizadas [15].

Para além dos métodos tradicionais tais como: a soldadura, as ligações por rebites e aparafusadas, nos últimos 50 anos têm sido desenvolvidos processos de colagem de materiais com adesivos estruturais. Devido às recentes inovações na engenharia química e mecânica, que permitiram obter juntas adesivas com elevadas capacidades de carga as ligações com adesivos têm aumentado a sua divulgação. Os benefícios obtidos com este tipo de ligação fazem com que esta seja encarada como aquela que possui maior potencialidade de crescimento [16]. Os recentes projectos da indústria aeronáutica, quer militar como o EFA e o Rafale, quer civil, como o bem conhecido A380 já utilizam este tipo de ligação em grande escala.

A grande vantagem dos adesivos é a possibilidade de obter estruturas leves, rígidas e económicas, livres dos defeitos causados pelos métodos de ligação convencionais, tais como: zonas de concentração de tensões, zonas afectadas pelo calor, tensões de origem térmica, pontos facilitadores de corrosão, etc. Para além destas vantagens, podem fazer-se colagens entre uma grande variedade de materiais (metais, polímeros, compósitos). As juntas adesivas provocam normalmente uma distribuição mais uniforme das tensões. Como, por vezes, os materiais a ligar devem ser submetidos um tratamento superficial este tipo de ligação pode estar sujeita a limitações ambientais.

Dada a importância crescente da utilização de adesivos estruturais e o facto do autor ter estudado este tipo de junta adesiva em trabalhos anteriores [17, 18, 19], optou-se por fazer uma análise do campo de deslocamentos numa junta colada de simples sobreposição, utilizando Moiré interferométrico.

6.5.1 Ensaio experimental

O ensaio experimental realizado no âmbito deste trabalho consistiu na análise do campo de deslocamentos numa junta de simples sobreposição sujeita um esforço de tracção. Para a análise do campo de deslocamentos fez-se a replicação numa rede de Moiré de linhas cruzadas, para permitir a medição em duas direcções, na região da sobreposição da junta. Na Figura 6.42 representam-se as dimensões e geometria da junta, bem como a região de colocação da rede de difracção.

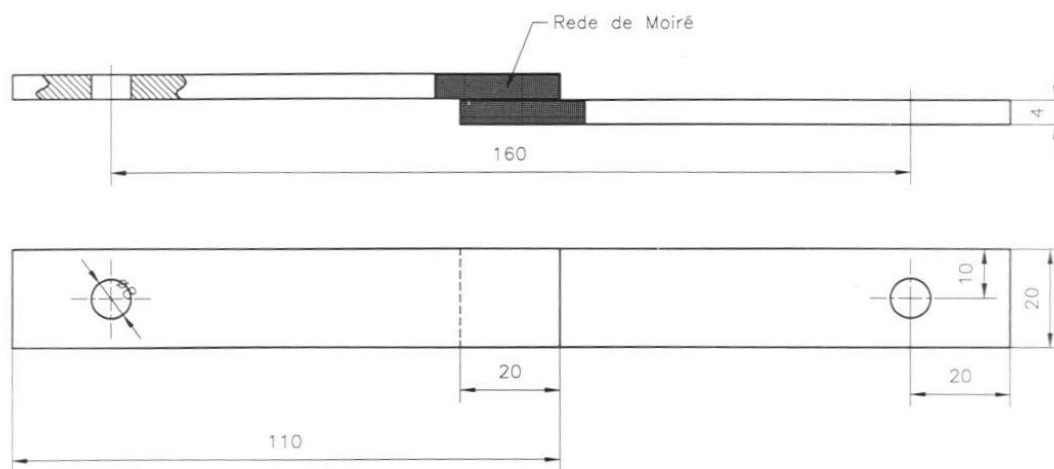


Figura 6.42 Geometria e dimensões da junta adesiva com a respectiva rede de difracção (**nota:** unidades em mm).

Os materiais aderentes utilizados foram obtidos de um perfil construído numa liga de alumínio (1050 com 99,5% de Al). Foram utilizados dois troços sob a forma de placa com 4 mm de espessura e um adesivo de epóxido (Araldit, Standard Ceys, Ref. 3148515/00). A montagem do sistema mecânico para aplicação da tracção e o sistema óptico para a interferometria estão apresentados na Figura 6.43.

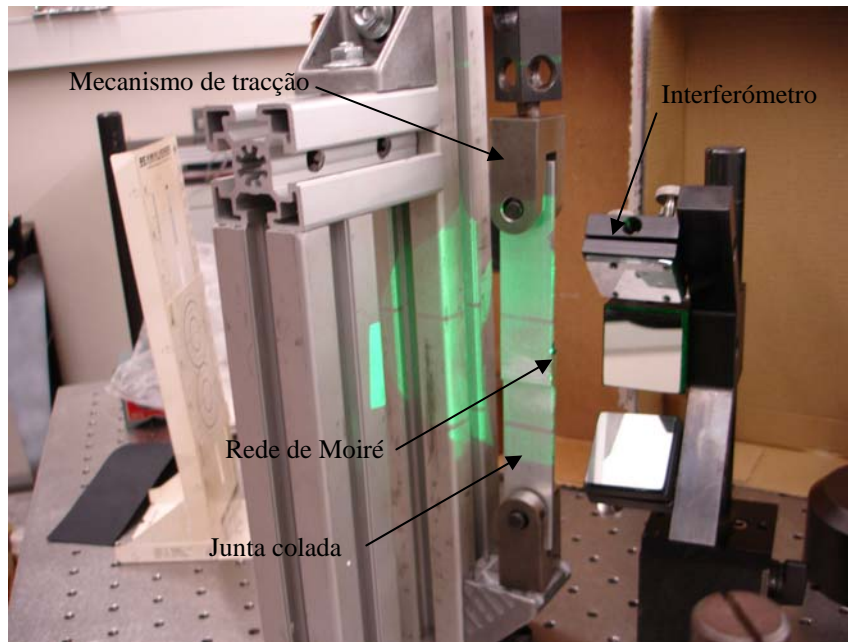
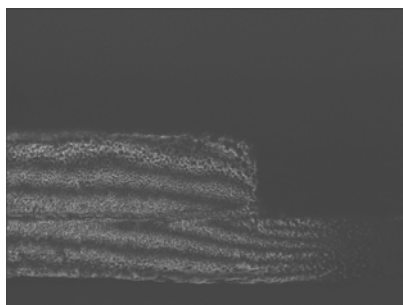


Figura 6.43 Pormenor da montagem do provete numa junta colada de simples sobreposição para o ensaio de tracção para análise do campo de deslocamentos com interferometria de Moiré.

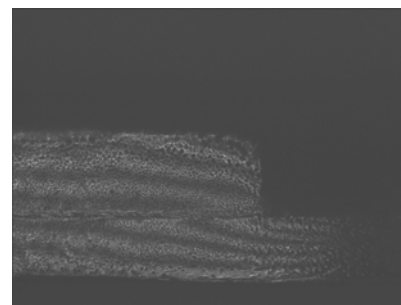
A montagem óptica foi similar às utilizadas nos ensaios anteriores para a interferometria de Moiré, ver Figura 6.33.

A montagem óptica foi similar às utilizadas nos ensaios anteriores para a interferometria de Moiré, ver Figura 6.33. Também neste caso, o ensaio foi elaborado comparando dois estados: junta adesiva não carregada e após um carregamento de 100 N. Para o cálculo dos mapas de fase segundo as duas direcções ortogonais foi utilizado o algoritmo já descrito anteriormente envolvendo quatro imagens. A medição realizada neste caso foi em tudo semelhante à descrita anteriormente para obter o campo de deslocamentos na vizinhança da fenda.

Durante o ensaio foi aplicada uma carga de 100 N na junta colada de simples sobreposição. Como a situação inicial, provete descarregado, corresponde a um campo nulo ou infinito, não é necessário considerar o deslocamento inicial no cálculo final do campo de deslocamentos, sendo apenas utilizado o campo de deslocamentos provocado pelo carregamento. Nas Figura 6.44 e Figura 6.45 estão representadas as quatro imagens, nas duas direcções (U e V), utilizadas para o cálculo de fase. A estudo da junta adesiva foi feito apenas numa região próxima do final de bordo, pois é aí que encontram as maiores valores de tensão. Como tal é a zona que se encontra em maior risco de colapso. Normalmente, em situações de rotura, é nessa região que ela se inicia.



Fase = 0°



Fase = 90°

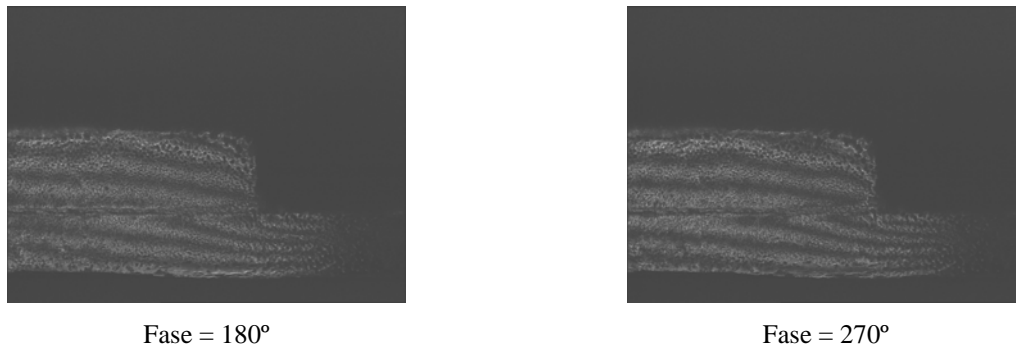


Figura 6.44 Padrão de franjas para o deslocamento U, provocado por um carregamento de 100 N..

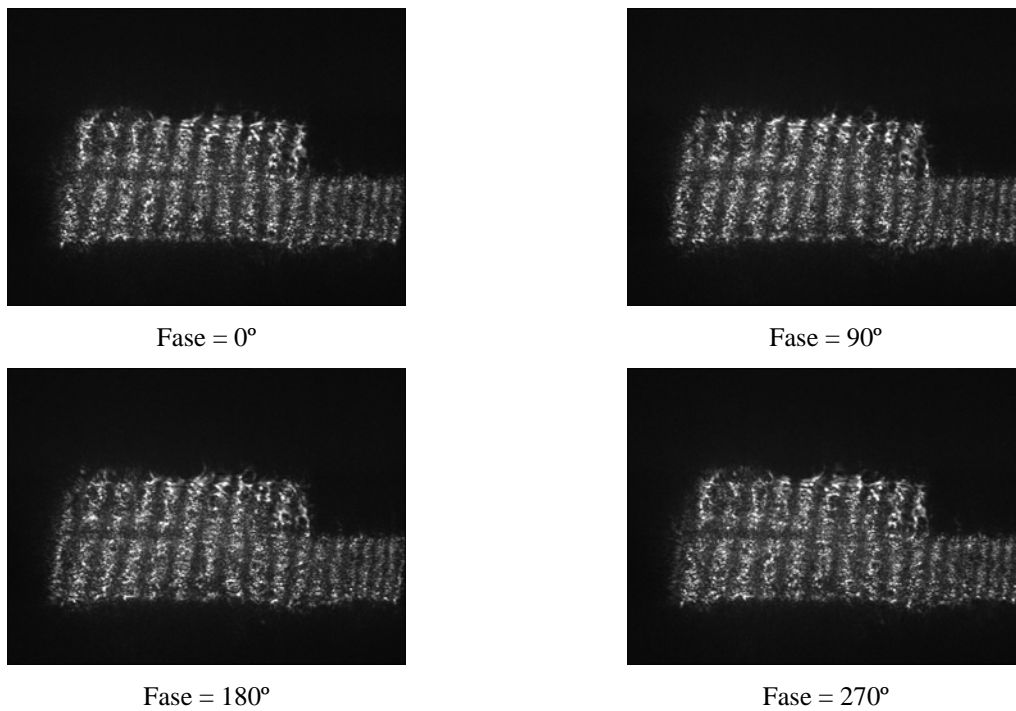


Figura 6.45 Padrão de franjas para o deslocamento V, provocado por um carregamento de 100 N.

Os mapas de fase obtidos para as duas direcções em análise (U e V) estão representados na Figura 6.46. Para obter esta imagem foi efectuada uma filtragem passa-baixo utilizando um filtro de fase.

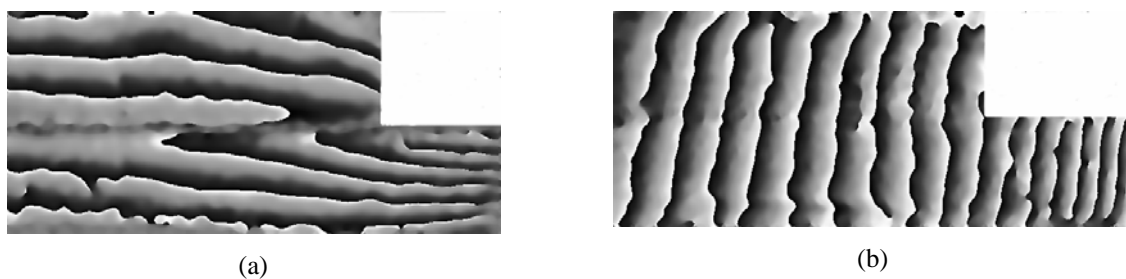


Figura 6.46 Mapas de fase correspondente à: (a) direcção U; (b) direcção V.

Na Figura 6.47 estão os campos de deslocamentos para as duas direcções U e V após eliminação das descontinuidades do mapa de fase.

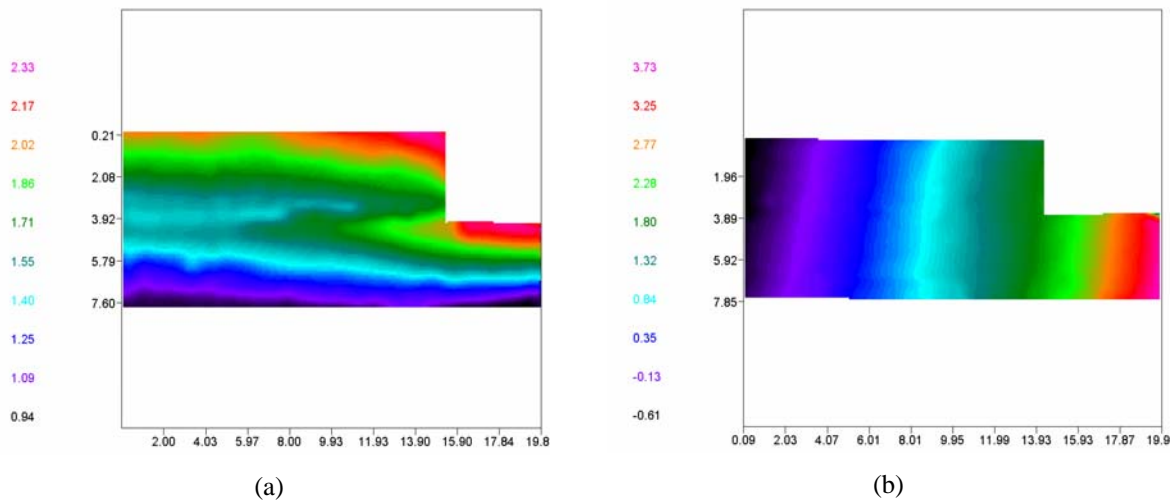


Figura 6.47 Campos de deslocamentos na: (a) direcção U; (b) direcção V; (unidades do deslocamento em μm e dimensões do provete em mm).

Numa primeira análise qualitativa do campo de deslocamentos pode verificar-se a existência de dois fenómenos de deformação distintos. O primeiro, que é óbvio, correspondente à tracção e que é bem notório nos deslocamentos na direcção V. Nesta imagem também se pode verificar que a espessura do adesivo é muito fina, pois o efeito da flexibilidade do adesivo é muito baixo, o que está de acordo com a teoria de Goland e Reissner [20]. Estes investigadores afirmam, que no caso em que a espessura do adesivo é muito fina o efeito da flexibilidade do adesivo pode ser negligenciado. Outro fenómeno que ocorre e pode ser observado a partir dos deslocamentos na direcção U, é a flexão provocada pela excentricidade da carga aplicada. Este efeito é notório pelo facto das franjas se encontrarem inclinadas relativamente à direcção horizontal.

6.5.2 Simulação numérica

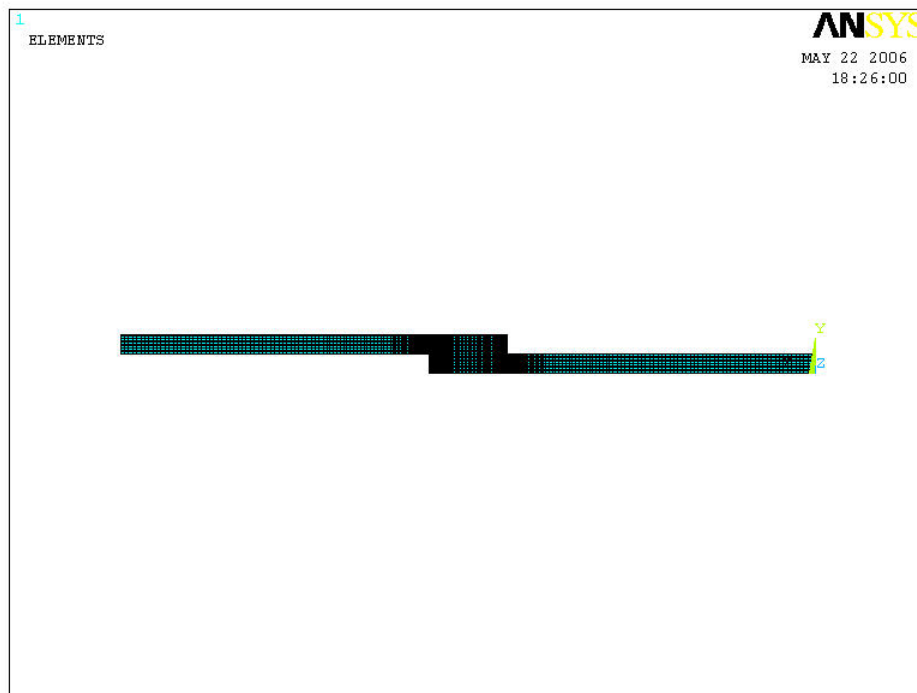
Para a análise numérica da distribuição de tensões nas juntas adesivas recorreu-se, mais uma vez, ao programa comercial de elementos finitos ANSYS®. Criou-se um modelo idêntico à junta adesiva utilizada experimentalmente e considerou-se um estado plano de tensão em regime linear elástico. De seguida procedeu-se à geração da malha do modelo, tendo o cuidado de se fazer um refinamento junto às zonas de maior concentração de tensões, isto é, nas regiões próximas do fim da sobreposição. Para o modelo utilizaram-se 3260 elementos quadrangulares sólidos bidimensionais isoparamétricos com oito nós.

Foram definidas propriedades mecânicas dos materiais utilizados: adesivos e aderentes cujos valores se encontram na Tabela 6.5. Considerou-se ainda que os materiais utilizados eram isotrópicos.

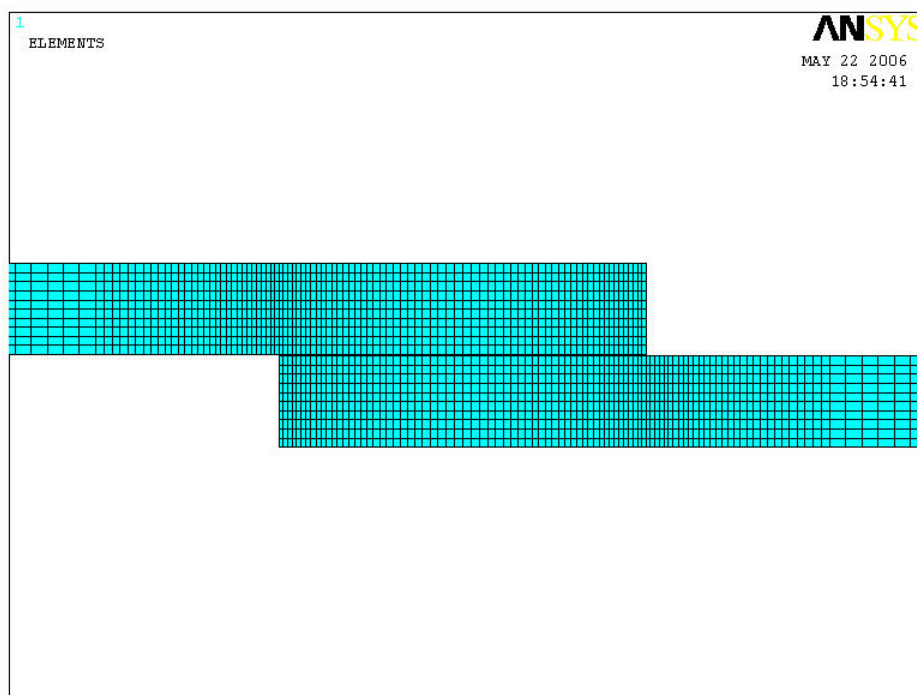
Tabela 6.6 Propriedades mecânicas do adesivo e dos aderentes.

Adesivo		Aderente	
E [MPa]	ν	E [MPa]	ν
1200	0.33	70000	0.3

Na Figura 6.48 representa-se o modelo criado com a respectiva malha, bem como o pormenor do refinamento da malha na região da sobreposição da junta adesiva.



(a)



(b)

Figura 6.48 (a) Malha de elementos finitos do modelo utilizado na simulação numérica; (b) Pormenor do refinamento da malha na zona de sobreposição da junta adesiva.

Foi feita uma simulação numérica do ensaio estático de tracção em que foi utilizado um carregamento de 100N. As condições de fronteira e a carga utilizadas estão representadas na Figura 6.49.

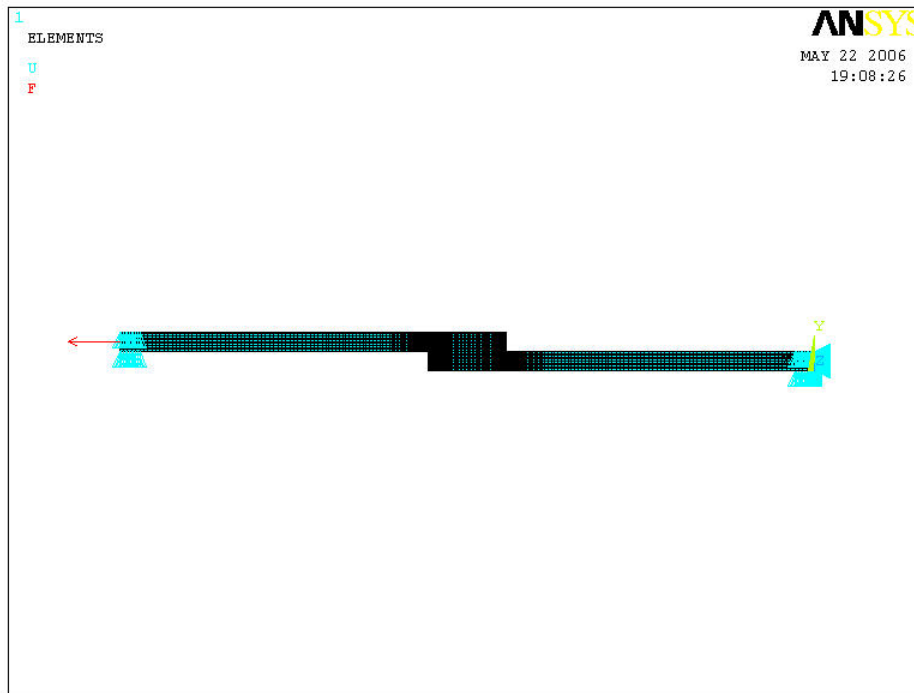


Figura 6.49 Condições de fronteira utilizadas na simulação numérica.

A zona de análise concentrou-se no final da sobreposição, tal como já tinha sido feito nas medições experimentais, pelas razões anteriormente referidas (zona de concentração de tensões – ponto de singularidade). Os resultados obtidos pela simulação numérica para o campo de deslocamentos U e V são apresentados na Figura 6.50.

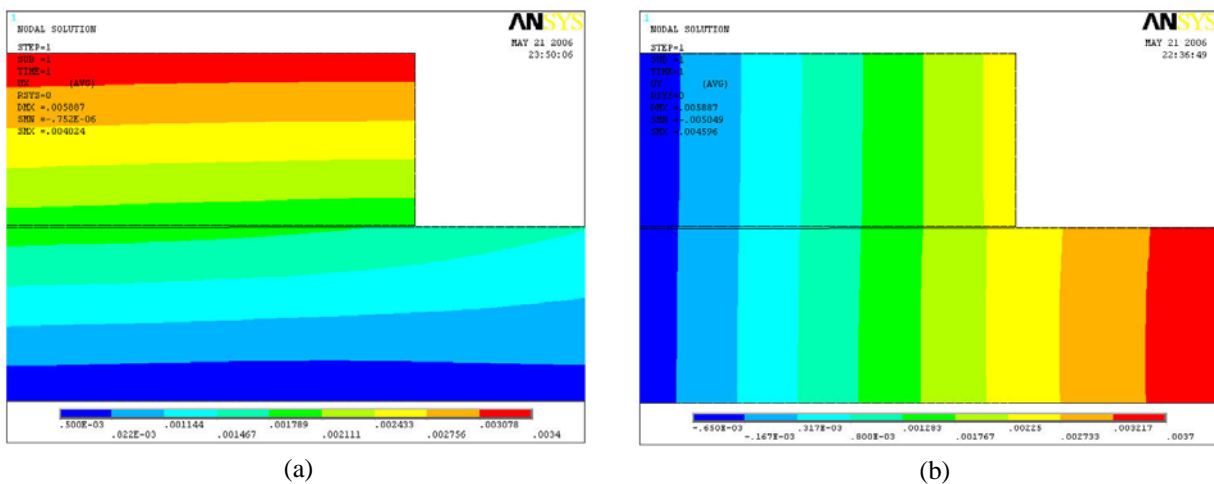


Figura 6.50 Campos de deslocamentos obtidos por simulação numérica: (a) direcção U; (b) direcção V; (unidades em m).

Observando as imagens do campo de deslocamento na direcção U e V pode verificar-se que o comportamento qualitativo da sua evolução está próximo dos resultados ocorridos a nível experimental, embora ocorra uma maior diferença na direcção U do que na V. Esta diferença dever-se-á provavelmente a dois efeitos que não foram reproduzidos na simulação numérica. Por um lado o eixo de aplicação da carga não coincide com o da fixação do aderente oposto, o que provocará um outro momento flector em torno dum eixo perpendicular ao plano correspondente à largura.

6.5.3 Discussão de resultados

Fazendo uma análise comparativa entre os resultados numéricos e experimentais pode afirmar-se que ocorre uma grande proximidade, tanto qualitativa como quantitativa para o campo de deslocamentos V: os deslocamentos encontram-se distribuídos numa forma aproximadamente igual, embora no caso dos resultados experimentais eles apareçam ligeiramente mais inclinados. Esta ligeira inclinação deve-se à possivelmente ao sistema óptico, mais precisamente a uma ligeira inclinação da rede de difracção que cobre a superfície de análise. A principal evidencia deste facto é a da inclinação manter-se para além da região da sobreposição. Os valores do deslocamento são aproximadamente iguais, tanto numérico como experimentais, e encontram-se entre -0.6 e $3.7 \mu\text{m}$.

No caso dos deslocamentos na direcção U, os resultados experimentais e numéricos não estão tão próximos. Embora algumas das razões para essas diferenças já tenham sido anteriormente discutidas, podem, ainda, acrescentar-se outras como os erros introduzidos pelo processo de *phase shifting*. Fazendo uma avaliação qualitativa do campo de deslocamentos na direcção U, pode verificar-se que enquanto nas medições feitas com a interferometria de Moiré o seu valor se encontra entre 0.94 e $2.33 \mu\text{m}$ na simulação numérica os resultados obtidos encontram-se compreendidos no intervalo de 0.5 a $3.4 \mu\text{m}$, o que corresponde a uma diferença significativa entre os dois métodos.

6.5.4 Conclusões

A técnica experimental de Moiré interferométrico está bem adaptada para a medição do campo de deslocamentos em juntas adesivas de simples sobreposição, os resultados obtidos na simulação numérica confirmam os resultados experimentais, embora ocorram algumas diferenças significativas na medição dos deslocamentos numa das direcções. Há uma maior concordância entre os valores de deslocamentos medidos com Moiré interferométrico e os determinados numericamente com elementos finitos na direcção V do que na direcção U. Esta diferença pode ser causada por três factores a saber: causas intrínsecas ao processo de tracção de juntas adesivas de simples sobreposição, causas provocadas pelo sistema óptico e pelas rotinas utilizadas no processamento de imagem. Um melhor ajuste do modelo utilizado na simulação numérica permitiria ter obtido resultados mais aproximados contudo, existiu alguma dificuldade em conhecer todos os parâmetros reais do ensaio tais como: descentragens, propriedades mecânicas dos materiais, rigidez da estrutura de carga, etc.

6.6 Ensaio de Compressão dum Disco (*Brazilian Disc*)

Este ensaio foi efectuado no Instituto de Micromecânica e Fotónica pertencente à Universidade Tecnológica de Varsóvia no âmbito dum projecto europeu, (SPOTS – *Standardisation Project for Optical Techniques of Strain Measurement*) [21], de normalização de técnicas ópticas para a medição de deformações. Neste projecto foram desenvolvidos um conjunto de provetes com determinadas geometrias e dimensões, que foram fabricadas com um mesmo material. O conjunto de provetes idênticos foi distribuído por diferentes laboratórios pertencentes ao consórcio. Cada laboratório ensaiou os provetes com diferentes técnicas ópticas e no final foram comparados os resultados. Do resultado deste projecto, foram esboçadas as primeiras normas [21], que num próximo projecto poderão vir a tornar-se normas europeias. O trabalho que se descreve nesta tese está integrado no ensaio dum dos provetes referidos e que é denominado por *Brazilian Disc*, que consiste na aplicação duma

carga diametralmente oposta num disco, tal como se representa esquematicamente na Figura 6.51. Este tipo de ensaios é normalmente utilizado no estudo mecânico de rochas [22], embora a análise desenvolvida neste projecto europeu fosse realizada sobre metais.

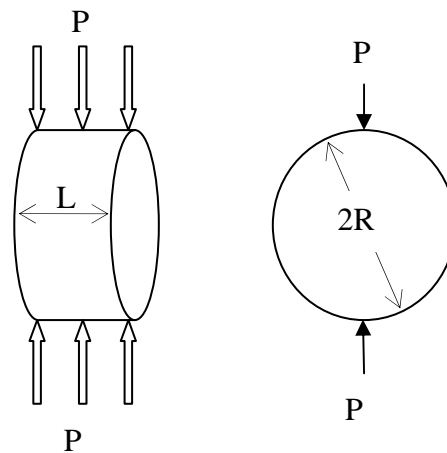


Figura 6.51 Ensaio de compressão num disco, teste *Brazilian disc*.

Para se poder realizar este tipo de ensaio, utilizando técnicas ópticas, foi necessário desenvolver um provete específico que garantisse o alinhamento da carga ao longo da geratriz do disco. Para isso foi desenvolvido o protótipo dum provete, que está representado na Figura 6.52. No anexo E está indicado o desenho de definição do protótipo.

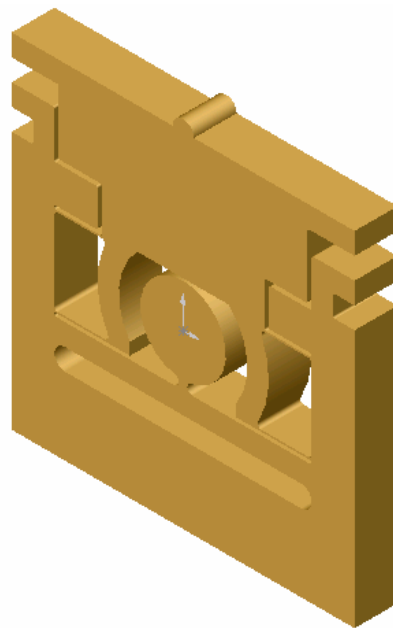


Figura 6.52 Modelo tridimensional do protótipo normalizado do provete ensaiado com Moiré Interferométrico.

6.6.1 Ensaio experimental

O ensaio experimental foi desenvolvido utilizando a técnica de Moiré Interferométrico recorrendo a uma rede de difracção bi-direccional. Esta rede de difracção é idêntica às anteriormente referidas, sinusoidal e com mesma frequência (1200 l/mm), só que neste caso

as linhas têm duas direcções ortogonais (Figura 3.7 b). Assim, poder-se-á medir o deslocamento em duas direcções ortogonais.

Na primeira fase do ensaio fez-se a replicação da rede de difracção para o provete.

Numa segunda fase, após a replicação de rede de difracção no provete, fez-se uma montagem óptica de quatro feixes, similar à indicada esquematicamente na Figura 6.33.

O provete foi colocado num sistema de alavanca que provoca a compressão controlado do disco. Este sistema está integrado na montagem óptica. A Figura 6.53 mostra uma fotografia da montagem representada esquematicamente na Figura 6.33.

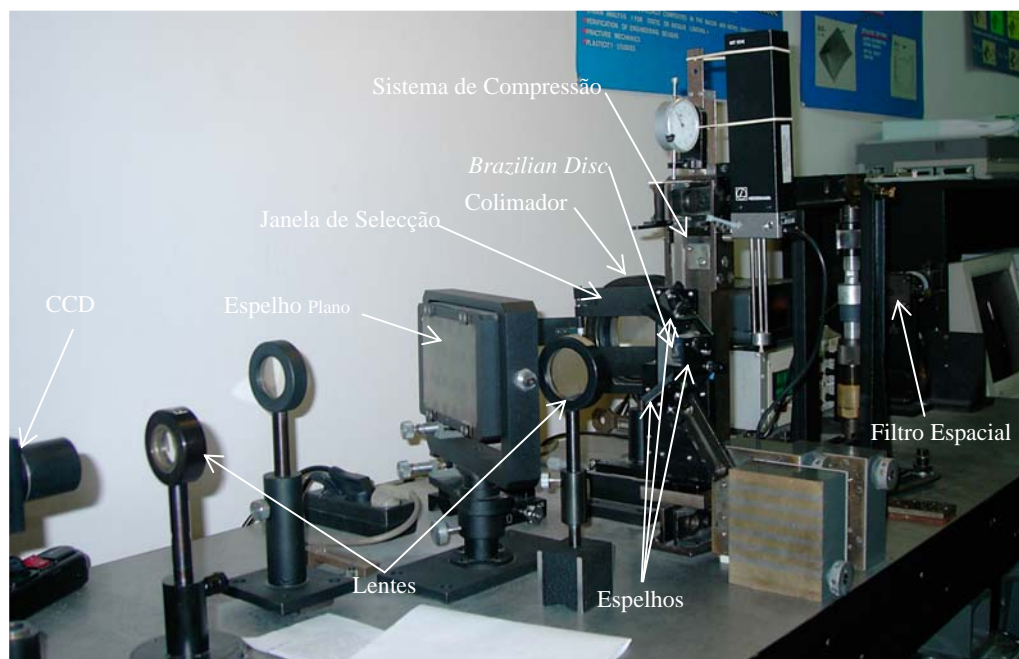


Figura 6.53 Montagem óptica utilizada para realizar o ensaio do “Brazilian Disc”, recorrendo à técnica de Moiré Interferométrico.

Antes de iniciar as medições foi necessário, tal como no caso anterior, proceder-se ao alinhamento da montagem. O procedimento é idêntico ao anterior, mas neste caso o alinhamento terá de ser feito para as duas direcções ortogonais. Assim, utilizando a janela de seleccção dividiu-se o feixe colimado: quando a janela do centro estava aberta e as exteriores fechadas (caso da Figura 6.53), ficavam iluminados a rede de difracção juntamente com o espelho central; no caso contrário (janela do centro fechada e as exteriores abertas) eram iluminados os espelhos exteriores, neste caso a luz era reflectida pelos espelhos com um determinado ângulo sobre a rede de difracção do provete. Em ambos os casos o procedimento é idêntico ao descrito anteriormente, com a diferença que teria de se repetir para cada um dos casos referidos.

Esta montagem óptica é denominada por sistema de quatro feixes e já foi descrita em capítulos anteriores.

Na Figura 6.54 está indicado em pormenor a montagem do provete com a rede de difracção no sistema de compressão e o interferómetro constituído pelos três espelhos.

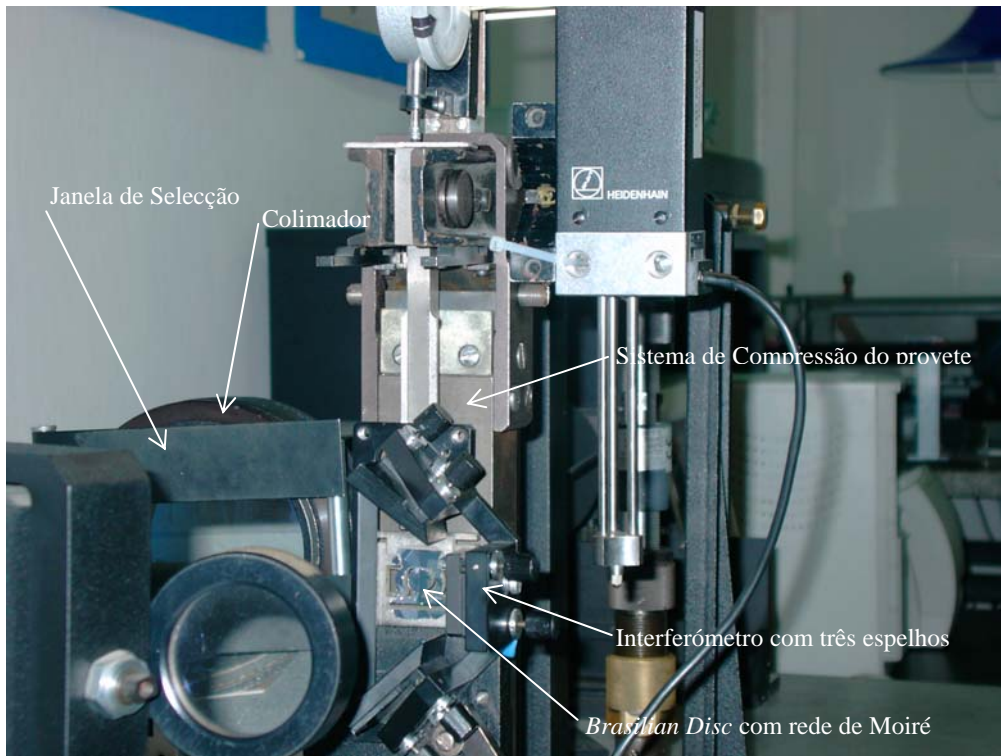


Figura 6.54 Pormenor da montagem do provete (*Brazilian Disc*) na montagem experimental.

Depois de efectuado o alinhamento e da obtenção do campo nulo fez-se a aplicação da carga de compressão sobre o provete fazendo aparecer um padrão de franjas representado na Figura 6.55.



Figura 6.55 Padrão de franjas após a aplicação da carga de compressão sobre o provete.

Foram aplicadas diferentes cargas e fez-se a análise dos resultados experimentais (padrões de franjas) recorrendo a um programa de processamento de imagens desenvolvido no Instituto de Micromecânica e Fotonica da Universidade Tecnológica de Varsóvia. Este programa está comercialmente disponível com a designação *Fringe Application 2001*. Este *software* permite, a partir do padrão de franjas, determinar o campo de deformações. Assim, a imagem é captada pelo CCD e enviada para o computador via *frame grabber*. Para o cálculo do mapa de fase o programa permite utilizar três metodologias: *temporal phase shifting*, *spacial carrier phase shifting* e FFT [14].

Para o primeiro método é utilizada uma placa de vidro com as faces paralelas para provocar o desfasamento (*phase shifting*) [23, 24], metade do feixe que sai do colimador (espelho parabólico) passa pela placa de vidro e chega à rede de difracção com um atraso (diferença de caminho óptico) relativamente à outra metade do feixe que não passa pelo vidro e que vai incidir no espelho. Este desfasamento pode ser controlado pela rotação da placa de vidro e é função do ângulo rotação dado à placa. Neste algoritmo utilizam-se cinco imagens para o cálculo do mapa de fase, com igual desfasamento imposto entre as diferentes imagens. Após a gravação das cinco imagens no computador é calculada a fase a partir da seguinte expressão:

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \right] \quad (6.3)$$

φ representa o valor da fase, I_1 , I_2 , I_3 , I_4 e I_5 são as intensidades para cada uma das imagens gravadas.

No segundo método cria-se um conjunto de franjas portadoras, este procedimento é feito variando ligeiramente o ângulo dos espelhos do interferómetro. Estas franjas portadoras permitem o cálculo de fase utilizando apenas uma imagem. O cálculo de fase é feito utilizando o valor da intensidade de *pixels* vizinhos, isto é, em vez da utilização das intensidades de imagens diferentes, como nos métodos temporais, neste caso recorre-se aos *pixels* duma única imagem. Naturalmente a portadora espacial terá de ser suficientemente elevada para permitir o cálculo de fase. Quando se pretende determinar o mapa de fase do provete sujeito a um carregamento é necessário obter primeiro a imagem do mapa de fase antes do carregamento, apenas com as franjas portadoras e após carregamento, em que o mapa de fase será calculado a partir das franjas portadoras e das franjas provocadas pela deformação do provete. O mapa de fase devido à deformação do objecto resulta da diferença entre o primeiro e o segundo mapa de fase.

O método das FFT utiliza as transformadas de Fourier para o cálculo do mapa de fase. Como não foi utilizada esta técnica na realização deste trabalho, dispensa-se uma explicação mais aprofundada, recomenda-se alguma bibliografia que tem uma boa descrição da técnica bem como algumas aplicações da mesma [25, 26, 27, 28].

Pela análise da expressão (6.3) pode verificar-se que existem descontinuidades para os valores da fase de $-\pi$ e π , em que o valor calculado com arco tangente é assintótico. Para resolver este problema recorre-se a um procedimento denominado remoção de descontinuidades da fase (*unwrapping*) e assim obtém-se o campo de deslocamentos. Da distribuição de deslocamentos é possível, por derivação, calcular o campo de deformações. Existem diversos algoritmos para o *unwrapping* mas no trabalho desenvolvido foi utilizado o algoritmo denominado “*spanning tree*”. Após procedimento do desembrulhar da fase fizeram-se algumas filtrações para eliminar o ruído da imagem e evitar a propagação de erros.

Depois da aplicação da carga fez-se a aquisição da imagem e utilizando o programa de processamento de imagem referido determinaram-se os campos de deslocamentos, segundo as direcções horizontal (U) e vertical (V), representados na Figura 6.56.

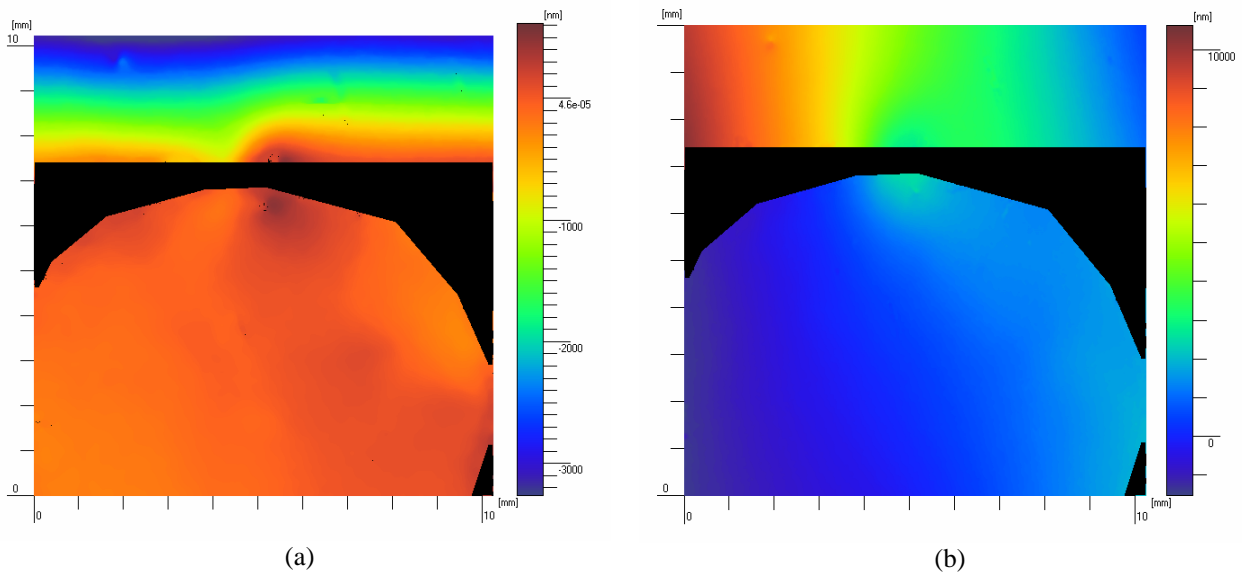


Figura 6.56 Campo de deslocamentos obtidos no ensaio de compressão do *Brazilian Disc* segundo a: (a) direcção horizontal (U); direcção vertical (V). As unidades encontram-se em nm.

O programa *Fringe Application 2001* permite derivar o campo de deslocamentos, podendo, assim, ser obtido o campo de deformações segundo as duas direcções anteriormente referidas (U e V). Na Figura 6.57 mostra-se o campo de deformações do provete nas direcções U e V.

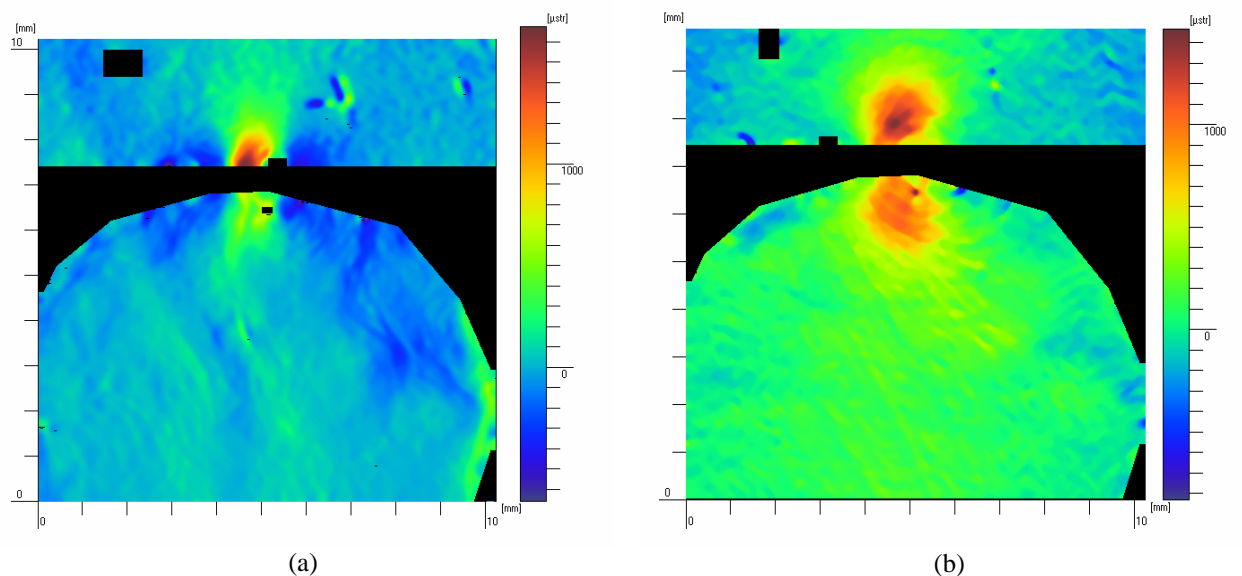


Figura 6.57 Campo de deformações do provete segundo as direcções: (a) U; (b) V. As deformações são adimensionais e aparecem divididas por 10^{-6} (micro deformações μstrain).

6.6.2 Simulação numérica

A simulação do ensaio *Brazilian Disc* foi efectuada recorrendo ao programa de elementos finitos ANSYS®. Considerou-se um estado plano de tensão em que o modelo matemático usado simulava um comportamento elasto-plástico multi-linear para simular o comportamento do material. Foi criado um modelo com geometria e dimensões idênticas ao utilizado experimentalmente e gerada a respectiva malha, impondo-se uma carga de 2000 N e que implica a ocorrência duma deformação plástica, tal como acontecia no ensaio experimental. Foram utilizadas nessa modelação as propriedades do alumínio ($E=70$ GPa, $\nu = 0.3$), gerada uma malha de 448 elementos isoparamétricos quadráticos com 8 nós. Na Figura 6.58 representa-se o modelo criado com a respectiva malha.

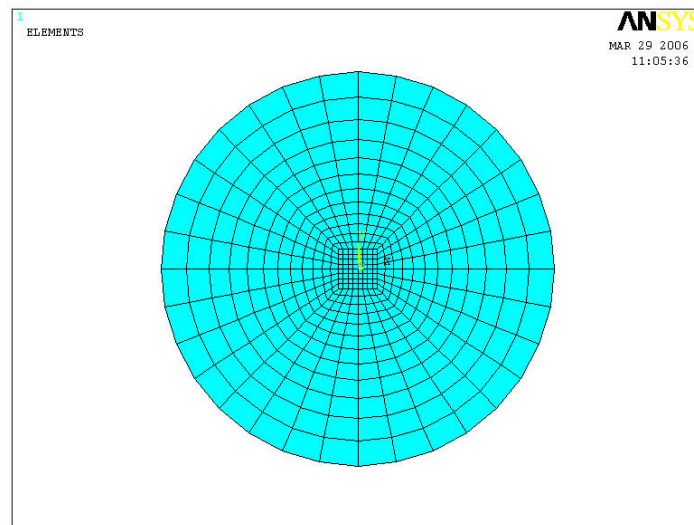


Figura 6.58 Malha de elementos finitos do modelo utilizado na simulação numérica do ensaio experimental.

A simulação numérica permitiu a determinação do campo de deslocamentos e do campo de deformações.

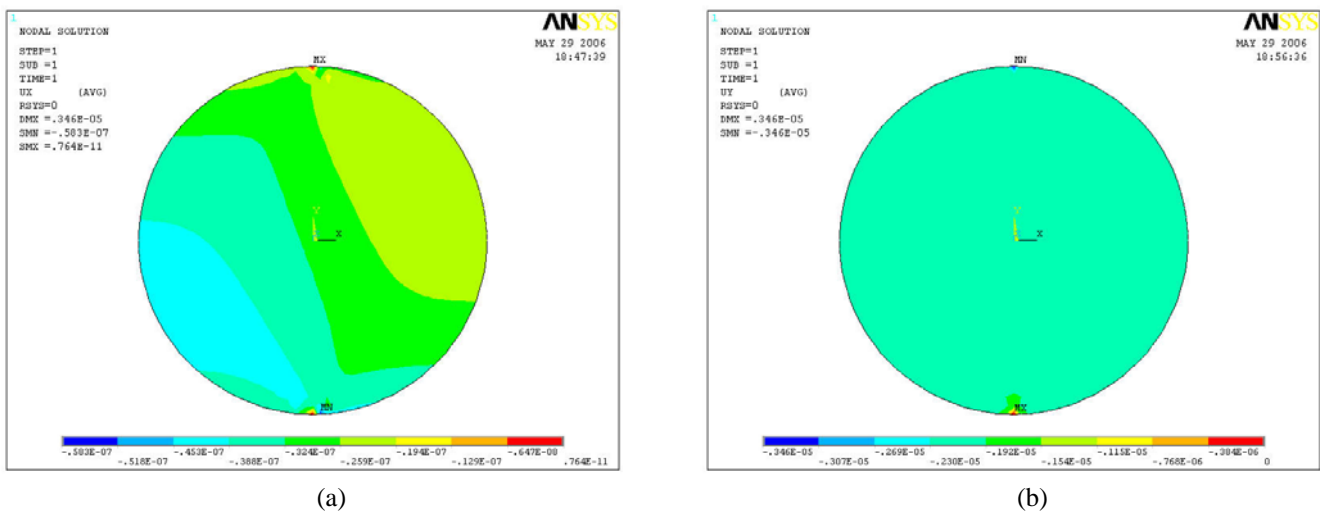


Figura 6.59 Campo de deslocamentos obtidos na simulação numérica de compressão do *Brazilian Disc* segundo a: (a) direcção horizontal (U); direcção vertical (V). As unidades encontram-se em m.

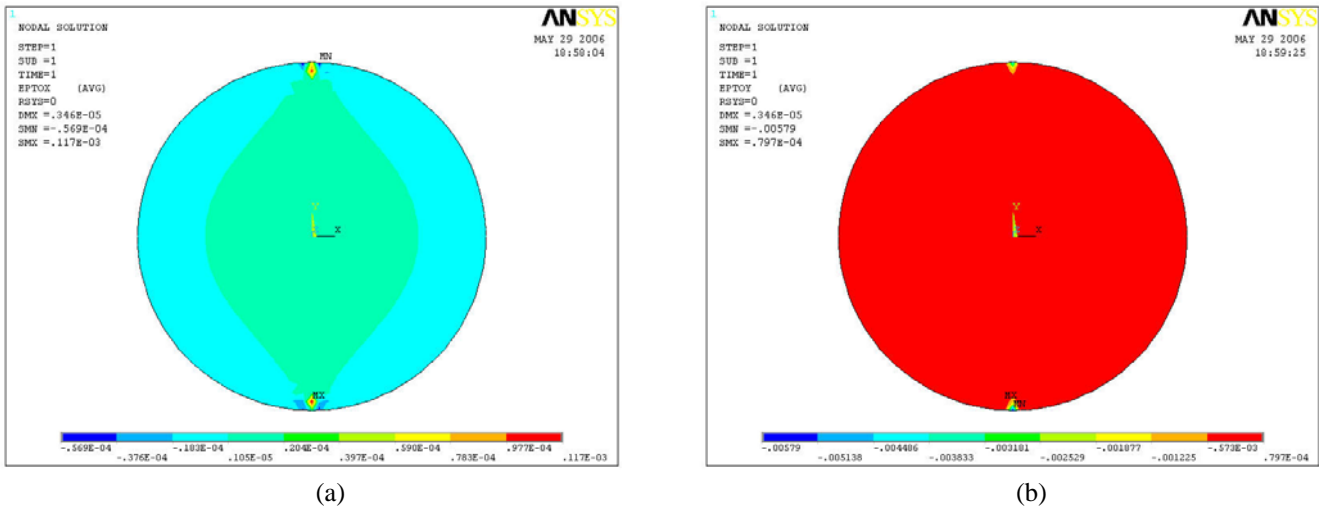


Figura 6.60 Campo de deformações obtidos na simulação numérica de compressão do *Brazilian Disc* segundo a: (a) direcção horizontal (U); direcção vertical (V).

6.6.3 Discussão de resultados

Os resultados experimentais obtidos neste trabalho foram comparados com os obtidos noutros grupos de investigação, parceiros no projecto europeu já referido [21]. Desta comparação constatou-se que os resultados estiveram muito próximos, o que significa que para procedimentos experimentais semelhantes os resultados obtidos são praticamente idênticos. Estas observações permitem concluir que a técnica óptica de Moiré interferométrico de elevada resolução poderá ser uma alternativa viável para o medir campo deslocamentos e de deformações no plano.

A análise deste tipo de ensaios (*Brazilian Disc*), normalmente concentra-se em duas regiões preferenciais [29]: uma na zona próxima do ponto de contacto da aplicação da carga e outra na região central do provete, onde normalmente é criada uma fissura para um posterior estudo da sua propagação com o aumento do valor da carga aplicada.

Fazendo uma análise aos resultados experimentais pode verificar-se que o valor do deslocamento na região próxima do ponto de contacto da força é praticamente nulo, na direcção horizontal, e tem valor máximo na direcção vertical. O deslocamento segundo a vertical é de aproximadamente $3.5 \mu\text{m}$. Na região central do provete os deslocamentos têm um valor aproximado de $-0.1 \mu\text{m}$ e de $1.5 \mu\text{m}$, nas direcções horizontal e vertical, respectivamente. Quanto às deformações, os valores máximos ocorrem na região próxima do ponto de contacto da carga aplicada e são mais elevados na direcção vertical (aproximadamente 1000×10^{-6}) do que na direcção horizontal (cerca de 600×10^{-6}). Na zona central do disco os valores são, respectivamente, cerca de 100 e 500×10^{-6} na direcção horizontal e vertical. Estes valores, quer para os deslocamentos, quer para as deformações, eram previsíveis, uma vez que a carga é aplicada na direcção vertical, logo os seus valores máximos ocorreriam nessa direcção. Apesar de ocorrer sempre algum desvio, provocado por um ligeiro movimento de rotação em torno do ponto de apoio do provete, esta ocorrência provoca alguma assimetria relativamente ao eixo vertical que passa pelo centro do disco, o que é visível no campo de deformações.

Examinando o campo de deslocamentos na região próxima do ponto da aplicação da carga, na direcção horizontal o seu valor é praticamente nulo enquanto que na vertical atinge o valor

máximo que é de aproximadamente $-3 \mu\text{m}$. Se a observação for feita na região central do provete os deslocamentos são aproximadamente de $-0.03 \mu\text{m}$ na direcção horizontal enquanto na vertical o seu valor ronda $2 \mu\text{m}$. Analisando o campo de deformações obtido com a simulação numérica pode verificar-se que na direcção vertical o valor da deformação na região próxima do ponto de contacto com a carga atinge um valor médio aproximado de 800×10^{-6} enquanto que na direcção horizontal o seu valor médio é de cerca de 100×10^{-6} . Na região central do disco o valor das deformações atinge, para o caso da direcção horizontal, aproximadamente 10×10^{-6} enquanto que no caso da direcção vertical esse valor passa a rondar os 400×10^{-6} .

Comparando os resultados numéricos com os experimentais pode verificar-se que o modelos simulados tem um comportamento similar ao provete ensaiado. Contudo, alguns valores determinados numericamente são bastante diferentes dos medidos experimentalmente, essa diferença é mais notória no caso do campo de deformações segundo a direcção horizontal. Nos outros casos, campo de deslocamentos (horizontal e vertical) e campo de deformações na direcção vertical, a diferença entre os resultados determinados com os elementos finitos e os resultados experimentais é bastante pequena. Na Tabela 6.6 estão indicados, numa forma resumida, os valores de deslocamento e deformação determinados numericamente bem como os medidos experimentalmente, nos pontos analisados.

Tabela 6.7 Comparação entre os resultados numéricos e os valores medidos com Moiré.

	Zona 1				Zona 2			
	U [μm]	V [μm]	ϵ_{xx} [μstrain]	ϵ_{yy} [μstrain]	U [μm]	V [μm]	ϵ_{xx} [μstrain]	ϵ_{yy} [μstrain]
Moiré	0	3.5	600	1000	0.05	1.5	100	500
MEF	0	-3	100	800	-0.03	-2	10	400

Da análise do quadro resumo da Tabela 6.6 pode verificar-se que, à excepção de ϵ_{xx} , há uma grande semelhança entre os valores determinados numericamente e os medidos experimentalmente com a técnica de Moiré interferométrico. A diferença de sinais, relativamente aos campos de deslocamentos (U e V), que ocorre entre os resultados obtidos com o MEF e os valores experimentais deve-se ao facto dos cálculos elaborados no programa de processamento de imagem basear-se num sistema de eixos com sentidos diferentes do utilizado no ANSYS®.

6.6.4 Conclusões

Pode concluir-se que a técnica de Moiré interferométrico está bem adaptada para a medição do campo de deslocamentos neste tipo de ensaio, verificação que pode ser confirmada pelos resultados obtidos na simulação numérica. É também possível verificar que a utilização de um software apropriado, neste caso foi utilizado o programa da Universidade de Varsóvia, permite calcular com suficiente rigor o campo de deformações. Esta última conclusão recomenda a continuação do desenvolvimento do programa de processamento de imagem existente no LOME, no sentido de o adaptar à realização deste tipo de medições.

6.7 Correlação de Imagem

As técnicas de Moiré provaram ao longo da realização das medições anteriormente descritas serem adequadas à medição de deslocamentos no plano. Contudo, estas técnicas possuem uma limitação importante que se prende com as dificuldades em gravar redes de elevada frequência espacial na superfície dos provetes. As técnicas de correlação de imagem, descritas no capítulo 3, podem também ser utilizadas para esta aplicação. Para utilizar esta técnica basta apenas criar um padrão aleatório, o mais finamente disperso possível, na superfície das peças a medir. Por vezes a própria textura superficial dos materiais é suficiente para a realização das medições.

A resolução desta técnica é ainda relativamente baixa, quando comparada com as técnicas de interferometria. A sua sensibilidade está limitada pela resolução da câmara e pela sua área de medição embora trabalhos recentes reivindicuem atingir resoluções da ordem do sub-*pixel*, embora à custa de elevado tempo de cálculo. Contudo, com o aumento da capacidade de cálculo e o recurso de algoritmos de optimização esta limitação tem vindo a esbater-se e num futuro próximo esta técnica permitirá a medição de deslocamentos com resoluções próximas das técnicas de interferometria. Este método não necessita dum equipamento óptico especial (laser, espelhos, lentes, etc.) que normalmente é muito dispendioso, a preparação das superfícies a medir é relativamente simples quando comparada com algumas técnicas ópticas (por exemplo Moiré interferométrico). Como o autor teve conhecimento de algumas tentativas para realizar a medições de campos de tensões residuais com estas técnicas foi decidido realizar algumas medições para investigar o seu actual potencial nesta aplicação.

6.7.1 Ensaio de tracção num provete de borracha com furo central

O ensaio de tracção do provete de borracha foi elaborado com o objectivo da validação da técnica na presença de grandes deformações. Optou-se pela borracha por esta permitir efectuar um ensaio de tracção com grandes deslocamentos. O furo pretendia simular o campo de deslocamentos obtido na medição de tensões residuais uni-axiais. Este estudo foi executado em três fases: ensaio experimental, simulação numérica e comparação de resultados.

6.7.1.1 Ensaio experimental

Este ensaio foi executado utilizando uma estrutura de carga constituída por dois micro-posicionadores que permitiram a aplicação dum deslocamento com uma resolução de 0.01 mm. O provete de borracha corresponde a uma placa com as dimensões 70x40x2 mm³, com um furo central de diâmetro 4 mm. Dado que a superfície era muito uniforme foi submetida a uma ligeira preparação prévia. Esta preparação foi executada em duas fase: numa primeira fase a superfície do provete foi pintada de branco *matt*; posteriormente pulverizou-se essa superfície, utilizando um spray muito fino, com tinta preta *matt* obtendo-se assim uma textura adequada. A montagem experimental está representada na Figura 6.61.

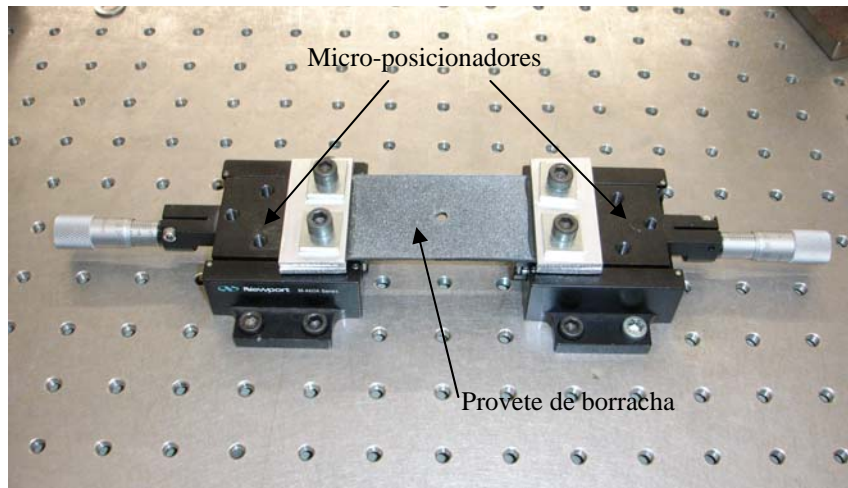


Figura 6.61 Montagem experimental utilizada para o ensaio de tracção dum provete de borracha com furo central.

Foi montada uma câmara digital sobre a superfície do provete a analisar, tendo o cuidado de garantir a perpendicularidade entre a superfície e o eixo da lente da câmara bem como uma boa focagem. Captaram-se duas imagens: antes da deformação e após a aplicação dum deslocamento de $500\ \mu\text{m}$ num dos micro-posicionadores. Na Figura 6.62 estão representadas as duas imagens fotografadas: a de referência (antes da aplicação do deslocamento) e a deformada (após a aplicação do deslocamento).

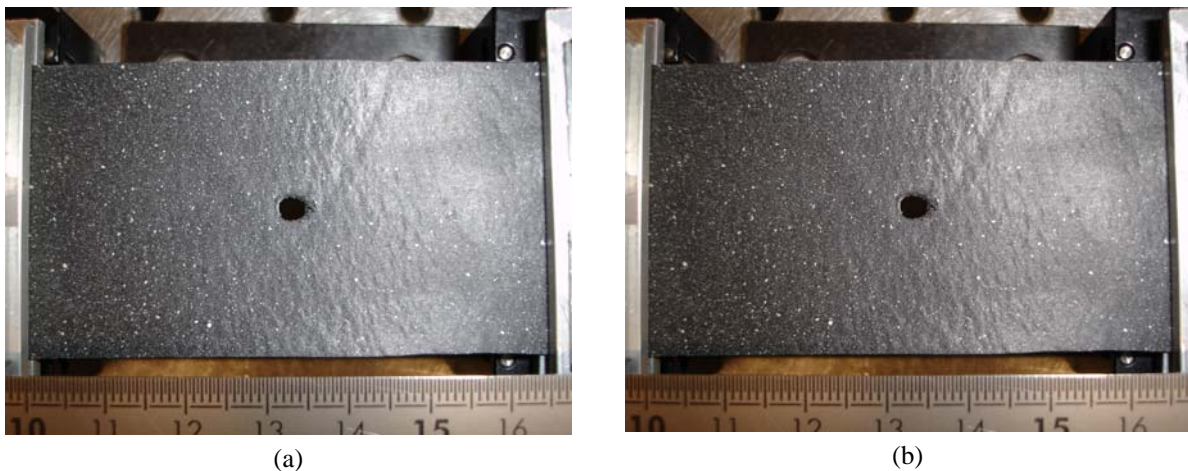


Figura 6.62 Imagens obtidas: (a) antes da aplicação do deslocamento e; (b) após a aplicação dum deslocamento de $500\ \mu\text{m}$.

As imagens obtidas durante o ensaio foram posteriormente tratadas recorrendo a um programa de correlação de imagens desenvolvido no LOME e baseado no princípio descrito no capítulo 3 sobre a correlação de imagem.

A direcção na qual ocorre um deslocamento mais pronunciado é na horizontal, apesar de ocorrer um deslocamento da direcção vertical devido ao efeito de Poisson. Esta contracção lateral não vai ser analisada neste trabalho pois trata-se de um deslocamento de muito reduzida amplitude se comparado com a resolução da técnica. O campo de deslocamentos na direcção horizontal, obtido a partir da técnica de correlação de imagem, está representado na Figura 6.63.

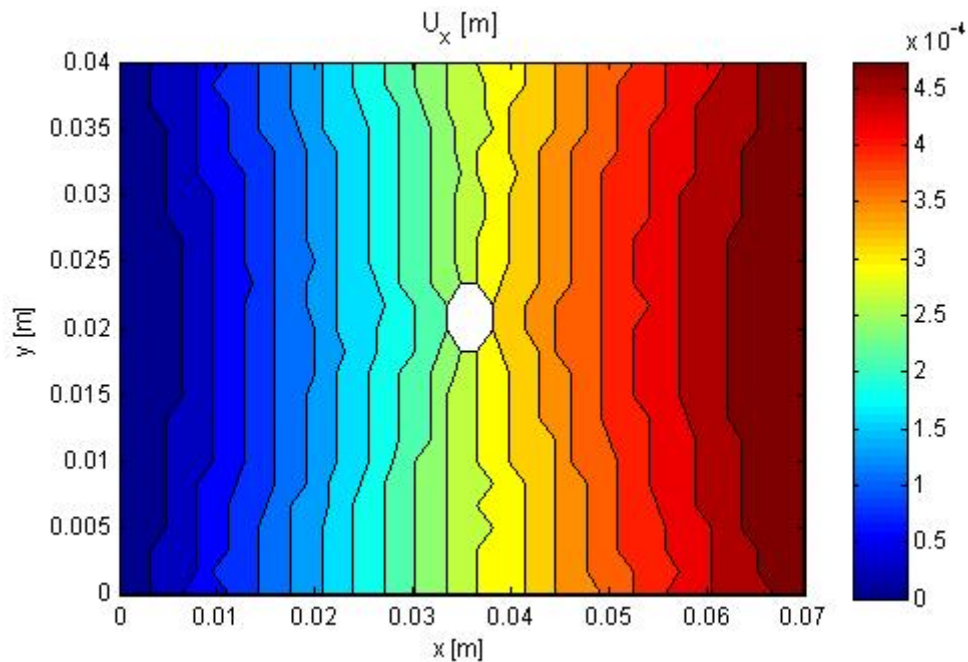


Figura 6.63 Campo de deslocamentos horizontal determinado com técnica óptica de correlação de imagem.

Numa análise preliminar pode verificar-se que o deslocamento no lado esquerdo (o micro-posicionador que está fixo) é nulo enquanto que do lado direito, em que é aplicado um deslocamento com o segundo micro-posicionador de $500 \mu\text{m}$, o valor do deslocamento determinado a partir da correlação de imagem corresponde a um valor próximo do valor imposto. Pode, também, observar-se que as curvas de iso-deslocamentos vão aumentando a sua convexidade à medida que se aproximam do furo, este fenómeno deve-se ao facto da zona do furo corresponder a uma diminuição da secção resistente, provocando um aumento do deslocamento, que é máximo numa posição correspondente a um eixo horizontal que passa pelo centro do furo. As curvas de iso-deslocamentos são interrompidas no bordo furo, continuando, numa forma simétrica, no bordo oposto.

6.7.1.2 Simulação numérica

O código de elementos finitos ANSYS® foi também utilizado na simulação numérica do ensaio de tracção da placa de borracha com furo central. Considerou-se um estado plano de tensão em regime linear elástico. Apesar da borracha ter um regime não linear elástico, para o valor de deslocamento considerado, o comportamento aproxima-se da linearidade. Desta forma, o erro introduzido por esta simplificação não é muito elevado. Foi criado um modelo com geometria e dimensões idênticas ao utilizado experimentalmente e gerada a respectiva malha, à qual foram aplicadas idênticas condições de fronteira e imposto um deslocamento de $500 \mu\text{m}$. Foram utilizadas nessa modelação as propriedades da borracha natural ($E = 0.9 \text{ MPa}$, $\nu = 0,5$) [30] e gerada uma malha de 1728 elementos isoparamétricos quadráticos com 8 nós. Na Figura 6.64 representa-se o modelo criado com a respectiva malha.

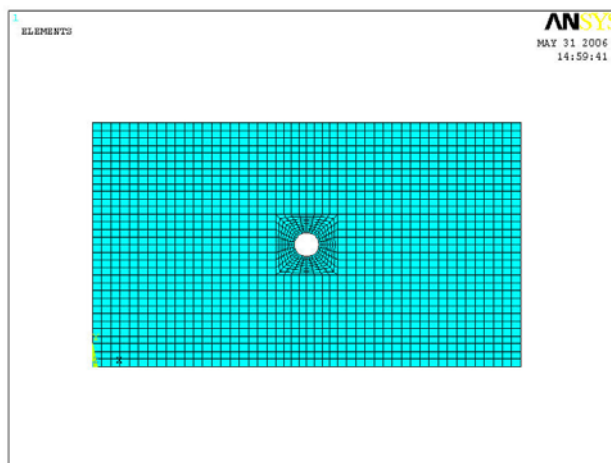


Figura 6.64 Malha de elementos finitos do modelo utilizado na simulação numérica.

Foi realizada uma simulação do ensaio de tracção estática da placa de borracha considerando que os nós do bordo esquerdo da placa estavam encastrados enquanto que os do bordo direito sofreram deslocamentos de 500 μm na horizontal e nulo na vertical.

Com base nos parâmetros definidos anteriormente foi determinado o campo de deslocamentos na direcção horizontal (U). A Figura 6.65 representa esse campo de deslocamentos obtido na simulação.

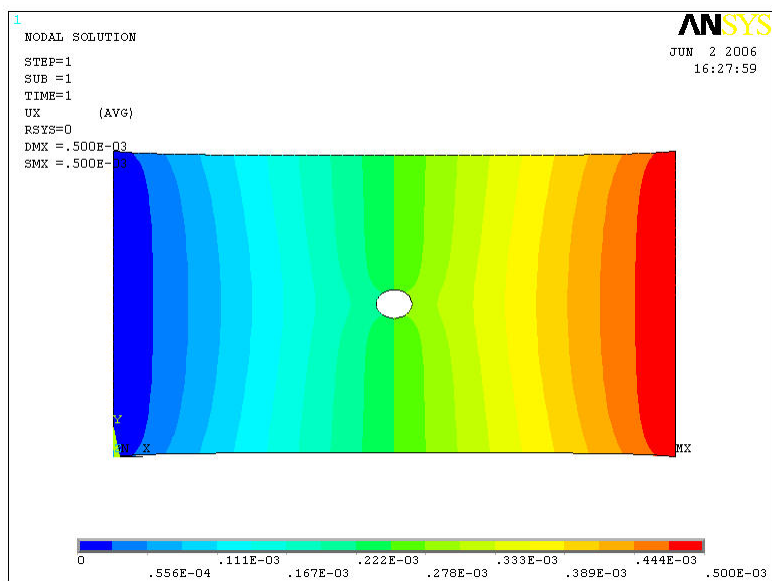


Figura 6.65 Campos de deslocamentos na direcção horizontal (U) obtidos por simulação numérica, unidades em metros.

Fazendo uma avaliação qualitativa o campo de deslocamentos obtido por MEF pode verificar-se que o comportamento corresponde ao esperado para este tipo de ensaio com um material elastomérico. Numa avaliação quantitativa preliminar, verifica-se que os bordos verticais da placa têm os valores numéricos do deslocamento esperados, nomeadamente o bordo esquerdo, considerado encastrado, com um valor de 0 mm, enquanto que o bordo direito tinha o valor de deslocamento aplicado, isto é 500 μm .

6.7.1.3 Discussão de resultados

Fazendo uma comparação qualitativa e quantitativa entre os resultados experimentais e numéricos pode verificar-se que ocorre uma grande similitude entre ambos. Observando o campo de deslocamentos das duas imagens (Figura 6.63 e Figura 6.65) confirma-se a semelhança do comportamento, quer no ensaio experimental, quer na simulação com elementos finitos.

Numa avaliação quantitativa dos resultados obtidos optou-se por se fazer uma comparação entre os valores numéricos e experimentais em duas regiões do provete: na proximidade do furo e nos bordos verticais ($x = 0$ mm e $x = 0.07$ mm). Pode verificar-se que as curvas de iso-deslocamento que são tangentes ao bordo do furo estão compreendidas entre 225 e 325 μm no ensaio experimental enquanto que com os elementos finitos se obteve uma variação compreendida entre 222 e 331 μm . Como se pode verificar os resultados, numéricos e experimentais obtidos estão muito próximos. As curvas de iso-deslocamento que são interrompidas no bordo do furo têm valores de deslocamento compreendidos entre 240 e 310 μm para as medições experimentais, no caso dos resultados determinados numericamente os seus valores encontram-se num intervalo entre 222 e 278 μm . Na tabela 6.8 estão representados os erros relativos entre os resultados obtidos experimentalmente com a técnica de correlação de imagem e os determinados a partir da simulação com elementos finitos. A avaliação quantitativa dos bordos verticais externos do provete mostra, para ambas as técnicas, que os resultados são idênticos, isto é, para $x = 0$ mm o deslocamento é zero, como seria de esperar, uma vez que está encastrado e para $x = 0.07$ mm o deslocamento vale 500 μm , que corresponde ao deslocamento imposto, quer experimentalmente quer numericamente.

Tabela 6.8 Comparação entre os resultados numéricos e os valores medidos com correlação de imagem.

	Iso-deslocamentos tangentes ao furo		Iso-deslocamentos interrompidos pelo furo	
	U [μm]	U [μm]	U [μm]	U [μm]
Correlação de imagem	225	325	240	310
MEF	222	331	222	278
Erro Relativo (%)	1.3	-1.8	7.5	10

Da tabela pode verificar-se que o erro mais elevado é de cerca de 10% e corresponde ao limite máximo do valor de deslocamento que se encontra nas curvas de iso-deslocamento que são interrompidas pelo bordo do furo.

6.7.1.4 Conclusões

A correlação de imagem está bem adaptada para a análise de campos de deslocamentos no plano. Esta técnica está limitada à resolução da câmara pelo que para câmaras cuja resolução não seja muito elevada só é possível medir deslocamentos com grandes amplitudes. No caso particular do estudo de campos de deslocamento num elastómero, em que os deslocamentos podem ser relativamente elevados, é possível medir com grande precisão o seu valor.

6.7.2 Ensaio de flexão na madeira

Como o ensaio anterior respeitava a um campo de tensões uniformes foi decidido experimentar a correlação de imagem numa outra aplicação com maior complexidade. Foi então seleccionado o ensaio de flexão em três pontos pois este ensaio origina campos de deslocamentos resultantes de rotações da superfície no seu plano. Dado que o ensaio de flexão em três pontos é utilizado na caracterização de propriedades da madeira foi esse o material utilizado nestes ensaios. O ensaio foi executado seguindo os princípios referidos na norma portuguesa NP-619 [31] para o ensaio de flexão estática de madeiras. Esta norma fixa um processo para determinação de grandezas características da rotura por flexão estática num provete de madeira. O objectivo deste trabalho não foi, contudo, a determinação dessas grandezas, mas sim o estudo do campo de deslocamentos na superfície do provete de madeira durante a sua flexão num carregamento estático. O dispositivo de flexão utilizado foi desenvolvido no âmbito deste trabalho, tendo em consideração as indicações da norma. No anexo F estão representados os desenhos de definição de todos os elementos do dispositivo de flexão. Foi utilizado um provete paralelepípedo de madeira de pinho, com as dimensões de $45 \times 400 \times 20$ [mm³], sem qualquer tratamento especial, a humidade não foi controlada e o ensaio foi executado a uma temperatura de aproximadamente 20°C. O provete de madeira estava isento de nós e foi sujeito a um período de secagem a 60°C, em forno, durante duas horas, para minimizar o efeito da humidade.

Antes da execução do ensaio o provete de madeira sofreu um tratamento prévio da superfície de medição, recobrimo-a com um revestimento de padrões aleatórios. Para tal, utilizou-se uma tinta que permite a obtenção duma textura com um padrão do tipo “granitado”, idêntico ao referido e representado no capítulo 5 (Figura 5.29). O ensaio foi realizado numa montagem idêntica à que está esquematicamente representada na Figura 6.66.

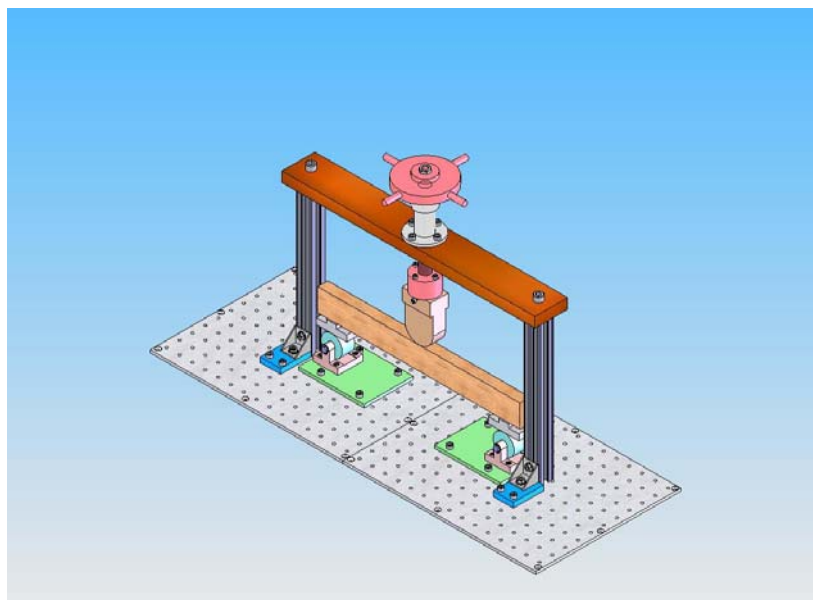


Figura 6.66 Representação esquemática da montagem utilizada no ensaio de flexão na madeira.

A célula de carga foi desenvolvida no LOME [32] e tem seguinte a função de calibração:

$\varepsilon = 0.069034P$ sendo P a força em Newton e ε as micro-deformações ($\times 10^{-6}$) lidas na célula de carga. O valor da correlação obtido no ajuste linear da função de calibração foi $R = 0.9999$.

Uma câmara digital foi colocada em frente à superfície a analisar, tendo o cuidado de garantir a perpendicularidade entre a superfície e o eixo da lente da câmara. Captaram-se duas imagens, uma antes da aplicação da carga, a outra após a sua aplicação. Inicialmente aplicou-se uma pré-carga de 10 N para eliminar as folgas da montagem, fez-se o zero na ponte de medida e captou-se a imagem de referência. De seguida aplicou-se uma carga de 100 N, aguardaram-se cerca de trinta segundos para a estabilização do efeito da carga e só após esse período se captou a segunda imagem. Na Figura 6.67 estão representadas as duas imagens registadas: a de referência (antes da aplicação da carga) e a deformada (após a aplicação da carga). As imagens representadas referem-se à região central do provete imediatamente por baixo do rolete que impõe o deslocamento vertical.



Figura 6.67 Imagens registadas durante o ensaio de flexão em três pontos do provete de madeira: (a) antes da aplicação da carga e; (b) após a aplicação da carga.

As imagens da Figura 6.67 foram de seguida processadas. O programa de processamento de imagem permite a representação vectorial do campo de deslocamentos total, isto é, em cada uma das áreas elementares em que foi dividida a área em estudo associa-se um vector com inicio e fim no seu centro, antes e após a deformação. Esta potencialidade permite a visualização da sua direcção bem como a intensidade dos vectores representativos dos deslocamentos. Na Figura 6.68 estão apresentados os vectores que representam a direcção, sentido e intensidade de alguns pontos de deslocamento no provete.

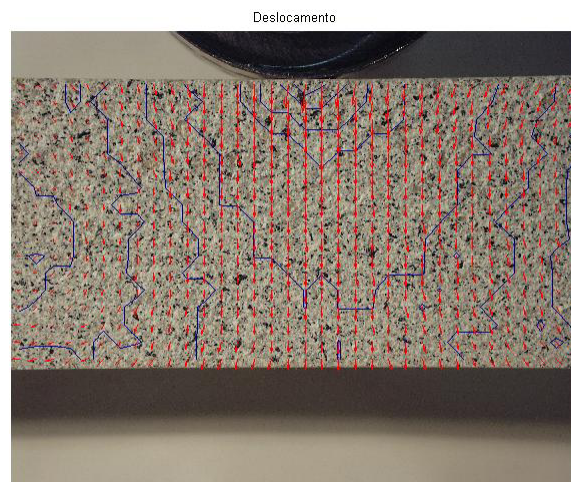


Figura 6.68 Representação vectorial do campo de deslocamentos que ocorreu durante o ensaio.

Para além da representação vectorial indicada na Figura 6.68, também é possível a representação simultânea do campo de deslocamentos sobre a forma de mapa de cores e vectorialmente, tal como está indicado na Figura 6.69. Nesta figura o mapa de cores representa o campo de deslocamentos na vertical.

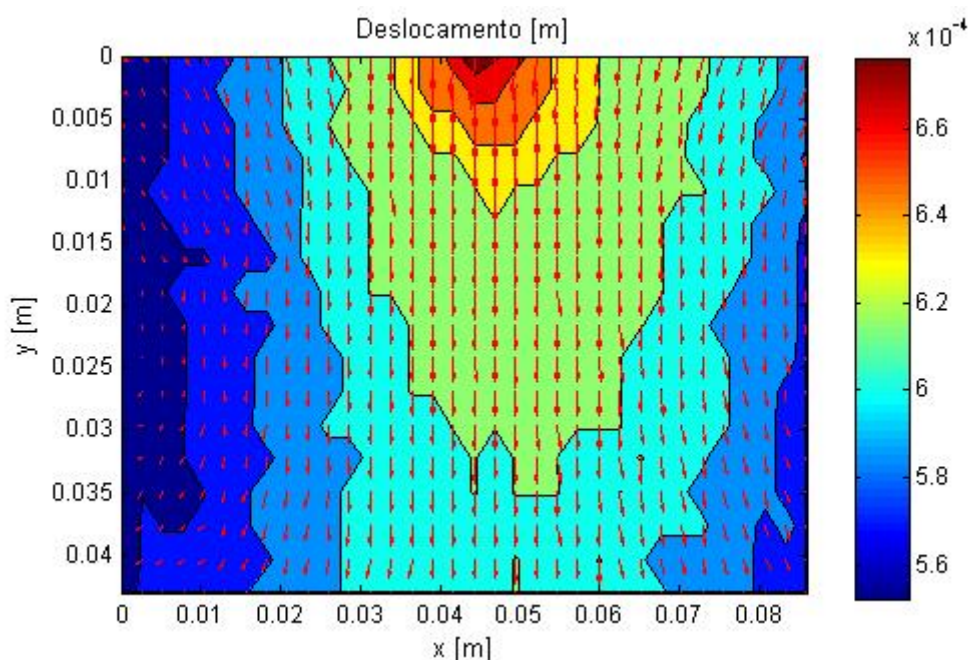


Figura 6.69 Campo de deslocamentos determinado medido com correlação de imagem, em representação: vectorial e mapa de cores.

Da análise da Figura 6.69 pode verificar-se que o deslocamento máximo ocorre, na região da aplicação da carga e que este valor vai diminuindo à medida que se afasta dessa região, outra constatação que se pode verificar é a ocorrência duma simetria do campo de deslocamentos relativamente a um eixo vertical e que passa pelo ponto de aplicação da carga.

Para a simulação numérica do ensaio de flexão estático de madeiras no programa ANSYS® foi criado um modelo tridimensional do provete com as dimensões e geometria idênticas às do ensaio experimental e foi gerada a respectiva malha. Foram utilizadas nessa modelação as propriedades de madeira de pinho, indicadas na bibliografia [33, 34]. Obviamente que estes valores não representam rigorosamente os verdadeiros valores para a madeira utilizada. Como é sabido as propriedades mecânicas da madeira dependem de vários parâmetros tais como: tipos de madeira, origem, humidade, temperatura, etc. As propriedades da madeira utilizadas na simulação numérica estão indicadas na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 Propriedades mecânicas da madeira de *Pinus Pinaster*.

E_x [GPa]	E_y [GPa]	E_z [GPa]	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy} [MPa]	G_{yz} [MPa]	G_{xz} [MPa]
15.133	1.912	1.010	0.471	0.586	0.051	1.115	0.171	1.041

O madeira é um material com propriedades ortotrópicas, como tal foi gerada uma malha com 2448 elementos designados por SOLID64. Este tipo de elemento foi especialmente desenvolvido para a modelação tridimensional de estruturas ou elementos anisotrópicos e consiste num elemento sólido com 8 nós e três graus de liberdade por cada nó. Após a geração da malha foram definidas as condições de fronteira em que está incluído o carregamento (100

N). Na Figura 6.70 representa-se o modelo criado com a respectiva malha e condições de fronteira.

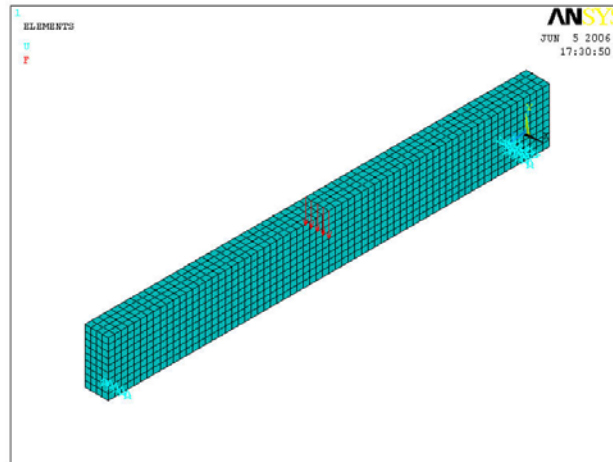


Figura 6.70 Malha de elementos finitos do modelo utilizado na simulação numérica e as respectivas condições de fronteira.

A zona de análise concentrou-se na zona central do provete, correspondente à região que foi analisada experimentalmente (próxima do ponto da aplicação da carga). O resultado obtido pela simulação numérica para o campo de deslocamentos, na direcção vertical, está apresentado na Figura 6.71.

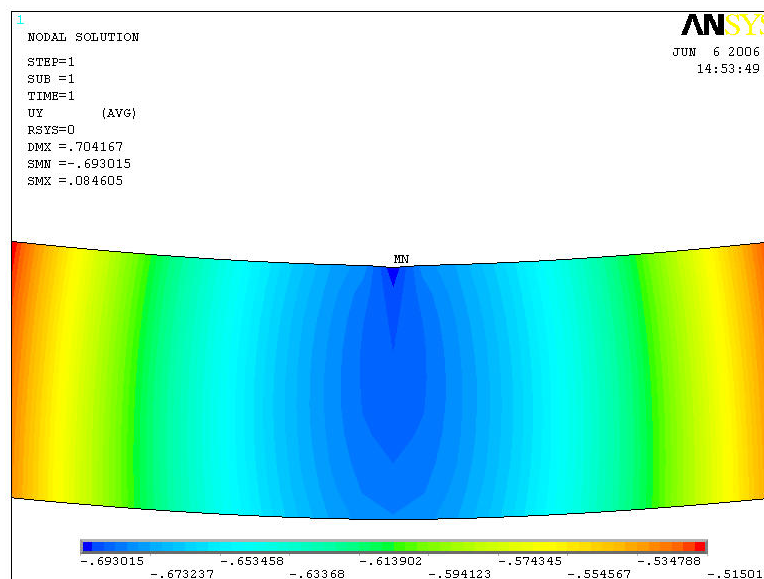


Figura 6.71 Campos de deslocamentos obtidos por simulação numérica na direcção vertical, unidades em milímetros.

Comparando os resultados experimentais com os determinados com MEF, pode verificar-se os campos de deslocamentos têm um comportamento bastante parecido e os valores dos deslocamentos estão relativamente próximos. Apesar de não haver um conhecimento muito preciso das propriedades mecânicas da madeira ensaiada, verificou-se que a diferença entre os resultados experimentais, utilizando a técnica de correlação de imagem, e os numéricos, em que usaram-se valores médios característicos da madeira de pinho (*Pinus Pinaster*), não é

muito elevada. Assim, pode concluir-se que o método experimental de correlação de imagem pode ser utilizado, no estudo do campo de deslocamentos em ensaios de flexão de madeira.

Por último pode concluir-se que a máxima resolução obtida com esta técnica é ainda inferior, em cerca de uma ordem de grandeza, à necessária à caracterização das tensões residuais. O reduzido custo dos equipamentos necessários e as potencialidades já conhecidas justificam plenamente que se continue a investigação nesta técnica, principalmente para a medição de deslocamentos no plano.

Referências:

- [1] *Metals Handbook – Properties and selection: nonferrous alloys and pure metals*, Vol. 2, Ninth Edition, American Society for Metals, Ohio, 1979.
- [2] Ribeiro, J., Vaz, M., Piloto, P., *Medição de Campos de Tensão Recorrendo à Técnica de Moiré*, Congresso de Métodos Computacionais em Engenharia, nos Proc., Lisboa, 2004.
- [3] Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L., *The finite element method*, McGraw Hill, Vol. I, 1989.
- [4] ANSYS – *Theory Reference*, Release 5.6, Edited by Peter Kohnke, 1999.
- [5] Ferreira, F., *Análise do Comportamento Dinâmico de Componentes Estruturais Sob Solicitações Generalizadas*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2003.
- [6] Ribeiro, J., Vaz, M. e Piloto, P., *Medição de Campos de Tensões Residuais – Estudo Preliminar*, Proc., VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional, Universidade de Évora, 14 – 16 Abril, 2003.
- [7] Lopes, H., *Desenvolvimento de Técnicas Interferométricas Contínuas e Pulsadas Aplicadas à Análise de Dano em Estruturas Compósitas*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, a decorrer.
- [8] Ribeiro, J., Vaz, M., Piloto, P. e Monteiro, J., *Técnicas de Medição de Tensões Residuais*, VI Encontro Nacional da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET), nos Proc., Ponta Delgada, 2005.
- [9] Post, D., Han, B., Ifju, P., *High Sensitivity Moiré – Experimental Analysis for Mechanics and Materials*, Edited Springer-Verlag, New York, 1994, pg. 154-155.
- [10] NP EN 10002-1, *Materiais Metálicos – Ensaio de Tracção. Parte I: Método de Ensaio à Temperatura Ambiente*, Elaborado por CT12, IPQ, 1990.
- [11] *Smithells Light Metals Handbook*, edited by E. A. Brandes & G. B. Brook, Oxford, 1998.
- [12] ASTM E399-90, *Standard Test Method for Plain-Strain Fracture of Metallic Materials*, Annual book of ASTM Standards, 1992.
- [13] Ribeiro, J., Lopes, H., Vaz, M., Piloto, P., *Técnicas de medição de deslocamentos no plano*, VI Encontro Nacional da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET), Proc., Açores, 2005.
- [14] Creath, K., Schmit, J., *N-point Spatial Phase-measurement Techniques for Non-destructive Testing*, Optics and Lasers in Engineering, 24, 1996, pg. 365-379.
- [15] Esteves, J. S., *Joint Design: Programme D'Aide a la Conception des Assemblages Colles Utilisant les Elements Finis Mistes D'Interface*, Tese de Doutoramento, Universidade de Bourgogne, França, 1995.
- [16] Lees, W. A., *Adhesives in Engineering Design*, The Design Council London, 1984, p. vii.
- [17] Ribeiro, J. E., *Estudo do Campo de Tensões em Ligações Adesivas Estruturais*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Área de Especialização de Materiais e Processos de Fabrico, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1998.
- [18] Ribeiro, J., Esteves, J., *Photoelastic Analysis of the Stress Field on Structural Adhesives Joints*, International Conference Integrity – Reliability – Failure, Porto, 12-22 of July 1999.

- [19] Ribeiro, J. E., Esteves, J. L., *Caracterização da concentração de tensões em juntas adesivas de simples sobreposição, utilizando técnicas de multiplicação de franjas em fotoelasticidade*, Revista Mecânica Experimental, Dezembro 1999.
- [20] Goland, M., Reissner, E., *The Stresses in Cemented Joints*, J. Appl. Mech., Tans. ASME, Vol. 11, 1944, pg. A17-A27.
- [21] Standardised Project for Optical Techniques of Strain Measurement (SPOTS), EU contract no. G6RD-CT-2002-00856, consultar www.opticalstrain.org.
- [22] Claesson, J., Bohlooli, B., *Brazilian test: stress field and tensile strength of anisotropic rocks using an analytical solution*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39, 2002, pg. 991-1004.
- [23] Kujawinska, M., Salbut, L., Olszak, A., Forno, C., *Automatic analysis of residual stresses in rails using grating interferometry*, Recent Advances in Experimental Mechanics, Silva Gomes et al. (eds), 1994, Rotterdam, pg. 699-704.
- [24] Carré, P., *Installation et utilization du comparateur photoelectrique et interferenciel du Bureau International des Poids e Mesures*, Metrologia, 2, 1966, pg. 13-23.
- [25] Chousal, J., *Técnicas de processamento de imagens obtidas por métodos ópticos em análise experimental de tensões*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999, Porto.
- [26] Takeda, M., H. Ina, and S. Kobayashi, *Fourier-Transform Method of Fringe-Pattern Analysis for Computer-Based Topography and Interferometry*. Journal of the Optical Society of America, 1982. 72(1), pg. 156-160.
- [27] Ghiglia, D.C. and M.D. Pritt, *Two-dimensional phase unwrapping : theory, algorithms, and software*. 1998, New York: Wiley. xiv, pg. 493.
- [28] Kujawinska, M., Wójciak, J., *High Accuracy Fourier Transform Fringe Pattern Analysis*, Optics and Lasers in Engineering, 14, 1991, 325-339.
- [29] Awaji, H., Sato, S., *Diametral Compressive Testing Method*, J. Eng. Mat. Tech., Vol. 101, 1979, pg. 139.
- [30] South, J., *Mechanical Properties and Durability of Natural Rubber Compounds and Composites*, PhD Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2001.
- [31] NP-619, *Madeiras – Ensaio de flexão estática*, Norma Portuguesa, IPGAI – Repartição de Normalização, 1973.
- [32] Simões, J., *Estudo da componente femoral de uma prótese de anca de rigidez controlada*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1998.
- [33] Forest Products Laboratory, *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113, U.S. Department of Agriculture, Madison, 1999.
- [34] Pereira, J., *Comportamento mecânico da madeira em tracção nas direcções de simetria do material*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2003.

CAPÍTULO 7

MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

CAPÍTULO 7

7 MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

Neste capítulo faz-se a medição experimental de tensões residuais em provetes, utilizando uma técnica semi-destrutiva. Nestas medições o método clássico do furo para libertação de tensões é utilizado em combinação com a extensometria eléctrica, o Moiré interferométrico e o ESPI no plano. Os métodos referidos foram descritos em capítulos anteriores, com especial relevância para o método de Moiré interferométrico que foi desenvolvido ao longo deste trabalho. Este método encontra-se extensamente descrito e validado no capítulo 6.

7.1 Determinação dos coeficientes de calibração

A determinação do valor das tensões residuais a partir dos valores de relaxamento de deformações medidos, quer utilizando os extensómetros numa roseta quer utilizando técnicas ópticas requer o conhecimento prévio dos coeficientes de calibração para um determinado diâmetro de furo e, no caso do furo cego, a correspondente profundidade deste. Estes coeficientes definem a sensibilidade da técnica do furo. A determinação dos coeficientes de calibração pode ser obtida por três métodos: analítico, experimental e numérico.

No método analítico são utilizadas expressões baseadas na solução de Kirsch e que estão descritas no capítulo 4. Sendo as expressões para cálculo dos coeficientes de calibração A e B as seguintes:

$$\begin{cases} A = -\frac{1+\nu}{2E} \rho^2 \\ B = -\frac{1+\nu}{2E} \left[\left(\frac{4}{1+\nu} \right) \rho^2 - 3\rho^4 \right] \end{cases} \quad (7.1)$$

Onde, E é o módulo de elasticidade e ν é o coeficiente de Poisson;

$\rho = r_0/r$; sendo r_0 o raio do furo e r a coordenada radial.

No caso específico das medições em que são utilizados extensómetros é necessário integrar os coeficientes de calibração ao longo da área de medida. Assim, integrando A e B ao longo duma área finita, área do extensómetro, obtêm-se os parâmetros \bar{A} e \bar{B} , de acordo com as expressões:

$$\bar{A} = -\frac{(1+\nu)r_a^2}{E(R_2 - R_1)W} (\Psi_1 - \Psi_2) \quad (7.2)$$

$$\bar{B} = -\frac{(1+\nu)r_a^2}{E(R_2 - R_1)W} \left[\frac{2(1-\nu)}{1+\nu}(\Psi_1 - \Psi_2) + \sin 2\Psi_1 - \sin 2\Psi_2 - \frac{1}{8} \left(\frac{r_a}{R_1} \right)^2 (2 \sin 2\Psi_1 + \sin 4\Psi_1) + \frac{1}{8} \left(\frac{r_a}{R_2} \right)^2 (2 \sin 2\Psi_2 + \sin 4\Psi_2) \right] \quad (7.3)$$

\bar{A} e \bar{B} passam a ser os coeficientes de calibração do método do furo para deformações numa área finita. Nestas expressões R_1 e R_2 correspondem aos extremos da grelha do extensómetro, r_a é o raio do furo, W é a largura da grelha do extensómetro e, por último, ψ_1 e ψ_2 representam os ângulos dos cantos da grelha do extensómetro. Na Figura 7.1 estão indicadas os parâmetros geométricos da grelha de cada um dos extensómetros que integram a roseta.

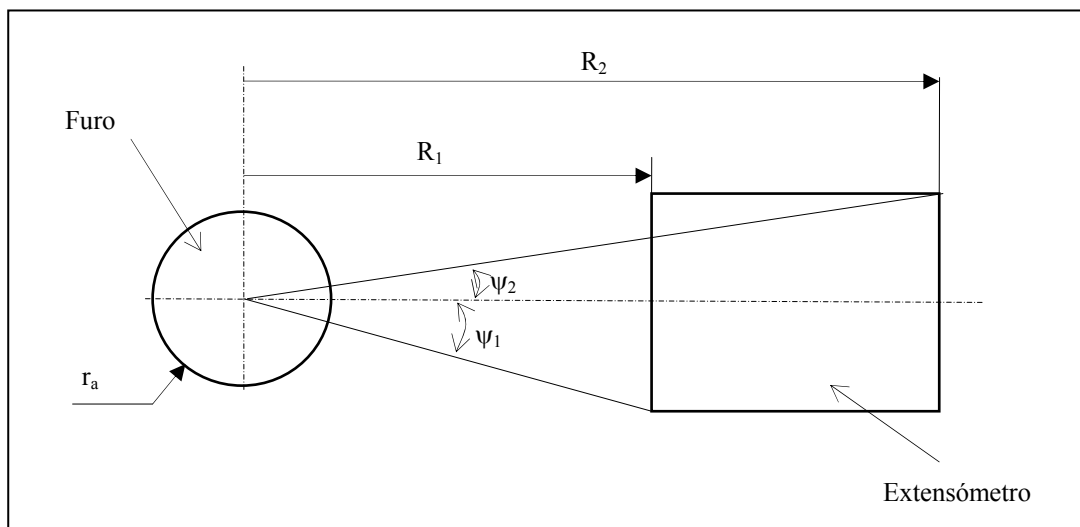


Figura 7.1 Parâmetros geométricos da grelha de um extensómetro, [1].

Contudo, este método está limitado ao caso de peças de espessura fina (por exemplo placas finas), com tensões uniformes ao longo da mesma e são utilizados furos passantes para a medição das tensões residuais.

Quando há a necessidade de medir tensões residuais em peças ou estruturas espessas (espessura $\geq 1.2D$) é necessário recorrer aos métodos numéricos ou experimentais. Neste trabalho desenvolveram-se as duas metodologias para a determinação dos coeficientes de calibração

A forma tradicional para a determinação de \bar{A} e \bar{B} é a calibração experimental, usando provetes com o mesmo tipo de material da peça ou estrutura na qual se vai fazer a medição e rosetas de extensómetros do mesmo tipo das utilizadas nos referidos ensaios. As constantes de calibração podem ser determinadas externamente aplicando tensões conhecidas no provete. Este procedimento é conceptualmente simples e dependente das propriedades do material e da geometria da roseta de extensómetros. Teoricamente é o método mais preciso para a obtenção dos coeficientes de calibração. Contudo, é um processo muito demorado e direccionado: é necessário um ensaio para cada material e geometria de rosetas de extensómetros. O método experimental está descrito no anexo G e como pode verificar-se os valores determinados são muito precisos, estando muito próximos dos valores indicados pela bibliografia especializada.

Para a determinação numérica dos coeficientes de calibração a utilizar no método do furo, no caso dum estado de tensões residuais não uniforme em profundidade, criou-se um modelo de elementos finitos tridimensional. Este modelo foi desenvolvido recorrendo a elementos cúbicos, homogêneos e isotrópicos. Utilizou-se o programa de elementos finitos ANSYS®. Desenvolveu-se um modelo tridimensional, utilizando 6625 elementos cúbicos isoparamétricos de 8 nós com a designação de SOLID185, conforme está indicado na Figura 7.2 [2].

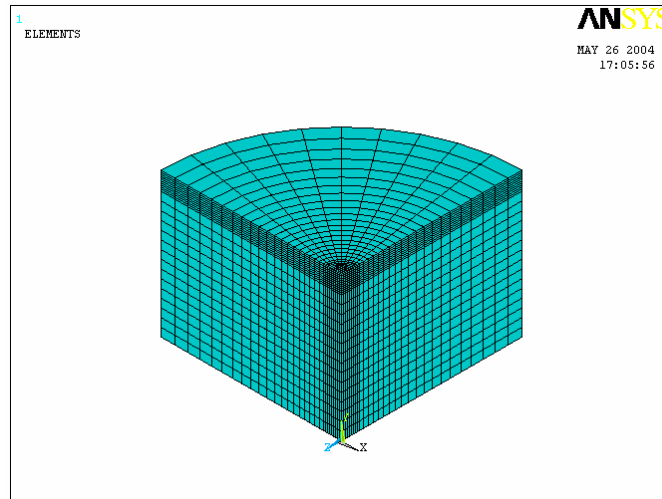


Figura 7.2 Malha de elementos finitos utilizada.

A simulação do furo cego incremental foi elaborada considerando que por cada incremento os elementos pertencentes ao furo tinham módulo de elasticidade nulo, o programa ANSYS® tem uma função que permite recorrer a este procedimento, “kill elements”. A grande vantagem desta função é a de permitir voltar sempre ao início ou a incrementos anteriores recorrendo à função “birth elements”, que restitui o valor do módulo de elasticidade definido inicialmente para o material. Os parâmetros utilizados nesta análise foram:

σ [MPa]	E [MPa]	ν	r_0 [mm]	h [mm]
100	7.0×10^4	0.3	1.0	0.1

Onde σ é tensão residual arbitrada, E é módulo de elasticidade do material, ν é coeficiente de Poisson do material, r_0 é raio do furo e h é profundidade de cada etapa de furação.

Para o caso geral é necessário considerar dois tipos de campos de tensões residuais:

- Equibiaxiais: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma$, $\tau_{xy} = 0$, cuja tensão correspondente num sistema de coordenadas cilíndricas é: $\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \sigma$, $\tau_{r\theta} = 0$. A condição da furação é equivalente a uma pressão uniforme que actua sobre a nova superfície do furo. Ela está representada na parte esquerda da Figura 7.3 (a).
- De corte puro: $\sigma_{xx} = -\sigma_{yy} = \sigma$, $\tau_{xy} = 0$, cuja tensão correspondente num sistema de coordenadas cilíndricas é: $\sigma_{rr} = \sigma \cos 2\theta$, $\sigma_{\theta\theta} = -\sigma \cos 2\theta$, $\tau_{r\theta} = -\sigma \sin 2\theta$, e é equivalente a uma distribuição harmónica de tensões normais $\sigma_{rr} = -\sigma \cos 2\theta$ e a uma

tensão de corte $\tau_{r\theta} = \sigma \sin 2\theta$ que actuam sobre o bordo do furo. Elas estão representadas na parte direita da Figura 7.3 (b).

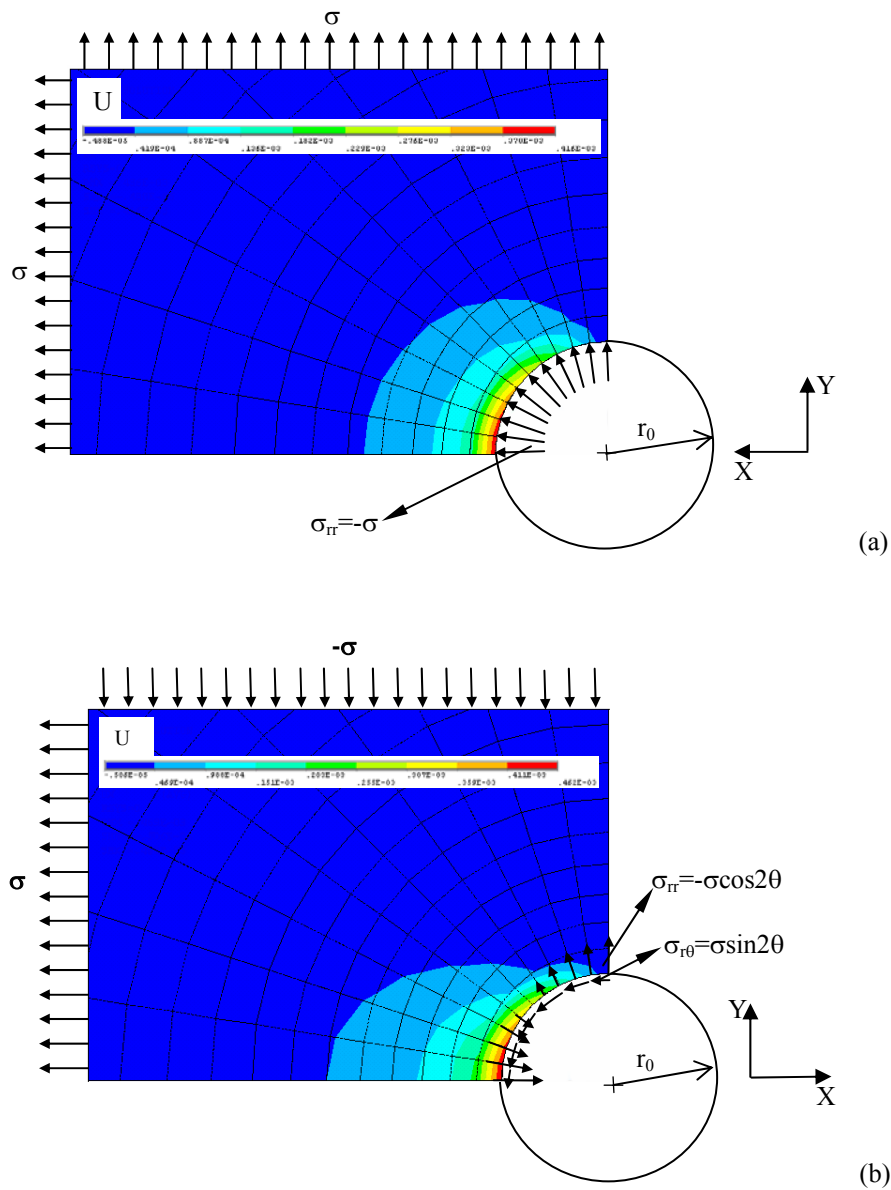


Figura 7.3 Modelo de elementos finitos tridimensionais para a determinação dos coeficientes de calibração: (a) tensões equibiaxiais - $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma$, $\tau_{xy} = 0$; (b) tensões de corte puro - $\sigma_{xx} = -\sigma_{yy} = \sigma$, $\tau_{xy} = 0$.

Relativamente às condições de fronteira, considera-se que nas faces laterais estão aplicadas as condições de simetria enquanto que a superior e inferior estão livres.

Na Figura 7.4 estão representados os campos de deslocamentos provocados pelos campos de tensões referidos, para o primeiro incremento.

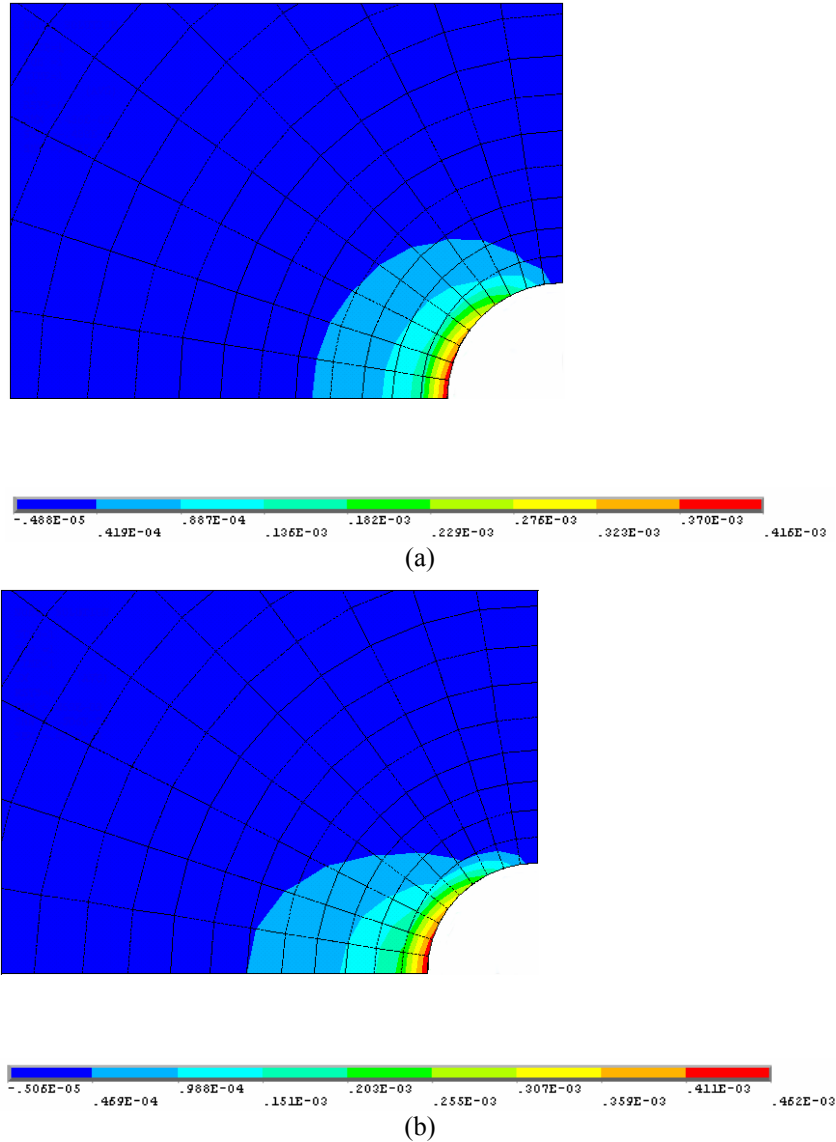


Figura 7.4 Campo de deslocamentos, segundo a direcção X, para o primeiro incremento: (a) provocado pela tensão equibiaxial, (b) provocado pela tensão de corte.

Na análise de elementos finitos para a determinação dos coeficientes de calibração para a medição de tensões residuais não uniformes em profundidade, recorrendo ao método integral, utilizou-se a seguinte simbologia: A^{ij} , B^{ij} , C^{ij} ; F^{ij} , G^{ij} . A partir destes valores podem determinar-se os coeficientes de calibração adimensionalizados: a^{ij} , b^{ij} , c^{ij} , f^{ij} , g^{ij} .

Para calcular os coeficientes de calibração a partir dos campos de deslocamento utilizaram-se as expressões indicadas no capítulo 4. Como para os casos estudados é necessário, no máximo, dos coeficientes A, B e C são eles que serão determinados.

$$A^{ij} \left(E, \nu, r_0, r, \frac{h}{d_0} \right) = \frac{u_r^{ij}(r, \theta)}{2\sigma}$$

$$B^{ij} \left(E, \nu, r_0, r, \frac{h}{d_0} \right) = \frac{u_r^{ij}(r, \theta)}{2\sigma \cos 2\theta}$$

$$C^{ij} \left(E, \nu, r_0, r, \frac{h}{d_0} \right) = \frac{u_{\theta}^{ij}(r, \theta)}{2\sigma \sin 2\theta}$$

Os valores adimensionalizados são calculados pelas seguintes expressões:

$$a^{ij} = \frac{EA^{ij}}{r_0(1+\nu)} \qquad b^{ij} = \frac{EB^{ij}}{r_0} \qquad c^{ij} = \frac{EC^{ij}}{r_0}$$

São em seguida apresentados os valores dos coeficientes de calibração A e B, mais utilizados neste trabalho, que foram determinados numericamente usando o modelo de elementos finitos já descrito. No exemplo apresentado, os coeficientes de calibração são determinados para um ponto que fica situado a uma distância $1.2r_0$ do centro do furo e na direcção do eixo 1 das figuras seguintes.

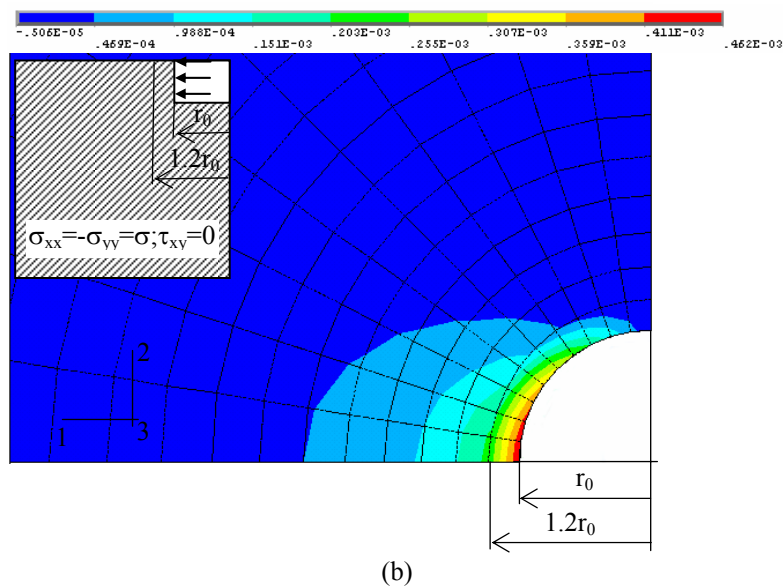
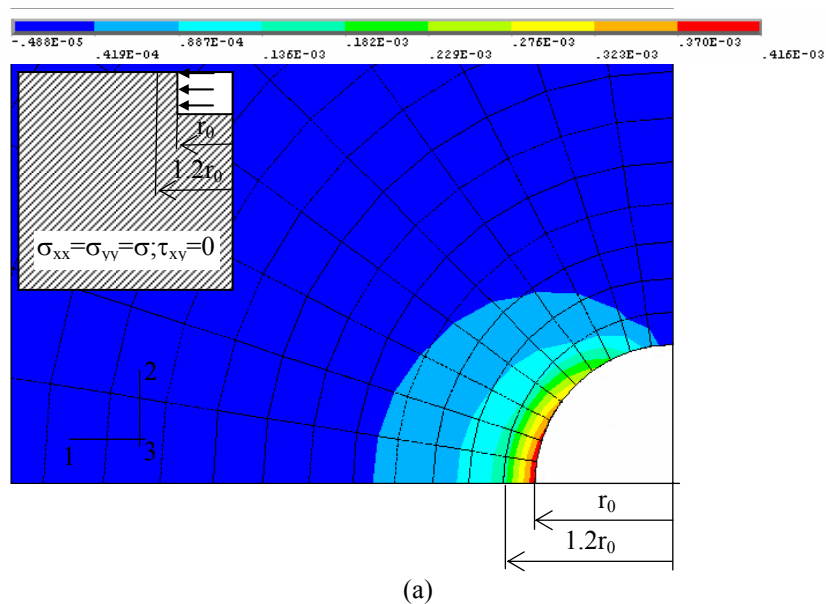
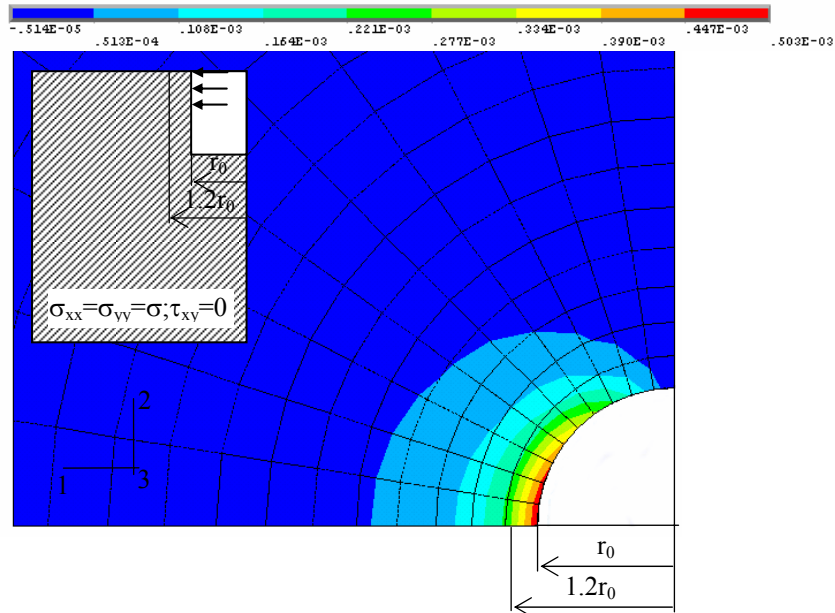


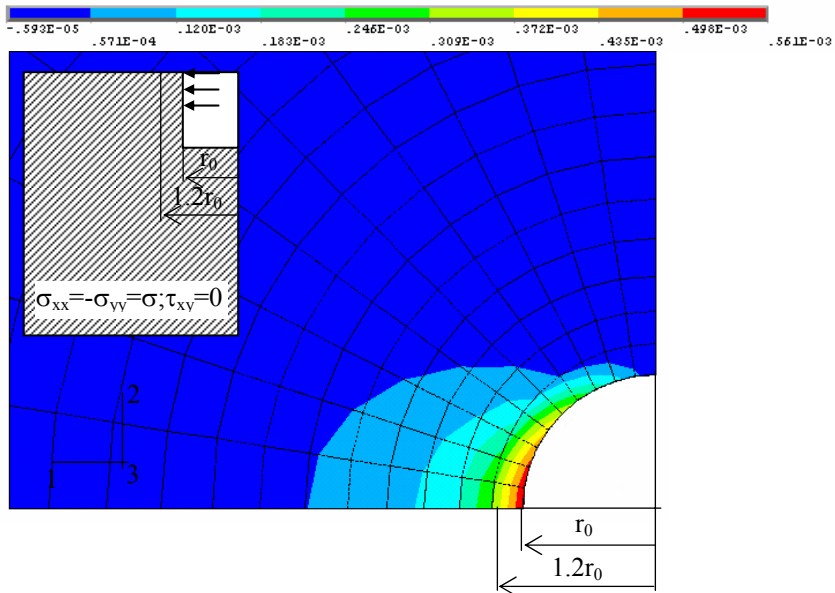
Figura 7.5 Campo de deslocamentos u_x , quando é aplicada uma pressão uniforme sobre a primeira camada incremental: (a) provocado pela tensão equibiaxial, (b) provocado pela tensão de corte.

A partir do resultado obtido numericamente para os campos de deslocamentos segundo a direcção 1 podem determinar-se os coeficientes de calibração para o ponto pretendido.

A^{11}	B^{11}	a^{11}	b^{11}
0.98×10^{-6}	0.13×10^{-5}	0.053	0.090



(a)



(b)

Figura 7.6 Campo de deslocamentos u_x , quando é aplicada uma pressão uniforme sobre a primeira camada incremental após a segunda camada ter sido furada: (a) provocado pela tensão equibiaxial, (b) provocado pela tensão de corte.

Os coeficientes de calibração para o ponto pretendido seriam:

A^{21}	B^{21}	a^{21}	b^{21}
0.13×10^{-5}	0.17×10^{-5}	0.060	0.102

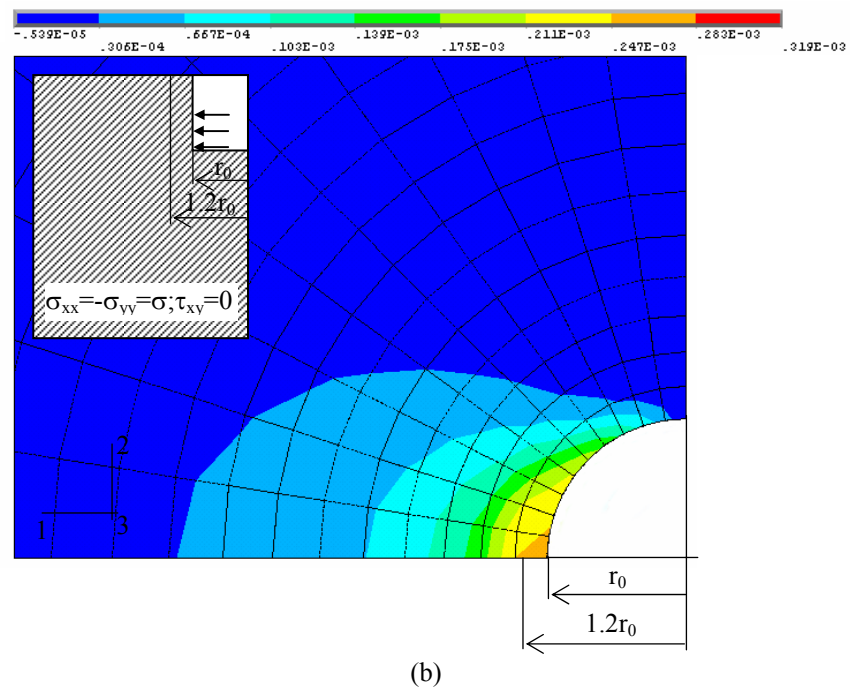
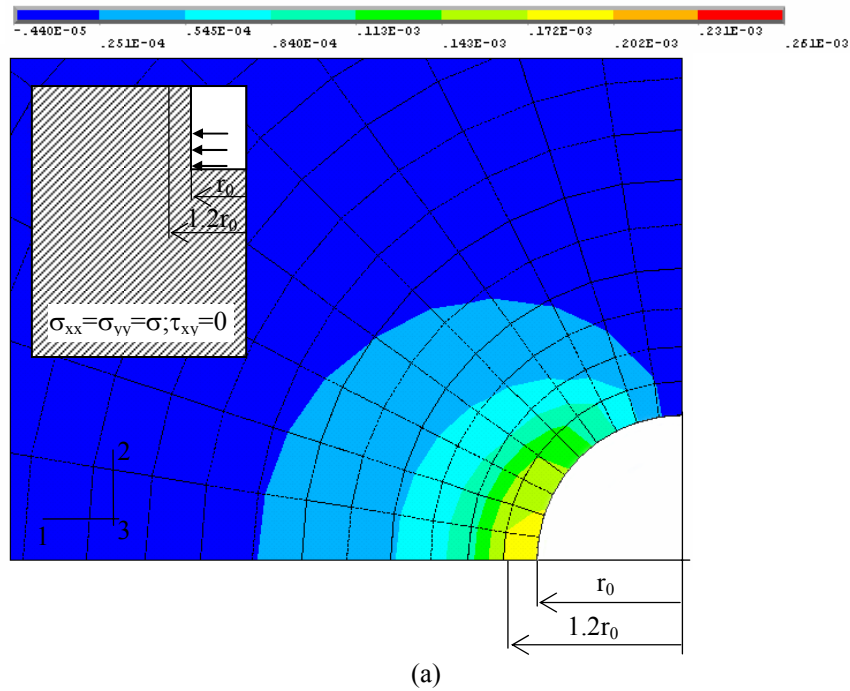


Figura 7.7 Campo de deslocamentos u_x , quando é aplicada uma pressão uniforme sobre a segunda camada incremental após ter sido furada: (a) provocado pela tensão equibiaxial, (b) provocado pela tensão de corte.

Então, os coeficientes de calibração seriam:

A^{22}	B^{22}	a^{22}	b^{22}
0.88×10^{-6}	0.12×10^{-5}	0.041	0.072

É importante notar que $A^{21} > A^{11}$, $B^{21} > B^{11}$ e que $A^{21} > A^{22}$, $B^{21} > B^{22}$, onde o primeiro e o segundo expoente referem, respectivamente, a etapa incremental e o número da camada sobre a qual é aplicada a pressão. Esta análise indica claramente que as tensões residuais não uniformes deverão ser determinadas por um método incremental. Uma conclusão similar foi tirada por Schager para o método do furo com extensometria [3].

O modelo desenvolvido também permite a determinação dos parâmetros de calibração para a aplicação da técnica do furo a casos de tensões residuais uniformes em profundidade, neste caso consideram-se os valores dos parâmetros de calibração A e B , para cada incremento, isto é, os correspondentes aos valores de A^{ij} e B^{ij} , em que $i = j$, isto é A^{11} , A^{22} , ... e B^{11} , B^{22} , ... É também possível, determinar os valores dos parâmetros de calibração médios utilizados na extensometria. Neste caso ter-se-ia que integrar o campo de deslocamentos ao longo da área do extensómetro.

7.2 Medição de tensões residuais num provete de calibração

No sentido de verificar o rigor da metodologia anteriormente apresentada foi realizado um conjunto de medições sobre um provete de calibração. Optou-se pela medição das tensões residuais provocadas pela montagem com interferência dum disco no interior num anel. Para a construção do provete foi seleccionada uma liga de alumínio (1050). Este tipo de provete apresenta uma solução analítica para a determinação das tensões residuais e a distribuição das tensões que é relativamente simples: as tensões são constantes no disco e no anel, variando em função da posição radial do ponto de medida. Em profundidade são uniformes. Em segundo lugar este provete aparece com muita frequência na literatura utilizado para avaliação de técnicas de medição de tensões residuais [4]. Deve ainda salientar-se que este tipo de provete se encontra sujeito a um campo biaxial de tensões o que permite a medição em duas direcções. No anel, próximo da interface, σ_{θ} é positivo e σ_r é negativo. Na proximidade do bordo exterior do anel o estado de tensão é praticamente uniaxial, uma vez que σ_r tende para zero. No disco o estado de tensão é equi-biaxial, $\sigma_{\theta} = \sigma_r$. Como tal, com um único provete é possível demonstrar a capacidade das técnicas em análise para medir nos três estados de tensão.

O provete utilizado era constituído por um anel com um diâmetro nominal externo de 100 mm e interno de 50 mm. O disco tinha um diâmetro nominal de 50 mm. Os dois elementos (anel/disco) tinham uma interferência de aproximadamente 0.045 mm (correspondente à média de cinco medições feitas com micrómetro nos dois elementos). Ambos os componentes tinham uma espessura de 13 mm.



Figura 7.8 Elementos do provete de calibração anel/disco

Antes se proceder à montagem dos dois elementos foram colados dois extensómetros no anel segundo as direcções tangencial e radial. O centro dos extensómetros ficou a uma distância radial do centro de 30 mm, ver Figura 7.9.

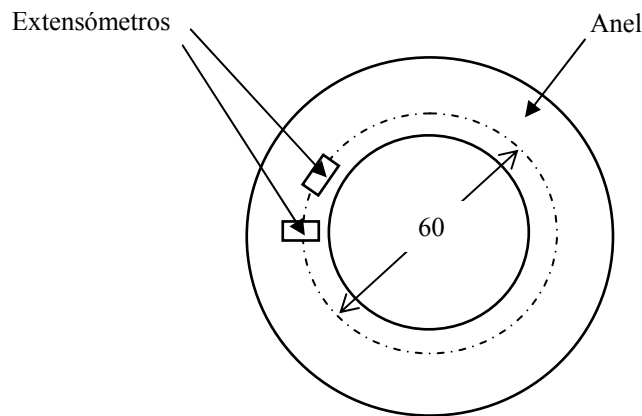


Figura 7.9 Representação esquemática da montagem dos extensómetros no disco.

Após a colagem, ligação e verificação eléctrica dos extensómetros, apresentado na Figura 7.10, fez-se a montagem com interferência do disco no interior de anel.



Figura 7.10 Verificação dos extensómetros.

Para efectuar a montagem, o disco foi arrefecido mergulhando-o em azoto líquido (-196°C) e o anel aquecido até uma temperatura de cerca de 40°C . O disco contraiu cerca de 0.2 mm o que permitiu que entrasse com folga no interior do anel, tal como se pode ver na Figura 7.11. Durante o processo de aquecimento até à temperatura ambiente o disco interior dilatou enquanto o anel ao arrefecer contraiu e desta forma se obteve uma montagem com uma forte interferência. Os extensómetros colados no anel registaram a deformação ocorrida e permitiram determinar o estado de tensão médio na área de cada um deles. Estes valores foram comparados com os valores determinados numericamente tendo sido constatada uma

boa aproximação. Foi assim validada a simulação numérica que será utilizada posteriormente no cálculo das tensões residuais.

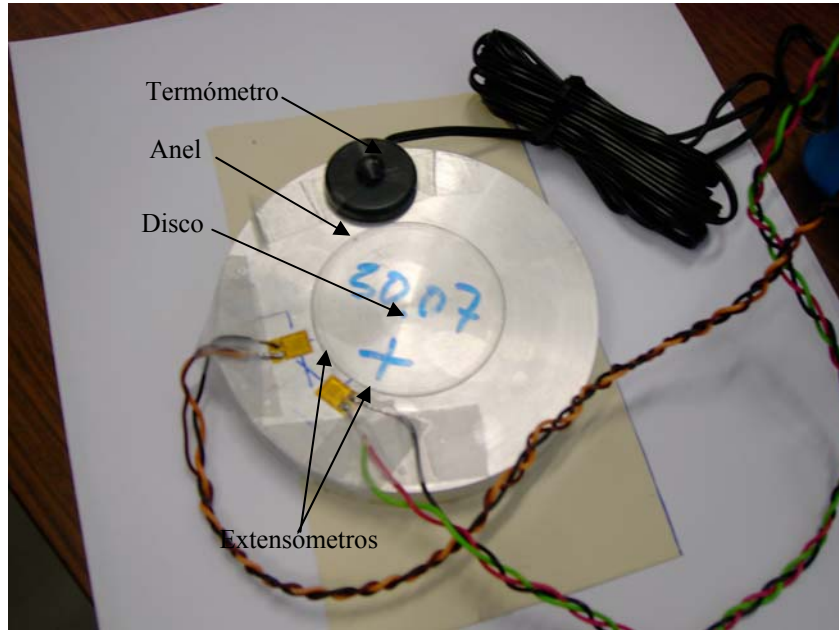


Figura 7.11 Montagem por interferência do disco no interior do anel.

O estado de tensão no anel e no disco pode ser facilmente calculado a partir da determinação da pressão de contacto entre o anel e o disco [5],

$$p = \frac{E\delta}{2R_i} \frac{(R_0^2 - R_i^2)}{R_0^2} \quad (7.4)$$

Onde p é a pressão (com valor positivo), E é módulo de elasticidade, δ é a interferência entre o anel e o disco, R_0 é o raio exterior do anel, R_i é o raio interior do anel e o exterior do disco. No disco a tensão é igual ao valor da pressão na direcção radial e tangencial. No anel a variação da tensão é dada por:

$$\sigma_r = \frac{pR_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \left(1 - \frac{R_0^2}{r^2} \right) \quad (7.5)$$

$$\sigma_\theta = \frac{pR_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \left(1 + \frac{R_0^2}{r^2} \right)$$

No caso estudado, considerando os valores anteriormente definidos, determinou-se o seguinte valor para a pressão de contacto:

$$p = \frac{70000 \times 0.045}{2 \times 25} \frac{50^2 - 25^2}{50^2} = 47.3 \text{ MPa}$$

A partir da leitura dos extensómetros pôde determinar-se o valor médio das tensões σ_r e σ_θ na secção da grelha dos extensómetros, esses valores estão indicados na tabela seguinte

σ_r [MPa]	σ_θ [MPa]
49.9	-30.3

Estes valores estão próximos dos valores teóricos para a posição do centro dos extensómetros indicada na Figura 7.9.

Após a preparação do provete e a verificação do seu estado de tensão foi realizado um conjunto de medições de tensões residuais utilizando o método do furo associado às técnicas de ESPI no plano e Moiré interferométrico.

7.2.1 Medição de tensões residuais com ESPI no plano

O algoritmo para o cálculo das tensões foi baseado no trabalho de Nelson [6] e adaptado às medições com ESPI. Nestas medições foram adquiridos conjuntos de interferogramas (quatro), com os quais se obteve o mapa de fase da superfície total. De seguida foi executado um pequeno furo perpendicularmente à superfície do provete e com uma determinada profundidade. Após a remoção do sistema de furação, foram adquiridos mais conjuntos de quatro interferogramas. A diferença entre os mapas de fase obtidos para os diferentes conjuntos de interferogramas permite determinar o campo de deslocamentos na superfície do provete causado pelo relaxamento de tensões. A relação entre o campo de deslocamentos e as tensões residuais libertadas que lhe deram origem estão relacionados pela seguinte equação:

$$u_r^k = \begin{bmatrix} A + B \cos 2\theta_k \\ A - B \cos 2\theta_k \\ 2B \sin 2\theta_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

$$u_\theta^k = \begin{bmatrix} C \sin 2\theta_k \\ -C \sin 2\theta_k \\ 2C \cos 2\theta_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

Em que u_r^k e u_θ^k são, respectivamente, os deslocamentos radial e tangencial; $k = 1, 2, 3$, k corresponde ao número de pontos de medição; A , B e C são os coeficientes de calibração; θ_k é coordenada cilíndrica do ponto de medida, σ_{xx} , σ_{yy} e τ_{xy} são as componentes da tensão em coordenadas cartesianas.

Para poder efectuar a medição das tensões residuais utilizando a técnica de ESPI no plano foi necessário elaborar uma montagem óptica baseada nos princípios descritos no capítulo 3. Esta montagem é composta por um laser, modelo Verdi da Coherent (LA) emitindo nos 532 nm, um divisor de feixe ou *beam splitter* (BS), dois espelhos (E_1 e E_2), um deles fixo num actuador piezoeléctrico (PZT), duas lentes (L) para ajustar o feixe de iluminação, uma lente de imagem, um CCD, uma unidade de controlo (UC) e um computador (PC) que guarda e trata as imagens. Na figura 7.12 está representada esquematicamente a montagem óptica descrita.

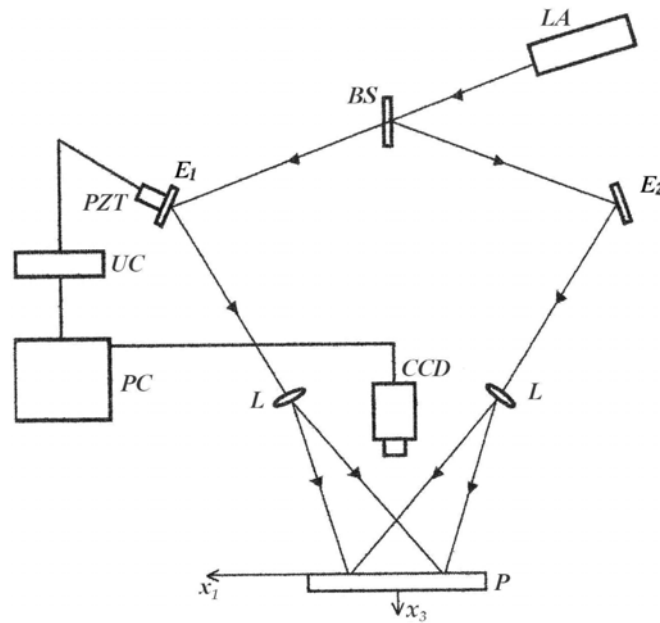


Figura 7.12 Montagem óptica de ESPI para medição do campo de deslocamentos no plano [7].

Em frente à região de interferência dos dois feixes provenientes das lentes foi colocado o provete. Este deve ficar sempre bem fixo, para evitar qualquer tipo de deslocamento de corpo rígido durante o ensaio. Estes deslocamentos podem provocar, para além de erros na medição, a des correlação de *speckle*. Em frente ao provete é colocado o sistema de furação. Na figura 7.13 pode ver-se a montagem do sistema completo.

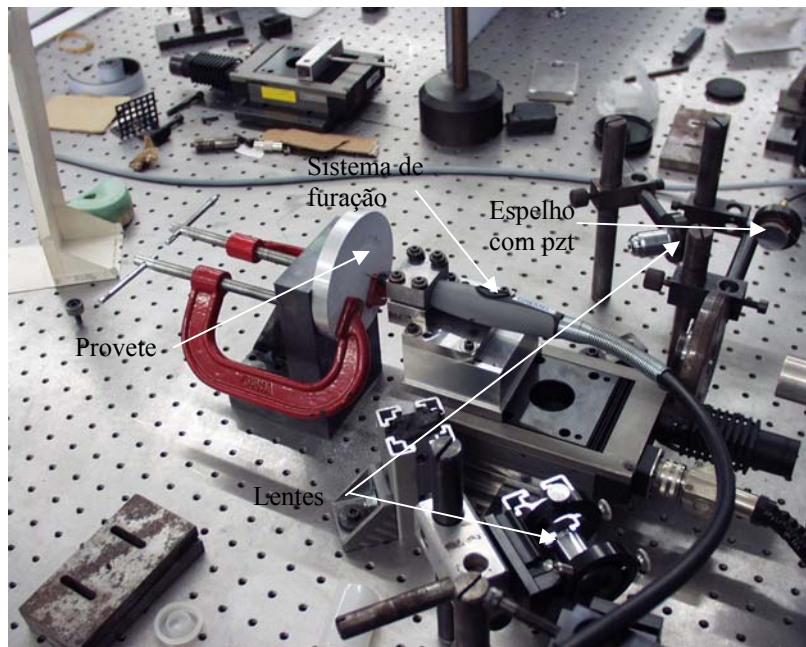


Figura 7.13 Sistema de ESPI no plano para medição de tensões residuais.

O feixe luminoso emitido pelo laser é dividido em dois pelo divisor de feixe. Ambos os feixes são reflectidos pelos espelhos, segundo um determinado ângulo, igual para os dois espelhos. Um dos espelhos está fixo num actuador piezoelétrico para realizar o *phase shift*, neste caso três vezes em cada medição. São envolvidas quatro imagens para a obtenção dos mapas de fase

como descrito no capítulo 4. Os dois feixes interferem mutuamente pelo que um deles é a referência do outro. As imagens destes padrões de interferência são captadas por um CCD e guardadas para posterior processamento.

Numa primeira fase foram captadas quatro imagens antes da furação (referência) e numa segunda fase foram captadas mais quatro imagens após a furação (deformada), após ocorrer a relaxação das tensões. A partir das quatro imagens de cada estado foram obtidos dois mapas de fase distintos. O mapa de fase de referência foi depois subtraído da deformada, obtendo-se, desta forma, o mapa de fase final que corresponde ao relaxamento de tensões provocada pelo furo.

Foram executados alguns ensaios de furação utilizando diferentes diâmetros de fresa para executar o furo (2, 1.8 e 1.6 mm) com diferentes profundidades (0.2 até 2 mm). Verificou-se que para o caso de diâmetros e profundidades maiores o número de franjas obtido era muito elevado, especialmente nas proximidades do bordo do furo. Este facto dificultou o processamento das imagens nessa região. Apesar dos diâmetros mais pequenos terem uma menor sensibilidade do que os maiores, pois libertam menos tensões. Contudo, quanto maior for o diâmetro do furo maior é o efeito de plastificação e em casos de tensões residuais muito elevadas (superiores a um terço da tensão de cedência) o erro provocado pela plastificação pode ser elevado [8]. Quando tal acontece perde-se a correlação do *speckle* e são obtidas medições menos precisas. Quanto à profundidade, tal como seria de esperar, como as tensões residuais do provete são uniformes em profundidade não se verificou uma influência significativa com este parâmetro, esta verificação também foi feita por Steinzig [9]. Para o caso em análise optou-se pela utilização de fresas com um diâmetro de 1.6 mm e furos com uma profundidade de 0.5 mm. Para executar a furação foi utilizada uma furadora eléctrica com uma velocidade de rotação de 33.000 rpm. Flaman e Herring [10] verificaram que esta velocidade não introduz tensões residuais significativas. A profundidade do furo é controlada por um microposicionador, onde se fixou a furadora, que é accionado por um motor passo a passo e que tem uma resolução de 0.0001 mm por incremento. O sistema de furação utilizado foi especialmente desenvolvido para a realização de furos incrementais do método do furo aplicado a técnicas ópticas (ESPI e Moiré interferométrico), os componentes projectados para este sistema estão apresentados no anexo H.

Foram realizadas algumas medições na proximidade da fronteira entre o disco e o anel, bem como numa distância radial do anel próxima do seu bordo interior. Os furos ficaram espaçados entre si cerca cinco vezes o diâmetro do furo. Desta forma, a influência do relaxamento de tensões entre furos vizinhos é inferior a 1% [9]. No caso do anel mediu-se a uma distância de 4 e de 7 mm da fronteira interior e a 5 mm seu do bordo externo. Quanto ao disco foram realizadas medições a uma distância de 10 mm do bordo. Os pontos de medida no anel foram seleccionados procurando os diferentes tipos de estado de tensão existentes: junto da fronteira com o disco, estado biaxial e próximo do bordo final do disco um estado aproximadamente uniaxial, uma vez que as tensões radiais são próximas de zero. No disco seria indiferente a escolha uma vez que este se encontra num estado equi-biaxial de tensão, tendo, por isso, o mesmo valor de tensões em qualquer um dos seus pontos. Na Figura 7.14 está representada a localização diametral dos pontos onde foram executadas as medições.

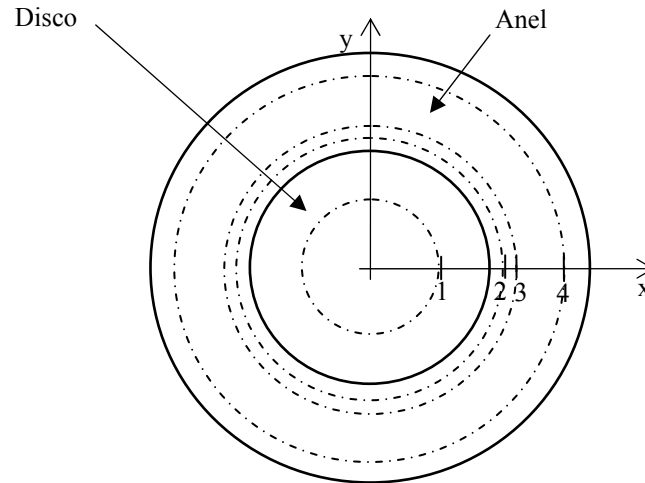
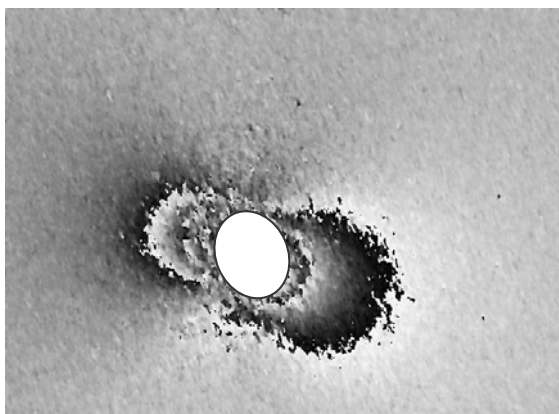


Figura 7.14 Localização diametral dos pontos de medição.

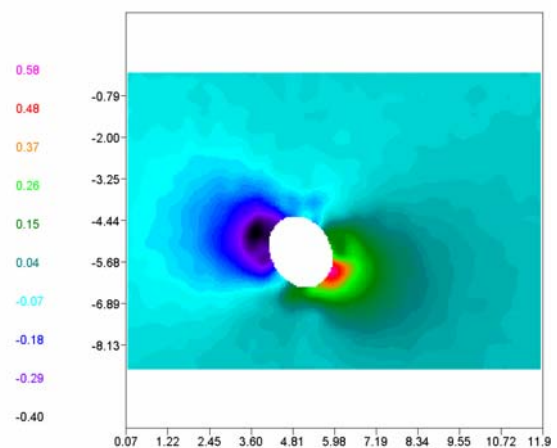
Os pontos de medição encontram-se posicionados relativamente ao centro do disco e localizados nas circunferências a traço misto. A distância radial dos pontos é a seguinte:

- Ponto 1 – 15 mm
- Ponto 2 – 29 mm
- Ponto 3 – 32 mm
- Ponto 4 – 45 mm

Nas figuras seguintes estão representados exemplos de mapas de fase obtidos após o relaxamento de tensões obtidos de alguns pontos referidos no parágrafo anterior. Estão, também, representados os respectivos campos de deslocamentos após eliminar as descontinuidades de fase (*unwrapping*).



(a)



(b)

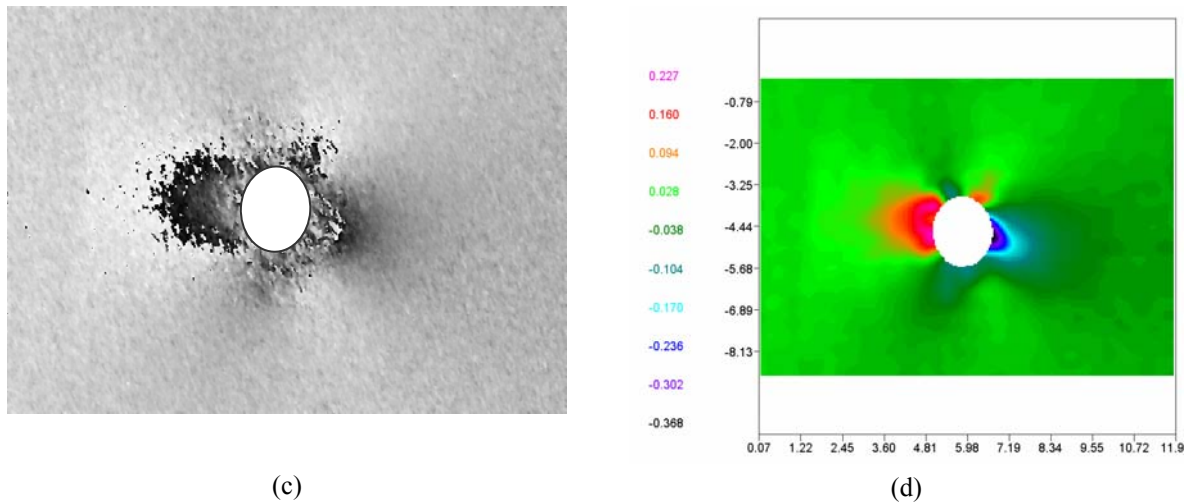


Figura 7.15 Medição de tensões residuais com ESPI no ponto 3: (a) mapa de fase na direcção tangencial; (b) campo de deslocamentos tangencial; (c) mapa de fase na direcção radial; (d) campo de deslocamentos radial.

O ponto 3 foi o primeiro no qual se mediram as tensões residuais e foram efectuadas duas medições ao longo da circunferência em que se encontra este ponto.

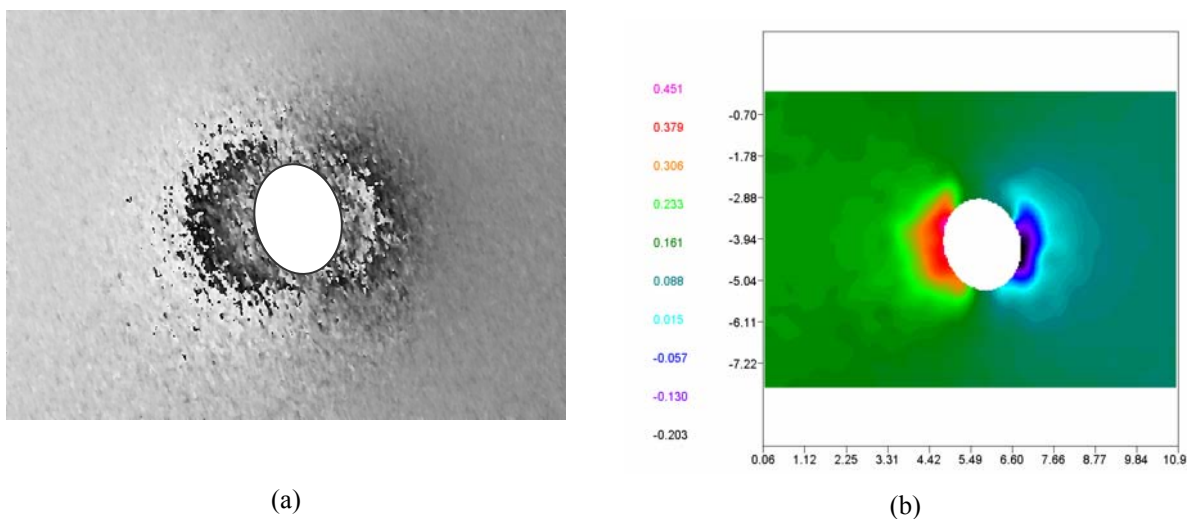


Figura 7.16 Medição de tensões residuais com ESPI no ponto 1: (a) mapa de fase na direcção x; (b) campo de deslocamentos na direcção x.

Nota: o valor dos deslocamentos encontram-se em μm , a escala nas direcções vertical e horizontal está em milímetros.

Os valores dos coeficientes de calibração utilizados foram determinados numericamente para uma profundidade de 0.5 mm, para um diâmetro de furo de 1.8 mm e uma distância de $1.2r_0$ do centro do furo (r_0 é o raio do furo). As propriedades mecânicas consideradas correspondem aos valores anteriormente indicados para o alumínio ensaiado. Na tabela seguinte estão representados os valores dos coeficientes de calibração determinados numericamente.

A	B	C
4.64×10^{-6}	5.88×10^{-6}	3.82×10^{-6}

Para o cálculo das tensões residuais utilizaram-se as expressões da equação (7.1). Os valores apresentados da Figura 7.17 correspondem à tensão principal máxima. Assim, podem determinar-se as tensões principais, σ_1 , σ_2 e a sua direcção φ , a partir de σ_{xx} , σ_{yy} e τ_{xy} , recorrendo às seguintes expressões:

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (7.2)$$

$$\tan 2\varphi = \frac{\sigma_{yy} - \sigma_{xx}}{2\tau_{xy}}$$

No ponto 1, medição das tensões residuais no disco, como o estado de tensões é equibiaxial, só há necessidade de medir numa direcção, uma vez que em qualquer direcção o valor será, teoricamente, sempre o mesmo.

No ponto 4, em que campo de tensões é aproximadamente uniaxial, ao medir na direcção radial o relaxamento de tensões foi muito baixo, inferior à resolução do método. Neste caso só foi possível a medição na direcção tangencial.

A determinação das tensões residuais, a partir do campo de deslocamentos foi feita recorrendo às expressões desenvolvidas equação (7.1) e utilizando os coeficientes de calibração determinados numericamente. Fez-se a determinação do valor da tensão residual para um ponto localizado muito próximo do bordo do furo, a uma distância de $1.2r_0$ do seu centro, onde os deslocamentos medidos são principalmente devidos ao relaxamento de tensões residuais locais e segundo a direcção do eixo perpendicular às franjas [11].

Na Figura 7.17 estão representadas graficamente as medições efectuadas. As linhas a cheio e a traço com dois pontos, correspondem à variação das tensões tangencial e radial no anel, calculadas analiticamente a partir da equação 7.5, a linha a traço interrompido corresponde ao estado de tensão no disco. Os valores de tensões residuais medidos, em diferentes pontos e direcções, estão representados sob diferentes figuras geométricas.

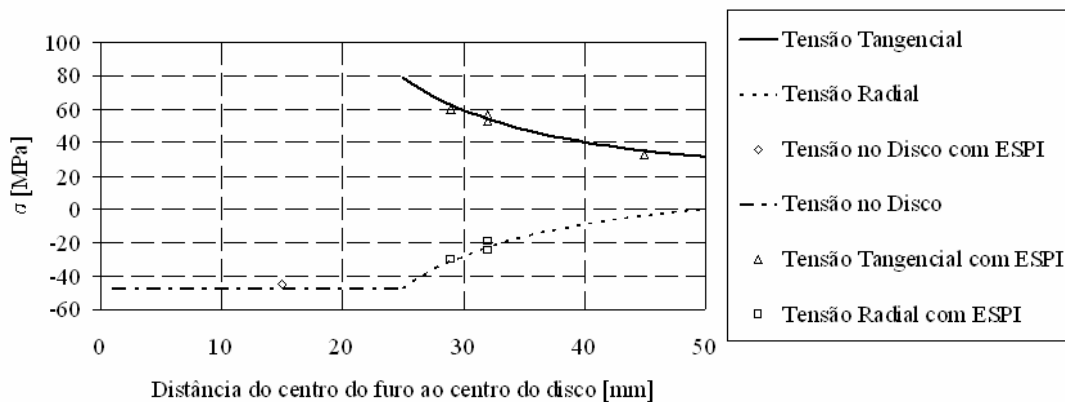


Figura 7.17 Variação das tensões residuais no provete de calibração disco-anel: linhas a cheio correspondem valores de tensão obtidos analiticamente; os pontos marcadores são os valores de tensão medidos experimentalmente com ESPI no plano.

Pela análise dos valores obtidos nas medições pode verificar-se que estão bastante próximos dos valores calculados analiticamente. O que leva a concluir que esta técnica está bem adaptada para medição de tensões residuais, embora em certas situações não tenha sensibilidade suficiente para medir níveis de tensão baixas. Deve lembrar-se que é normalmente aceite que as medições com técnicas interferométricas têm uma resolução que é uma ordem de grandeza superior à da extensometria.

A grande vantagem desta técnica consiste em permitir uma medição de campo, sem necessidade de uma preparação especial da superfície. Contudo, esta técnica é muito sensível a movimentos de corpo rígido, ocorrendo a descorrelação de *speckle* com facilidade. Para contornar este problema o provete deve ficar bem fixo para evitar qualquer movimento. Devido a essa limitação foi necessário repetir algumas medições pois o processo de furação exige cargas que podem provocar pequenos movimentos do provete, isto é, suficientes para descorrelacionar o *speckle*.

Um aspecto importante a ter em consideração no método do furo, quer em combinação com o ESPI, quer com outras técnicas de medição, é a dificuldade de controlar com precisão a profundidade dos furos. Este facto assume particular importância no método do furo incremental. Neste caso os incrementos são muito pequenos (0.05 a 0.1 mm) principalmente quando se está a medir tensões residuais que variam rapidamente com a profundidade. Em equipamentos similares ao utilizado neste trabalho é frequente ocorrerem variações de ± 0.025 mm [8]. Um outro factor que contribui para aumentar o erro das medições prende-se com o facto do diâmetro do furo não corresponder ao diâmetro nominal da fresa, o primeiro é ligeiramente superior ao segundo. Neste trabalho o diâmetro do furo foi superior em cerca de 0.2 mm para todos os diâmetros da fresa utilizados. Finalmente, os últimos factores que contribuem para o erro nas medições são a excentricidade e não perpendicularidade do eixo do sistema de furação. A excentricidade além de provocar um aumento do diâmetro do furo origina, também, furos ligeiramente elípticos. Esta geometria não permite um relaxamento de tensão uniforme ao longo do perímetro do furo e dificulta a utilização correcta dos coeficientes de calibração, uma vez que eles são determinados considerando furos circulares. Um furo cujo eixo não seja perpendicular ao plano de furação causa erros na medição pois as deformações superficiais, provocadas pelo relaxamento das tensões, não se manifestam uniformemente ao longo do incremento perfurado. Para além disso as equações existentes para determinação das tensões residuais partem do pressuposto de que o furo é cilíndrico, coaxial e perpendicular à superfície.

7.2.2 Medição de tensões residuais com Moiré interferométrico

Duma forma sintética pode dizer-se que a teoria do método do furo associada à técnica de Moiré interferométrico é baseada no método do furo convencional. Este consiste na aplicação dum rede de difracção sobre a superfície dum provete, a realização dum furo de forma incremental no local pretendido, a gravação das franjas obtidas com o relaxamento de tensões e o calculo do campo de tensões residuais recorrendo a relações de tensão – deslocamento obtidas por cálculo com Elementos Finitos.

Com o objectivo de validar a técnica de Moiré interferométrico para a medição de tensões residuais fizeram-se algumas medições no provete de calibração anel/disco. Neste caso, mediram-se apenas dois pontos que se encontram a uma distância de 29 e 39 mm, do centro do disco.

Foi colada uma rede de difracção com linhas cruzadas e uma frequência de 1200 l/mm sobre a superfície do provete. A montagem óptica utilizada foi idêntica à descrita no capítulo 6 e a operação de furação foi efectuada recorrendo a uma turbina de ar comprimido. Esta furadora permite uma velocidade de rotação de 350.000 rpm, com uma fresa de diâmetro igual a 1,8 mm. Na figura 7.18 está representado o pormenor da montagem do provete com o sistema de furação.

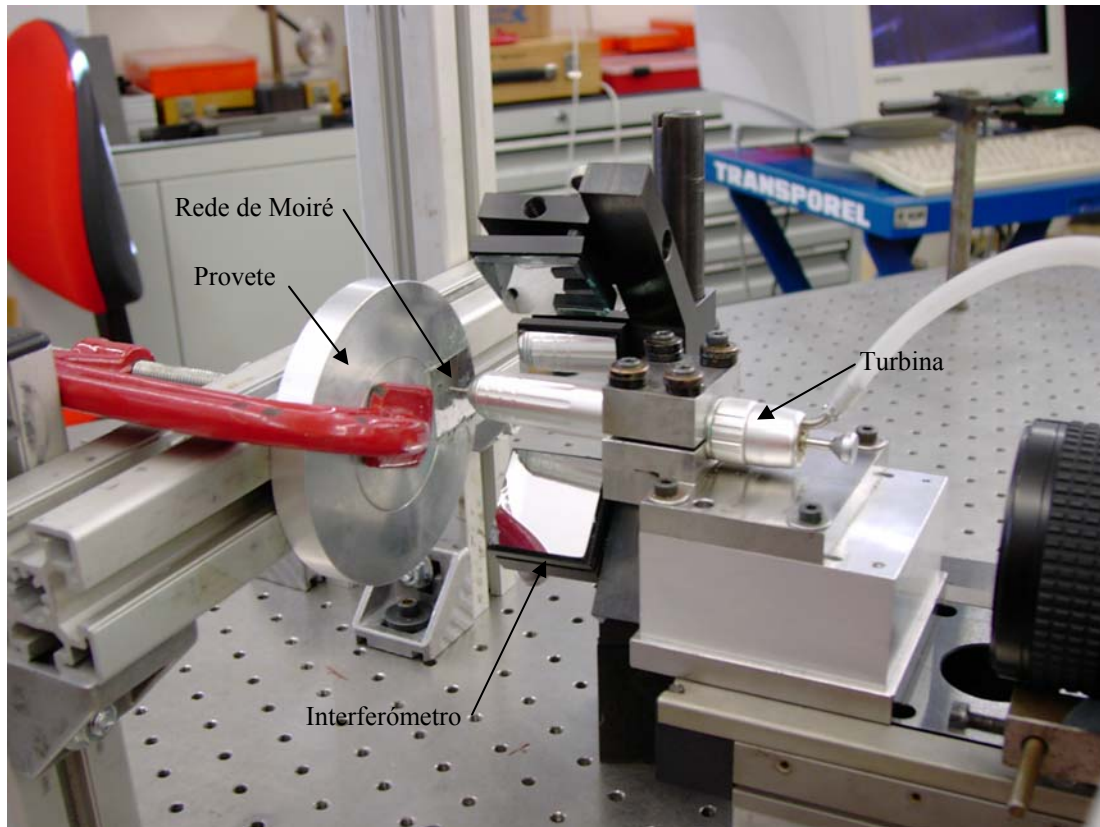


Figura 7.18 Pormenor da montagem utilizada para medição de tensões residuais no provete de interferência disco/anel com Moiré interferométrico.

Foi utilizado o mesmo sistema de avanço da medição com ESPI. Os furos foram realizados com uma profundidade de 0,5 mm. Após medição dos furos verificou-se que estes tinham um diâmetro de aproximadamente dois milímetros, foi com este valor de diâmetro que foram determinados os coeficientes de calibração A e B e calculadas as tensões.

Tal como se fez no capítulo 6, foi utilizado um programa de processamento de imagens para a determinação do campo deslocamentos: obteve-se um mapa de fase recorrendo a um procedimento de *phase shifting* [12].

Na Figura 7.19 estão representados os campos de deslocamentos horizontal e vertical, no ponto cuja distância ao centro do disco é de 29 mm.

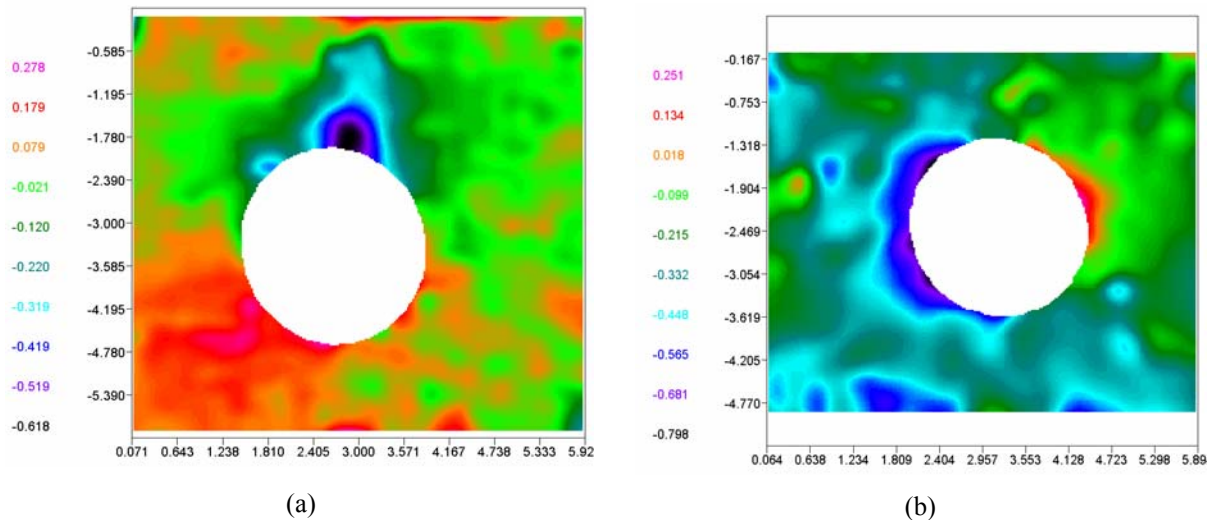


Figura 7.19 Medição de tensões residuais com Moiré interferométrico no ponto a 29mm do centro do disco: (a) campo de deslocamentos vertical; (b) campo de deslocamentos horizontal; (valor dos deslocamentos em μm).

A determinação das tensões residuais, a partir do campo de deslocamentos foi feita recorrendo às expressões similares às utilizadas no ponto 7.2.1 (ESPI) e utilizando os coeficientes de calibração determinados numericamente. Fez-se a determinação do valor da tensão residual para um ponto localizado a uma distância de $1.2r_0$ do centro do furo e na direcção do eixo perpendicular às franjas. Algumas irregularidades que se podem observar nos campos de deslocamentos são devidas a irregularidades na colagem da rede.

Na Figura 7.20 estão representadas graficamente as medições efectuadas.

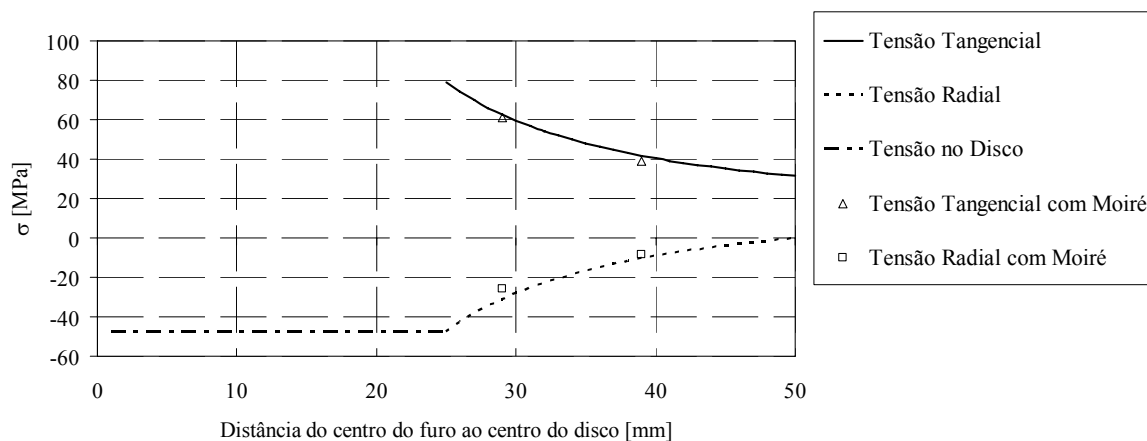


Figura 7.20 Variação das tensões residuais no provete de calibração disco-anel: linhas a cheio correspondem valores de tensão obtidos analiticamente; os pontos marcadores são os valores de tensão medidos experimentalmente com Moiré interferométrico.

Observando a Figura 7.20 pode verificar-se os valores medidos com o Moiré interferométrico estão próximos dos valores teóricos, o que permite concluir que esta técnica pode ser utilizada na medição precisa de campos tensões residuais. A principal vantagem da utilização desta técnica é a sua insensibilidade a deslocamentos de corpo rígido e não sofrer decorrelação. Esta técnica tem, contudo, algumas limitações como por exemplo: está muito dependente da

qualidade da rede de difracção utilizada. A obtenção de redes de qualidade implica enormes cuidados com o seu revestimento, a sua transferência para a superfície do provete e exige alguma habilidade e muita experiência. Na colagem da rede a camada de epóxido utilizada como *interface* rede/superfície do provete deve ser uniforme e com uma espessura muito pequena (menor que 5 µm) para minimizar os efeitos de corte nessa camada. A origem dos erros que ocorrem na medição com esta técnica serão posteriormente discutidos com maior detalhe neste capítulo.

7.3 Medição de tensões residuais não uniformes ao longo da espessura

Em muitas situações de engenharia as peças ou estruturas podem ter uma variação mais ou menos brusca de tensões residuais ao longo da sua espessura. Em determinadas aplicações essa variação de tensões é criada propositadamente para melhorar o desempenho das peças, é o caso, por exemplo, do processo de granalhagem utilizado para aumentar a vida à fadiga de certos componentes. Neste caso criam-se tensões residuais de compressão na superfície das peças. Essas tensões residuais variam dum valor muito elevada à superfície (por vezes mais de 300 MPa) até a um valor praticamente nulo a uma profundidade de cerca de 1 mm.

Neste trabalho foi possível medir a variação de tensões residuais não uniformes em profundidade recorrendo-se ao método do furo incremental com Moiré interferométrico. Para o efeito foi utilizado um provete granalhado, gentilmente cedido pelo Prof. João Paulo Nobre da Universidade de Coimbra. Este provete foi utilizado durante a realização do seu trabalho de doutoramento, para medir tensões residuais por difracção de raios X.

Trata-se um provete granalhado dum aço AISI 4337 com as seguintes propriedades mecânicas e composição química [13]:

Material	σ_c (0.2%)	σ_{max}	Dureza	Composição química [% peso]						
				C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V
AISI	[MPa]	[MPa]	HV							
4337	920	1000	340	0.34	<0.4	0.65	1.5	0.22	1.5	-

No estudo feito por Nobre [13] conclui-se que para o aço AISI 4337 o efeito de plastificação em torno do furo é muito baixo, o que significa que a técnica do furo pode ser utilizada na medição de tensões residuais, pois o erro devido à plastificação do material é muito baixo.

A relação entre as tensões residuais e a ordem das franjas de Moiré podem ser escritas na seguinte forma matricial [14]:

$$\begin{bmatrix} u(x_k, y_k) & v(x_k, y_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_k \\ \sin \theta_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + B \cos 2\theta_k \\ A - B \cos 2\theta_k \\ 2B \sin 2\theta_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

Onde $k = 1, 2, 3$, k corresponde ao número de pontos de medição; $u(x_k, y_k)$ e $v(x_k, y_k)$ são os valores de deslocamentos medidos com Moiré interferométrico; θ_k é coordenada cilíndrica do ponto de medida k ; A e B são os coeficientes de calibração determinados numericamente pelo processo descrito no início deste capítulo; σ_x , σ_y e τ_{xy} são as três componentes da tensão residual no sistema de coordenadas cartesianas.

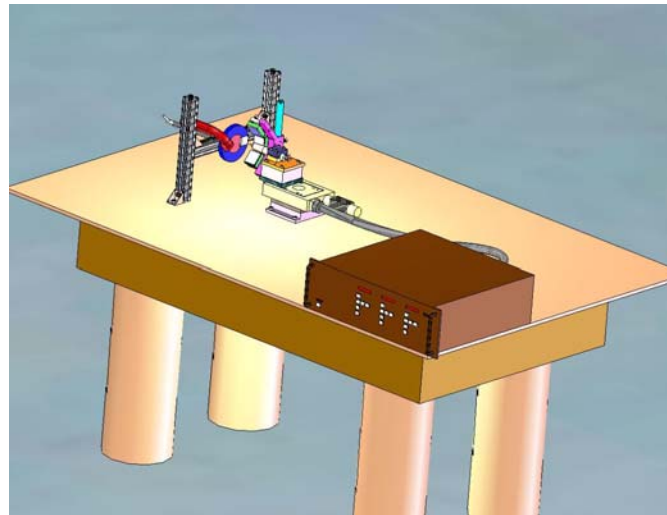
Para a determinação de tensões residuais não uniformes ao longo da espessura, o furo deve ser feito de modo incremental. A tensão em cada camada do incremento é considerada uniforme. O conceito é o mesmo do método integral utilizado na técnica do furo com extensometria. A equação (7.3) é utilizada repetidamente para um cada dos incrementos do furo de acordo com a seguinte expressão [14]:

$$\begin{bmatrix} u^i(x_k, y_k) & v^i(x_k, y_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_k \\ \sin \theta_k \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^i \begin{bmatrix} A^{ij} + B^{ij} \cos 2\theta_k \\ A^{ij} - B^{ij} \cos 2\theta_k \\ 2B^{ij} \sin 2\theta_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^j \\ \sigma_{yy}^j \\ \tau_{xy}^j \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

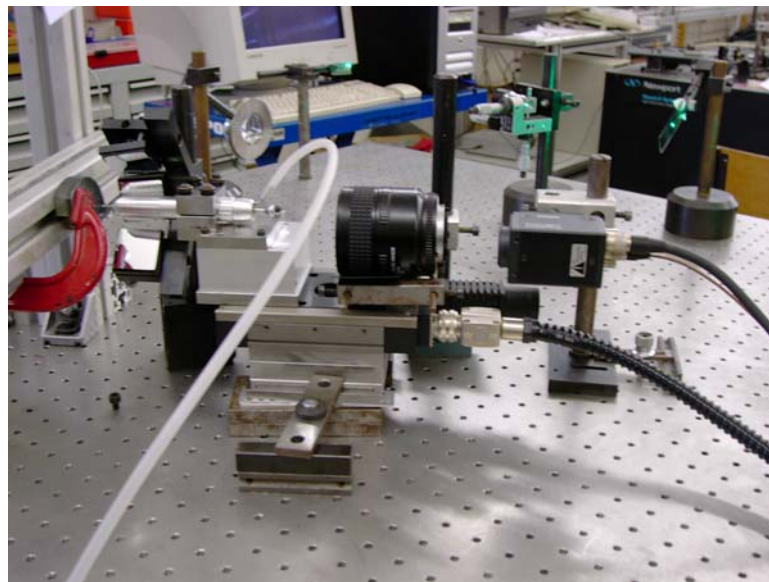
Onde $i = 1, 2, \dots, n$; em que n é número total de incrementos; A^{ij} e B^{ij} são os coeficientes de calibração da camada j após a maquinagem do incremento i ; $u^i(x_k, y_k)$ e $v^i(x_k, y_k)$ são os deslocamentos medidos com Moiré interferométrico em três pontos depois do incremento i ; σ_{xx}^j , σ_{yy}^j e τ_{xy}^j são as três componentes da tensão residual na camada j .

7.3.1 Montagem e procedimentos experimentais

Foi desenvolvido uma montagem experimental que combina um sistema óptico e um mecânico para efectuar a medição dos deslocamentos e realizar a furação. Este sistema foi descrito no ponto anterior, basicamente é constituído por um interferómetro, pelo provete com uma rede difracção colada na sua superfície e por um sistema de furação (turbina de ar comprimido para movimentar uma fresa com um diâmetro de 1.8 mm. Um microposicionador de elevada resolução permite o movimento de avanço controlado da fresa. Na Figura 7.21 pode ver-se uma fotografia da montagem experimental utilizada.



(a)



(b)

Figura 7.21 (a) Representação esquemática da montagem óptica e mecânica para Moiré interferométrico com o método do furo; (b) Sistema experimental.

Antes da realização do ensaio foi colada uma rede de Moiré para realizar a medição dos deslocamentos em duas direcções. Durante a colagem procurou-se minimizar a espessura do epóxico para evitar os efeitos de corte referidos anteriormente. Após a cura do epóxico foi retirada da rede original, ficando a replicada, revestida com uma fina camada de alumínio (inferior a 80 nm), sobre a superfície do provete. A montagem do provete no *set up* de medição foi feita como está representado na Figura 7.21. A furação do provete é feita de forma incremental na região onde foi colada a rede de Moiré. Entre cada incremento do furo são registadas as imagens das franjas de Moiré provocadas pelo relaxamento das tensões residuais. Foram executados sete incrementos, os primeiros quatro com uma espessura de 0.1 mm e os três últimos com 0.2 mm., até um total de 1 mm de profundidade. Os primeiros 4 foram mais pequenos porque é na zona mais próxima da superfície que ocorrem os maiores decréscimos de tensão. Nos últimos incrementos o decréscimo é muito menor e a influência da granalhagem é mais reduzida, como tal optou-se por fazer incrementos maiores.

Após cada incremento foram captadas quatro imagens com um acréscimo de fase de $\pi/2$ entre imagens consecutivas. Foi aplicado o algoritmo de processamento de imagem descrito no capítulo anterior. Na Figura 7.22 pode ver-se o exemplo do mapa de fase e o campo de deslocamentos nas direcções v e u (após o *unwrapping*) obtidos para o segundo incremento.

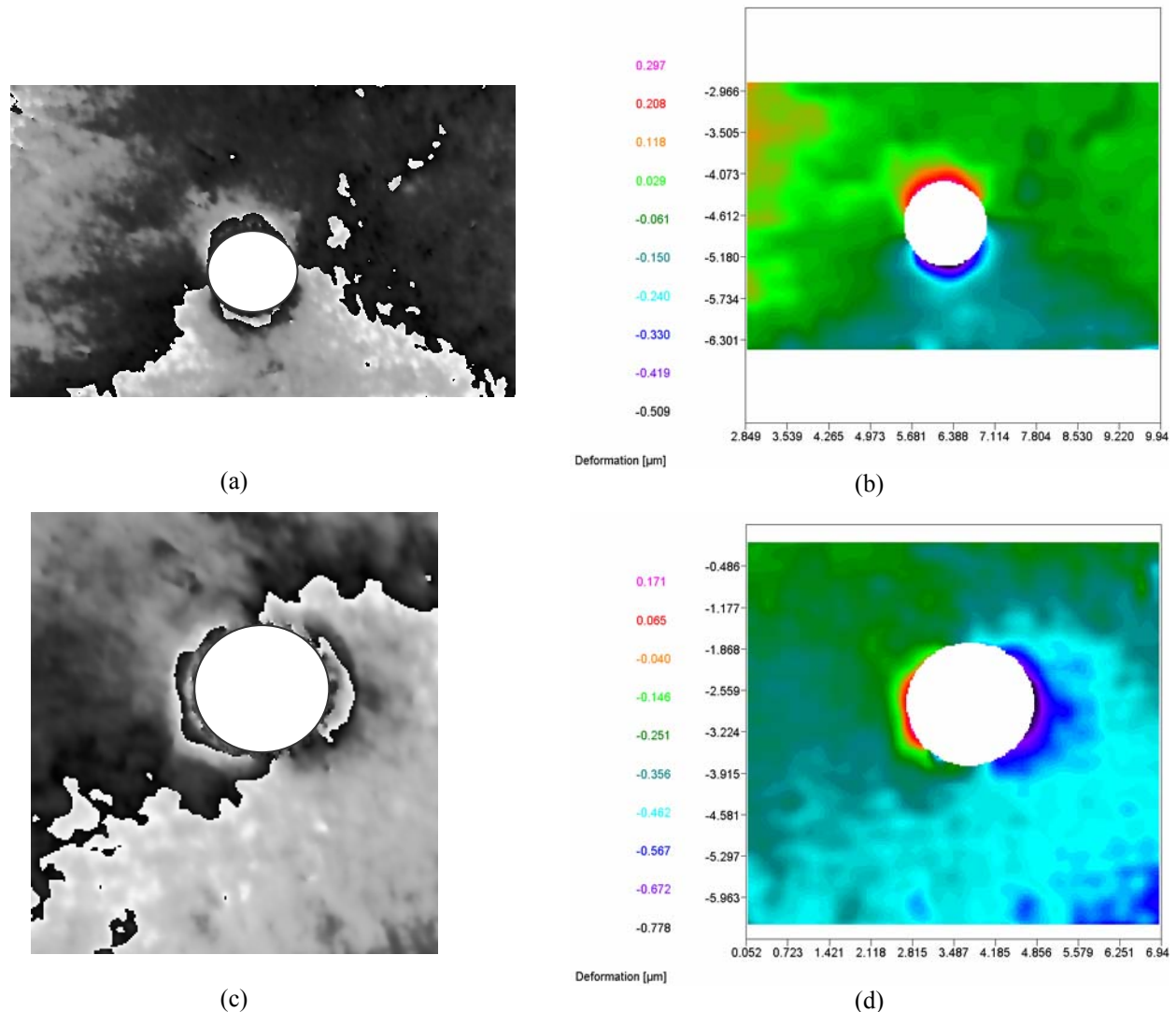


Figura 7.22 Imagens obtidas com Moiré interferométrico para a medição do relaxamento de tensões após o segundo incremento: (a) mapa de fase na direcção v ; (b) campo de deslocamentos na direcção v após *unwrapping*; (c) mapa de fase na direcção u ; (d) campo de deslocamentos na direcção u após *unwrapping*.

7.3.2 Resultados obtidos

A partir dos campos de deslocamentos obtidos para cada incremento é possível determinar as respectivas tensões residuais recorrendo à equação 7.2. As tensões residuais foram calculadas em três pontos ($1.2r_0, 0^\circ$), ($1.2r_0, 45^\circ$) e ($1.2r_0, -45^\circ$), tal como se pode ver esquematicamente na Figura 7.23. A tensão residual máxima de compressão ocorre no primeiro incremento, para uma profundidade de 0.1 mm. O nível máximo de tensões compressivas para σ_x e σ_y é de -493 e -543 MPa, respectivamente. O valor das tensões residuais de compressão diminui à medida que a profundidade do furo aumenta. A tensão muda de sinal a uma distância de aproximadamente 0.4 – 0.5 mm da superfície. Para profundidades mais elevadas surgem

tensões de tracção, apesar do seu valor ser relativamente baixo. O valor da máxima tensão de corte corresponde a 10-20% do máximo das tensões de compressão e desempenha um papel importante na alteração da simetria do campo de deslocamentos. Na Figura 7.23, apresentam-se graficamente os valores medidos com a técnica de Moiré interferométrico associada ao método do furo. Nesta figura está representada a evolução das tensões residuais desde a superfície até a um milímetro de profundidade.

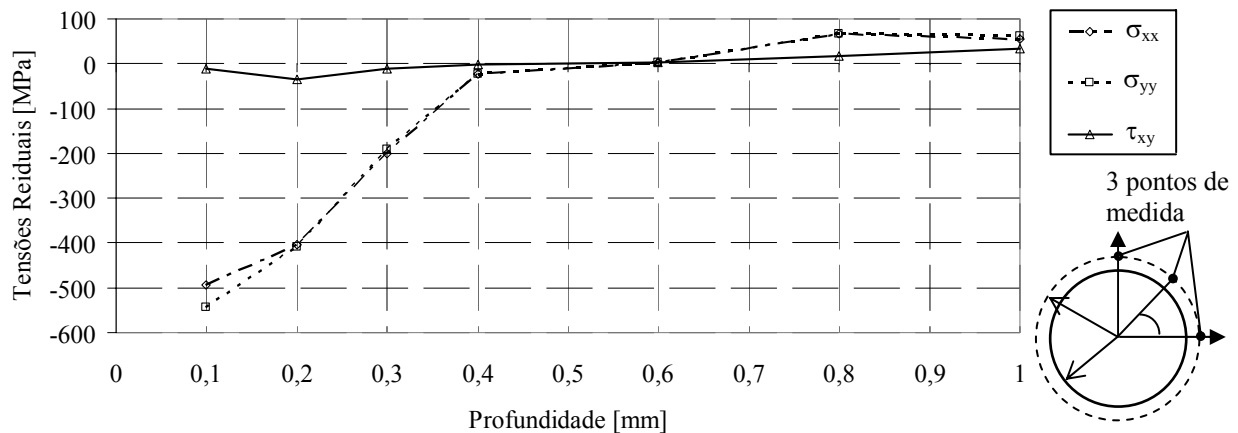


Figura 7.23 Distribuição das tensões residuais num provete granalhado construído em aço AISI 4337.

Na avaliação dos resultados experimentais obtidos é importante fazer-se uma análise da precisão das técnicas utilizadas. Existem, tipicamente, quatro fontes de erro no Moiré interferométrico com o método do furo incremental [14]: (i) erros inerentes ao método do furo relativamente ao real valor do campo de deslocamentos e no cálculo dos coeficientes de calibração utilizados; (ii) erros na medição dos deslocamentos originados no sistema óptico; (iii) tensões residuais induzidas pelo processo de furação; (iv) erros provocados pela falta de precisão geométrica do furo, tais como, a falta de precisão na recolocação do sistema de furação entre os diferentes incrementos ou a não perpendicularidade entre o eixo da fresa e a superfície do provete. À excepção do primeiro tipo de erro, os outros três podem ser minimizados com um cuidadoso projecto e utilização do sistema experimental.

7.3.3 Comparação de resultados

Os resultados obtidos a partir das medições feitas com a técnica de Moiré interferométrico associado ao método do furo incremental foram comparados com os obtidos na Universidade de Coimbra e apresentados por Nobre [13], bem como os calculados pela simulação numérica elaborada no âmbito deste trabalho.

Para facilitar a comparação dos resultados optou-se por fazer uma comparação entre as tensões principais máximas das tensões residuais libertadas, pois é o valor desta tensão que está apresentada na referência [13]. As tensões principais foram determinadas recorrendo à equação (7.2).

Na Figura 7.24 pode ver-se a representação gráfica das tensões residuais medidas com três técnicas diferentes: método do furo incremental com extensometria (MFI – método integral) e a técnica de difracção de raios X (DRX) que foram realizados na Universidade de Coimbra por Nobre [13]. O método do furo incremental com Moiré interferométrico (Moiré) foi

realizado no âmbito deste trabalho. Neste caso, foi também utilizado o método integral. No mesmo gráfico estão, também, apresentados os resultados obtidos recorrendo a uma simulação numérica com elementos finitos (MEF) desenvolvida no decurso do presente trabalho.

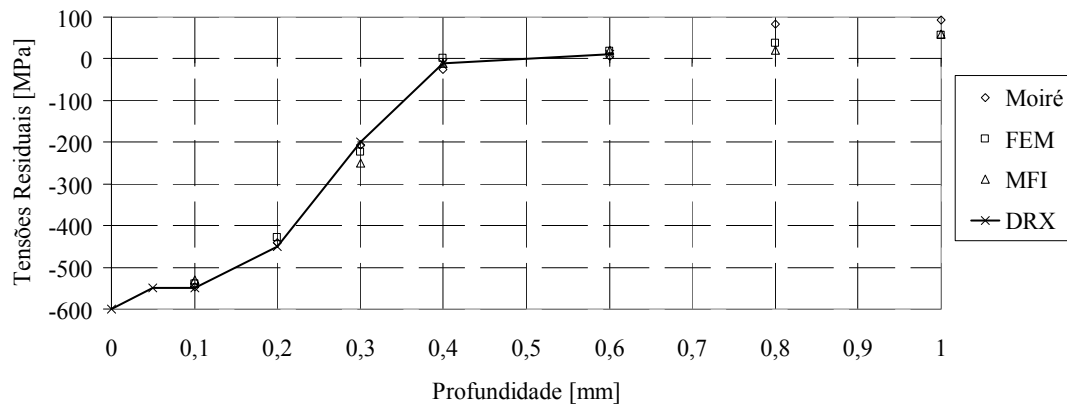


Figura 7.24 Distribuição das tensões residuais dum provete granalhado construído em aço AISI 4337. Comparação entre os resultados obtidos com: Moiré interferométrico, MEF, MFI e DRX.

Da análise da Figura 7.24 pode verificar-se que os resultados obtidos utilizando a técnica de Moiré interferométrico com o furo incremental estão razoavelmente próximos dos resultados obtidos por Nobre [13], quer recorrendo ao método do furo com extensometria (MFI), quer com a DRX. Na simulação numérica verificou-se uma boa proximidade de resultados com os obtidos com as técnicas experimentais. As maiores diferenças ocorreram para profundidades mais elevadas do furo incremental, em que a influência da granalhagem já não se manifesta. Esta diferença poderá dever-se à diferente sensibilidade das técnicas utilizadas. A maior diferença das tensões de compressão entre Moiré, MFI e DRX ocorreram na proximidade da região de transição (passagem da tensão de compressão para tração) e é de cerca de 60% para ambos os casos (Moiré/MFI e Moiré/DRX). Esta diferença poderá dever-se a várias razões: a um possível erro na profundidade do incremento, a uma diferença na profundidade granalhada nas regiões onde foram efectuadas as medidas; erro na determinação da borda do furo durante o processamento dos dados, embora este erro seja pouco provável, pois foi utilizada a mesma máscara para o furo, embora com pequenos ajustes durante os incrementos. Por último deve referir-se que este erro é pouco significativo pois ocorre numa região em que os valores da tensão são baixos. Além disso existe uma boa concordância na evolução das tensões ao longo da espessura sendo nesse ponto que se manifesta o maior desvio.

7.3.4 Conclusões

Os resultados obtidos com a técnica de Moiré interferométrico associado ao método do furo incremental estão bastante próximos dos valores conseguidos utilizando outras técnicas já validadas no meio científico, o que leva a concluir que esta técnica está bem adaptada à medição de tensões residuais não uniformes em profundidade. Deve referir-se que as técnicas de DRX para poderem medir em profundidades superiores a 10 μm implicam a remoção das camadas superficiais, pelo que passam a ser destrutivas. O sistema óptico – mecânico: Moiré interferométrico – furo incremental, permite, numa forma automática, a medição e cálculo das tensões residuais. Este sistema permite converter rapidamente o campo de deslocamentos obtidos com Moiré interferométrico, após relaxamento de tensões, em valores de tensões

residuais através de séries de coeficientes de calibração determinados numericamente com um código de elementos finitos.

7.4 Automatização do processo de medição de tensões residuais

Uma das grandes vantagens das técnicas ópticas, quando comparadas com outras técnicas de análise experimental de tensões, como por exemplo a extensometria, é a quantidade de informação que proporcionam, uma vez que são técnicas de campo. Associando estas técnicas à era digital, pode afirmar-se que cada *pixel* duma imagem corresponde a um valor de uma dada grandeza (deslocamento, deformação ou tensão). Esta vantagem pode, por vezes, tornar-se num inconveniente se não existirem meios ou ferramentas adequadas para processar a informação. Na fase inicial de utilização destas técnicas, em que os meios tecnológicos eram escassos, o processamento da informação era muito moroso e propenso a erros. Normalmente eram utilizadas técnicas de contagem de franjas e medição da sua posição relativa, apesar de terem sido desenvolvidos processos para minimizar os erros e agilizar o tratamento da informação. Nos casos em que a densidade de franjas era muito elevada ou o seu contraste era fraco, os erros de medida eram relativamente elevados. Com o advento da era digital, grande parte desses problemas foram resolvidos e, graças à utilização de câmaras CCD ou CMOS que captam as imagens e as convertem em matrizes de *pixels* com um valor de intensidade. As imagens com este formato permitem um posterior processamento automático em que se analisa toda a informação.

No caso particular da técnica de Moiré interferométrico associado ao método do furo, as imagens obtidas permitem a determinação do campo de deslocamentos originado no relaxamento de tensões em torno do furo. A análise desenvolvida neste trabalho para a determinação das tensões residuais foi executada considerando três pontos, a uma distância radial do centro do furo de $1.2R_0$ e separados dum ângulo de 45° entre si. Foram considerados os dois eixos paralelos às linhas da rede de difracção e um terceiro eixo na bissetriz do ângulo formado pelos dois eixos referidos. Os coeficientes de calibração foram determinados numericamente para a posição radial $1.2R_0$ e para as diferentes profundidades incrementais.

O valor determinado para as tensões residuais corresponde a um valor médio dos três pontos. O que significa que apenas se utilizou uma pequena parte da informação disponível na imagem, correspondente a três *pixels*. Se se pretendesse fazer uma análise com outros três pontos ter-se-ia que repetir o procedimento. Se a distância radial dos pontos fosse outra haveria necessidade de utilizar novos coeficientes de calibração. Isto significa um novo cálculo dos novos coeficientes no caso de terem sido guardados os valores dos deslocamentos ou uma nova simulação. Esta última opção, dependendo do grau de refinamento da malha ou do número de nós de cada elemento poderia implicar um tempo considerável.

No caso de se pretender realizar um ensaio utilizando um diâmetro de furo diferente, o tempo dispendido para uma nova simulação seria ainda maior. Neste caso haveria necessidade de criar um novo modelo, com um diâmetro de furo diferente, e recriar as condições de fronteira e de carregamento. Por outro lado, quando se faz a análise do campo de deslocamentos é, por vezes, difícil definir com exactidão o bordo do furo, pois durante a obtenção do mapa de fase essa zona de fronteira entre o furo e o material fica deteriorada. Esta dificuldade na definição correcta do bordo do furo pode originar alguns erros nos resultados. Esses erros podem ser directos, se os pontos de medida estiverem próximos do bordo do furo ou indirectos devido a uma má definição do centro do furo. Neste caso todos os pontos escolhidos são medidos relativamente ao ponto considerado como centro, se este não está correctamente posicionado

no centro real do furo, todos os valores de deslocamento escolhidos têm um erro relativo. Por isso é importante definir um critério de calibração para definir com melhor acuidade a fronteira do furo e, desta forma, minimizar os erros provocados pela incerteza da linha que define o seu bordo. De tudo o que foi dito pode concluir-se que é de todo o interesse desenvolver um processo de automatização, de forma a simplificar a medição e a minimizar alguns erros intrínsecos ao processamento de imagem.

No sentido de automatizar o processo, sugere-se o desenvolvimento dum algoritmo de cálculo. No fluxograma da figura seguinte está representado o algoritmo de cálculo proposto pelo autor. Este algoritmo poderá ser utilizado com uma montagem experimental idêntica a desenvolvida nesta tese, ou após introdução de alguns melhoramentos, para obter de forma expedita as tensões residuais num dado ponto.

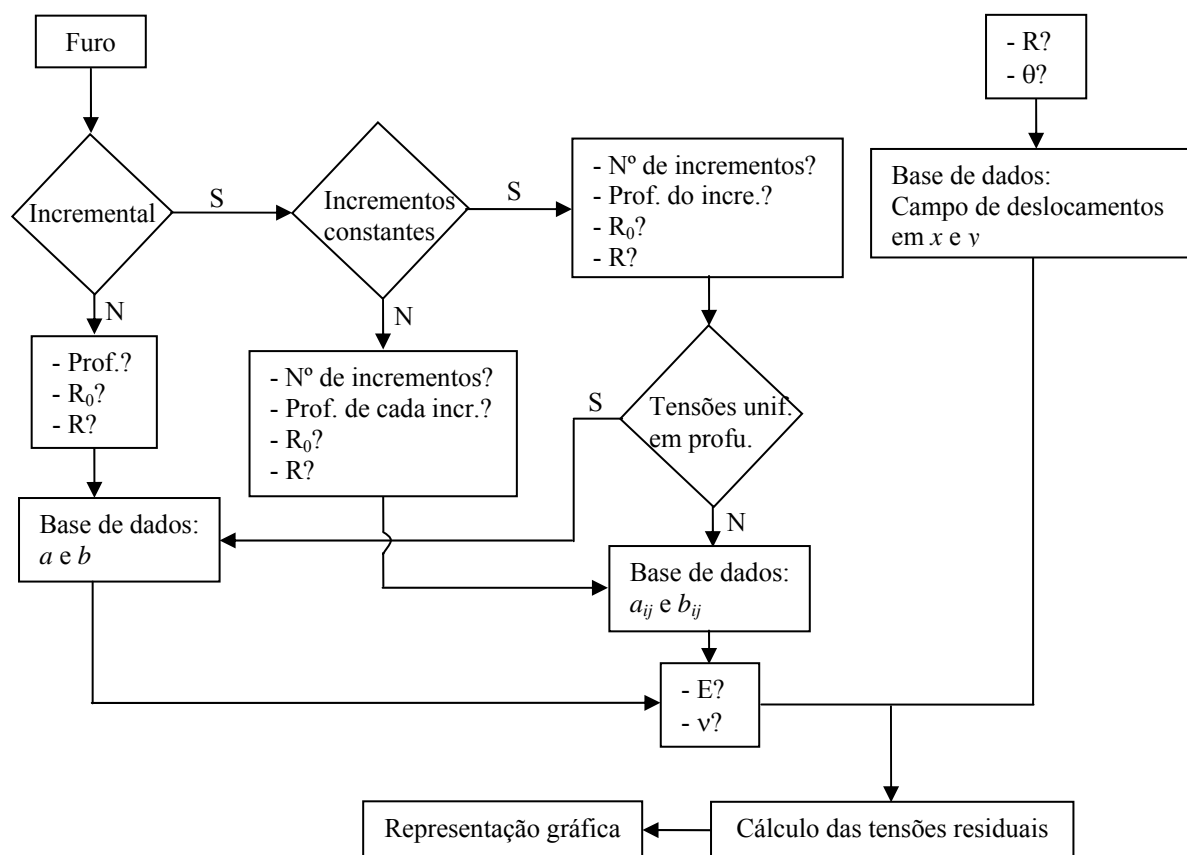


Figura 7.25 Fluxograma dum algoritmo de cálculo de tensões residuais para automatização do sistema de medição utilizando Moiré interferométrico com o método do furo: R, coordenada radial do ponto a medir; R_0 , raio do furo; θ coordenada angular; a , b , a_{ij} , b_{ij} , coeficientes de calibração adimensionalizados; E, ν módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do material analisado.

O algoritmo está dividido em duas partes distintas que confluem na fase final dos cálculos, para a determinação e representação das tensões residuais. Uma das partes está relacionada com método do furo e com a determinação dos coeficientes de calibração e a outra com a escolha dos pontos de medida no campo de deslocamentos.

O algoritmo será utilizado após a realização do ensaio e do registo das quatro imagens para cada incremento, caso se utilize o método do furo incremental.

O algoritmo foi desenvolvido para as duas situações possíveis no método do furo: incremental (tensões residuais uniformes ou não uniformes em profundidade) ou não incremental (tensões residuais uniformes em profundidade).

Optando pelo furo não incremental, o utilizador deverá indicar qual a profundidade do furo com que executou o ensaio, o raio do furo e a distância radial que pretende utilizar para a medição das tensões residuais. Com estes parâmetros é possível determinar quais os coeficientes de calibração (adimensionalizados) necessários para a determinação das tensões residuais. Os coeficientes de calibração foram previamente determinados por via numérica para um conjunto de valores geométricos (profundidades e raios de furos, pontos com diferentes distâncias radiais) e adimensionalizados. Se os valores escolhidos pelo utilizador forem diferentes dos existentes na base de dados matricial, o programa fará uma interpolação. Os coeficientes de calibração determinados serão, de seguida, calculados utilizando as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) do material ensaiado. Estes dados serão introduzidos pelo utilizador.

Se o ensaio for realizado com o método do furo incremental, o utilizador tem duas possibilidades, dependendo do ensaio realizado; ou utiliza incrementos constantes ou incrementos variáveis. A diferença entre os incrementos constantes e os variáveis, foi pensada para simplificar o trabalho do utilizador: se os incrementos forem constantes, só há necessidade de indicar a profundidade do incremento e o número de incrementos enquanto que no caso de incrementos variáveis é necessário indicar a profundidade de cada incremento. Tal como no caso do furo não incremental, o operador tem de acrescentar a informação do raio do furo, bem como a distância radial do ponto seleccionado para o cálculo das tensões residuais.

Os incrementos constantes podem ser utilizados em duas situações: tensões uniformes em profundidade, como vem sugerido na norma ASTM-E837 [16], tensões não uniformes em profundidade. No primeiro caso os coeficientes de calibração são os indicados para o furo não incremental (considerando a profundidade de cada incremento), no segundo caso, como esta versão está desenvolvida para o caso do método integral, os coeficientes de calibração foram determinados, por simulação numérica, para o método integral (a_{ij} e b_{ij}), tal como foi descrito e calculado no início deste capítulo. Se os valores dos coeficientes de calibração requeridos se encontrarem entre os existentes na base de dados do programa, este deve calcular os valores interpolados utilizando o procedimento sugerido por Schager [17]. A técnica do furo com incrementos variáveis é normalmente utilizada quando ocorre uma forte variação de tensões residuais com a profundidade. Neste caso os primeiros incrementos são menores (tensões residuais mais elevadas) e os últimos já podem ter uma maior profundidade, pois o decréscimo das tensões é menor. Tendo em conta esta consideração, só se justifica a determinação dos coeficientes de calibração para o método integral, que é o mais adaptado à medição de tensões residuais em que ocorre uma maior variação de magnitude em profundidade [18]. Naturalmente que estes valores de coeficientes de calibração são adimensionais e devem ser utilizados para a partir das propriedades mecânicas (E e ν) do material calcular os valores das tensões.

Tal como já foi dito anteriormente, uma imagem corresponde a uma matriz de intensidades. Nas técnicas anteriormente descritas os valores das intensidades podem ser relacionadas com grandezas físicas como, por exemplo, deslocamentos. Para isso é necessário recorrer a programas de processamento de imagem com os quais se obtêm, inicialmente um mapa de fase, a partir do qual se pode determinar o campo de deslocamentos. É ainda possível obter o

campo de deformações derivando o campo de deslocamentos relativamente a duas direcções ortogonais (x e y).

Como as imagens são matrizes de $n \times n$ *pixels*, cada um deles corresponde a um determinado valor deslocamento, permitindo obter uma base de dados de deslocamentos. Contudo, como na imagem obtida existe um furo, há a necessidade de definir as suas fronteiras (bordo do furo), bem como o seu centro com a máxima precisão. Este trabalho pode ser bastante complexo dado a dificuldade definir a transição entre o material e o vazio existente no furo, esta dificuldade deve-se, fundamentalmente, ao processo de cálculo do mapa de fase. Como são utilizadas quatro imagens e a informação junto à fronteira apresenta ruído o mapa de fase nessa região está mais sujeito a erros. Em zonas de transição, não é muito nítida a diferença entre o material e o vazio do furo, este facto leva a uma outra dificuldade que é determinação do centro de furo, que se faz com base no círculo definido pelo furo. Contudo é possível após alguma prática ou recorrendo a programas auxiliares de processamento de imagem contornar estas dificuldades e obter os valores das tensões residuais libertadas. Os resultados que se apresentam ao longo deste trabalho provam que sendo uma tarefa com algumas dificuldades pode ser levada a cabo com sucesso.

Referências:

- [1] Ribeiro, J., Vaz, M. e Piloto, P., *Medição de Campos de Tensões Residuais – Estudo Preliminar*, Proc., VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional, Universidade de Évora, 14 – 16 Abril, 2003.
- [2] Ribeiro, J., Vaz, M., Piloto, P. e Monteiro, J., *Técnicas de Medição de Tensões Residuais*, VI Encontro Nacional da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET), nos Proc., Ponta Delgada, 2005.
- [3] Schager, G. S., *Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements*, J. Eng. Mater. Tech., 103, 4, 1981, pg. 157-163.
- [4] Gnaupel-Herold, T., Prask, H.J., Clark, A.V., Hehman, C.S., Nuygen, T.N., *A comparison of neutron and ultrasonic determinations of residual stress*, Measurement Science and Technology, Vol. 11, 2000, pg. 436-444.
- [5] Ugural, A. C., *Mechanical Design – An Integrated Approach*, Edited by McGraw-Hill, New York, 2004, pg. 660-667.
- [6] Nelson, D. V. and Makino, A., *The Holographic-hole Drilling Method for Residual Stress Determination*, Optics and Lasers in Engineering, 27, 1997, pg. 3-23.
- [7] Jones, R., Leendertz, J. A., *Elastic constant and strain measurement using a three beam speckle pattern interferometer*, Journal of Physics E (Sci. Instrum), Vol. 7, 1974, pg. 653-657.
- [8] Nobre, João P., *Sobre o Comportamento Mecânico de Camadas Superficiais dos Materiais: - Estudo do Contacto no Impacto Elasto-Plástico; Determinação do Estado de Tensões Residuais pela Técnica do Furo Incremental*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2000, pg. 106-107.
- [9] Steinzig, M., Hayman, G., Prime, M., *Verification of a Technique for Holographic Residual Stress Measurement*, ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Published in Residual Stress Measurement and General Non-destructive Evaluation, Vol. 429, Atlanta, 2001.
- [10] Flaman, M. T., and Herring, J. A., *Comparison of Four Hole-Producing Techniques for the Center-Hole Residual Stress Measurement Method*, Experimental Techniques, Vol. 9, 1985, pp. 30-32.
- [11] Plaut-Aubry, R. *et al*, *Determination of Residual Stresses with Phase Shifting Laser SPECKLE Interferometry*, Proceedings, 6th International Conference of Residual Stresses (ICRS6), Oxford, 2000.
- [12] Creath, K., Schmit, J., *N-point Spatial Phase-measurement Techniques for Non-destructive Testing*, Optics and Lasers in Engineering, 24, 1996, pg. 365-379.
- [13] Nobre, João P., *Sobre o Comportamento Mecânico de Camadas Superficiais dos Materiais: - Estudo do Contacto no Impacto Elasto-Plástico; Determinação do Estado de Tensões Residuais pela Técnica do Furo Incremental*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2000.
- [14] Wu, Z., Lu, J., Han, B., *Study of residual stress distribution by a combined method of moiré interferometry and incremental hole-drilling—part I, theory*, J Appl Mech 1998; 65 (9), 37-43.

- [15] Min, Y., Hong, M., Xi, Z., Lu, J., *Determination of residual stress by use of phase shifting moiré interferometry and hole-drilling method*, Optics and Lasers in Engineering, 44, 2006, pg. 68-79.
- [16] ASTM, *Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*, ASTM Standard E387-01, American Society for Testing and Materials, 2001.
- [17] Schajer, G. S., *Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements*, J. Eng. Mater. Tech., 4, vol. 103, 1981, pg. 157-163.
- [18] Lu, J.; James, M. R. and others, *Handbook of Measurement of Residual Stresses*, Society for Experimental, Inc., Edited by Jian Lu, 1996, pg. 19.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

CAPÍTULO 8

8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

8.1 Conclusões

A caracterização de tensões residuais assume especial importância sempre que são investigados componentes ou estruturas fabricados por processos tecnológicos que alteram severamente o seu equilíbrio interno. Embora possam ser utilizadas na sua medição técnicas experimentais conhecidas são poucos os grupos que assumem ter experiência nesta área. Desta forma o objectivo principal deste trabalho consistia no desenvolvimento de novas metodologias, experimentais/numéricas, para caracterizar tensões residuais.

O Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME) do DEMEGI possui uma larga experiência na medição de estados de tensão com técnicas de Mecânica Experimental como: interferometria holográfica, ESPI, *Shearography* e extensometria. Contudo estas técnicas são preferencialmente utilizadas para caracterizar deslocamentos fora do plano pelo que havia necessidade de desenvolver também algumas competências na medição de deslocamentos no plano. Estas medições são necessárias para a caracterização de tensões residuais e podem ser realizadas com recurso a técnicas de imagem como: o Moiré geométrico e interferométrico, a correlação de imagem e o ESPI no plano. Assim, foi também realizado neste trabalho o desenvolvimento de técnicas para a medição de campos de deslocamentos no plano com elevada resolução.

As técnicas convencionais de medição de tensões residuais têm algumas limitações difíceis de ultrapassar. As técnicas não destrutivas, como a difracção de raios X só permite a medição superficial (alguns micrómetros de profundidade) de materiais cristalinos, as outras técnicas de difracção como, difracção de neutrões ou *synchrotron* permitem a medição de tensões residuais em profundidades mais elevadas (dezenas de milímetros) mas também apenas em materiais cristalinos. Contudo, exigem equipamentos muitos sofisticados e com um custo muito elevado, existindo apenas um número muito limitado de instituições na Europa dispendo de tais equipamentos. A técnica semi-destrutiva do furo com extensometria, faz apenas uma medição pontual, apresenta grandes dificuldades na interpretação dos resultados e tem uma sensibilidade e resolução limitadas. Por último, as técnicas destrutivas inutilizam o elemento que se pretende medir.

As técnicas ópticas permitem a medição superficial de deslocamentos. Como tal foi necessário associar um método de relaxação de tensões residuais que gera-se deslocamentos superficiais. A técnica mais adaptada a este tipo de medições é o método do furo. Neste método executa-se um furo no elemento com tensões residuais para promover o relaxamento de tensões em torno do bordo do furo. É assim criado um campo de deslocamentos que pode ser medido com uma técnica óptica. Como, em superfícies planas, o relaxamento de tensões

ocorre predominantemente no plano, decidiu-se recorrer a técnicas ópticas que medissem esse tipo de deslocamentos.

Foram realizados vários ensaios preliminares para medição de deslocamentos no plano utilizando as técnicas ópticas referidas anteriormente. Desse programa de medições verificou-se que tanto o Moiré geométrico como a correlação de imagem têm uma resolução e sensibilidade insuficientes para medir os deslocamentos provocados pelo relaxamento de tensões. Assim, foram seleccionadas as técnicas com maior resolução e sensibilidade que são: o ESPI no plano e o Moiré interferométrico, tendo a segunda a vantagem de ser insensível a movimentos de corpo rígido, permitindo a sua utilização em estaleiro enquanto o ESPI no plano é mais vocacionado para ensaios laboratoriais. As medições feitas com estas técnicas foram tratadas com programas de processamento de imagem para determinar o campo de deslocamentos.

Para utilização do Moiré interferométrico foi necessário desenvolver todo o *set up* necessário aos ensaios. Como grandes dificuldades ultrapassadas no desenvolvimento desta técnica destacam-se a obtenção, replicação e revestimento das redes de difracção bem como o projecto e construção de um interferómetro que permite a medição em duas direcções ortogonais. Após vários estudos e testes, com o apoio de outros centros de investigação no revestimento metálico das redes foi possível obter redes de difracção com a qualidade adequada à medição de tensões residuais. No caso do ESPI, dado a grande experiência existente no LOME com a utilização desta técnica, foi possível adapta-la para medição no plano de forma mais expedita.

Foram também desenvolvidos alguns procedimentos experimentais e numéricos para obter os parâmetros de calibração necessários a cada medição. Foram realizadas medições de tensões residuais com técnicas ópticas utilizando os parâmetros de calibração obtidos pelo autor na determinação das tensões libertadas. No caso das técnicas de campo foi necessário desenvolver um procedimento numérico para calcular os parâmetros de calibração a partir do campo de deslocamentos. Este procedimento foi de grande utilidade na utilização do furo incremental com método integral para caracterizar tensões residuais variáveis em profundidade.

As técnicas desenvolvidas foram previamente testadas sobre um provete de calibração. O provete utilizado possuía simetria axial e possui um campo de tensões residuais conhecido que resultou da montagem com interferência de um disco num anel. Foram ainda realizadas medições para caracterizar as tensões residuais provocadas na superfície de uma peça por um processo de granalhagem (*Shot peening*). A medição das tensões residuais com as técnicas de Moiré interferométrico e ESPI no plano conduziu a valores medidos muito próximos dos valores determinados analiticamente. A medição das tensões residuais na peça granalhada foi executada utilizando o Moiré interferométrico associado à técnica do furo com o método incremental. Os resultados obtidos foram comparados com as medições feitas recorrendo às técnicas convencionais de medição de tensões residuais, a difracção de raios X e método do furo com extensometria. Foi verificada uma boa concordância entre os valores obtidos com as diferentes técnicas. De destacar que a medição com Moiré interferométrico permite ainda calcular directamente as tensões de corte, o que não se consegue com as técnicas convencionais utilizadas.

As técnicas ópticas utilizadas demonstraram estar bem adaptadas à medição de tensões residuais, tanto para o caso de tensões uniformes em profundidade (proвете de anel e disco interior com interferência) com para o caso em que ocorre uma forte variação dos valores das

tensões residuais em profundidade (peça granalhada). A técnica de ESPI no plano não necessita de qualquer preparação da superfície do elemento que se pretende medir, contudo dada a sua elevada sensibilidade a movimentos de corpo rígido, a sua utilização está praticamente limitada a ambientes laboratoriais. O Moiré interferométrico necessita duma preparação da superfície de medição muito cuidada: limpeza e replicação da rede de difracção. Contudo, pode ser utilizada em ambientes industriais, desde que seja desenvolvido um sistema portátil. Como principal conclusão deste trabalho pode afirmar-se que foi possível alcançar o objectivo principal que era o desenvolvimento duma ferramenta de medição de tensões residuais, com elevada resolução, e que pode ser uma alternativa viável às técnicas convencionais de medição de tensões residuais existentes no mercado.

8.2 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros resultantes do presente trabalho podem citar-se alguns desenvolvimentos destas técnicas no sentido de aumentar a sua precisão e facilitar a sua utilização. Uma das tarefas que deverá ser optimizada para poder permitir realizar redes de difracção de forma mais expedita prende-se com a replicação, revestimento e colagem das redes de elevada frequência na superfície dos objectos. Seria desejável poder dispor de uma câmara de deposição de alumínio por vaporização com a qual fosse realizado o recobrimento inicial das redes. Dispondo deste equipamento seria possível por em prática os conhecimentos adquiridos com o grupo de opto-electrónica da FCUP e tornar o processo autónomo em termos da actividade do LOME.

Quanto às matrizes a utilizar na replicação da rede deve referir-se que as utilizadas neste trabalho foram compradas. Contudo, o LOME possui experiência suficiente nas técnicas holográficas para poder desenvolver uma montagem que permita realizar a gravação destas redes. Um vidro plano recoberto com uma película de *fotorezist* poderia ser utilizado como base para a gravação de redes, quer de linhas, quer de quadrículas. Deve referir-se que em gravações holográficas são frequentemente utilizados meios de registo capazes de gravar 3000 linhas/mm.

Outro trabalho de grande relevância consiste no desenvolvimento de um sistema de medida que possa ser utilizado com maior facilidade. Este sistema poderia incluir câmaras vídeo de maior resolução e sistemas de imagem com maior ampliação no sentido de melhorar a resolução da medida.

Nos ensaios realizadas foram utilizadas medições de deslocamentos efectuadas à distância de 1.2 do raio do furo. Desta forma procura-se fugir da vizinhança do furo, onde normalmente aparece grande ruído devido ao cálculo de fase. Uma análise estatística dos erros introduzidos e o desenvolvimento de rotinas que permitam fixar com precisão o bordo do furo poderão permitir medições a distâncias mais próximas do centro do furo e, por isso, mais representativas. Esta análise de erro é também uma tarefa a levar a cabo.

Como o LOME optou por colocar todos os programas de processamento de imagem em código MATLAB seria também interessante adaptar algumas rotinas para a realização das tarefas mais importantes na medição de tensões residuais. Realizar a modulação temporal de fase *phase shifting* automaticamente, calcular o mapa de fase utilizando uma máscara para a região do furo, fazer o *unwrapping* e obter o campo de deslocamentos são algumas das tarefas que poderão ser optimizadas. Desta forma poderiam ser realizadas medições de forma expedita, utilizando o algoritmo sugerido no sub capítulo 7.4.

Finalmente seria interessante desenvolver um sistema portátil para a medição de tensões residuais com Moiré interferométrico. A montagem óptica ficaria alojada numa caixa que integraria também a ferramenta utilizada na furação. Este sistema poderia ser utilizado no método do furo incremental, para tal seria necessário retirar e recolocar a ferramenta de furação de forma automática para proceder às medições. A existência de um tal sistema permitiria vulgarizar a medição de tensões residuais.

Em paralelo com este trabalho foi parcialmente desenvolvido um sistema de medição de tensões residuais com ESPI radial, que ainda não foi terminado por dificuldades na montagem do sistema. O autor considera que a conclusão deste sistema poderá permitir efectuar medições de deslocamentos radiais e obter informação para cálculo de tensões residuais. Embora esta ideia esteja a ser desenvolvida por outro grupo de investigação os resultados que vierem a ser obtidos poderão ser relacionados com os desse grupo procurando assim desenvolver um sistema de medição alternativo ao baseado no método de Moiré.

ANEXO A

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO

ANEXO A

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO

O material ensaiado foi uma liga de alumínio 1050 com 99,5% de Al [1]. O alumínio 1050 é utilizado para uso geral, não tendo propriedades de especial referência dentro das ligas de alumínio. Este material pode ser utilizado sob diferentes formas (chapa, barra, tubos, etc.), no caso em análise os provetes utilizados foram obtidos a partir de chapa.

O Ensaio de tracção seguiu a norma portuguesa para ensaios de tracção, NP 10002-1 [2]. A geometria e as dimensões do provete estão normalizadas e encontram-se representadas na figura seguinte.

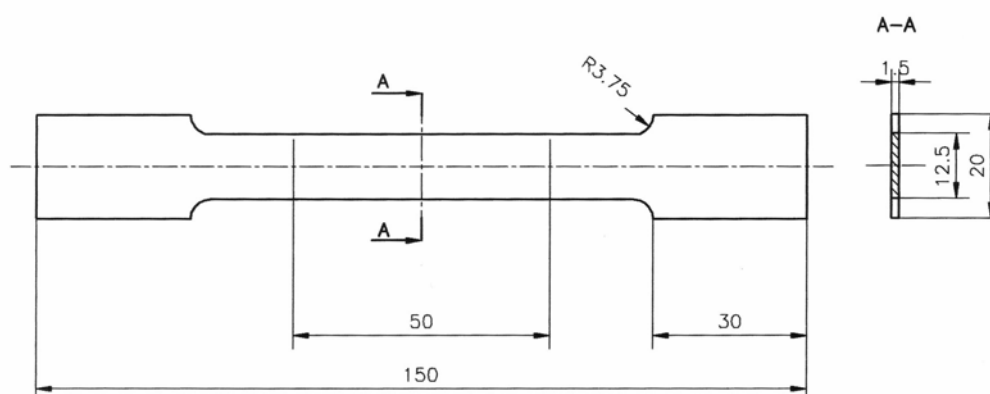
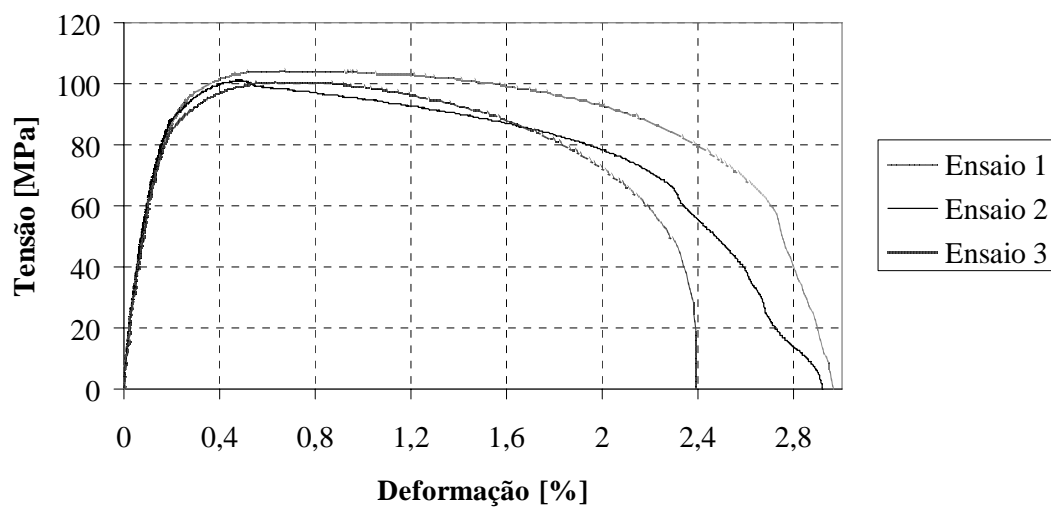


Figura A. 1 Geometria e dimensões do provete para ensaio de tracção.

Foi utilizada uma máquina de ensaios de tracção Instron Mod.4485 com uma célula de carga: 200KN, o ensaio realizou-se a uma velocidade de 0.6 mm/minuto. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais do Instituto Politécnico de Bragança. Na Figura A.2 representam-se as curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios.

Ensaio de Tracção**Figura A.2** Curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios de tracção.

Da curva anteriormente representada podem ser obtidas as seguintes propriedades mecânicas:

Tabela A.1 Valores médios das propriedades mecânicas do alumínio 1050 obtidas nos ensaios de tracção.

Módulo de Elasticidade [GPa]	Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação após ruptura [%]
69	96	102	2.8

Referências:

- [1] *Metals Handbook – Properties and selection: nonferrous alloys and pure metals*, Vol. 2, Ninth Edition, American Society for Metals, Ohio, 1979.
- [2] NP EN 10002-1, *Materiais Metálicos – Ensaio de Tracção. Parte I: Método de Ensaio à Temperatura Ambiente*, Elaborado por CT12, IPQ, 1990.

ANEXO B

MECANISMO DE TRACÇÃO

ANEXO B

MECANISMO DE TRACÇÃO

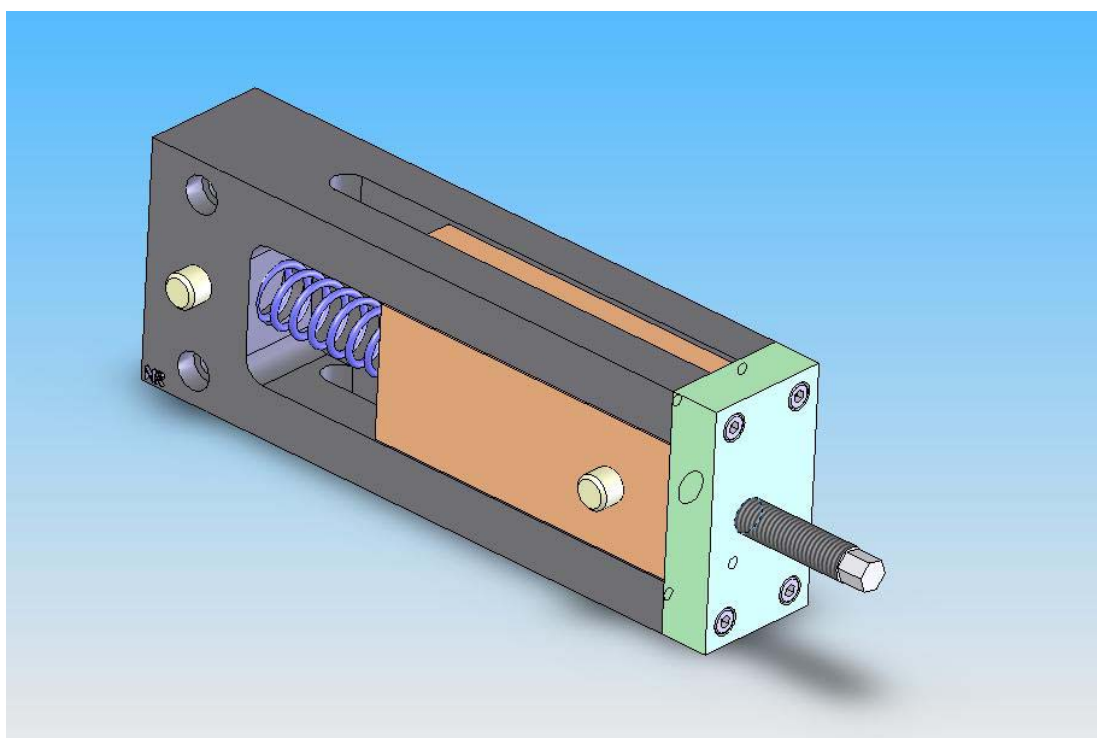
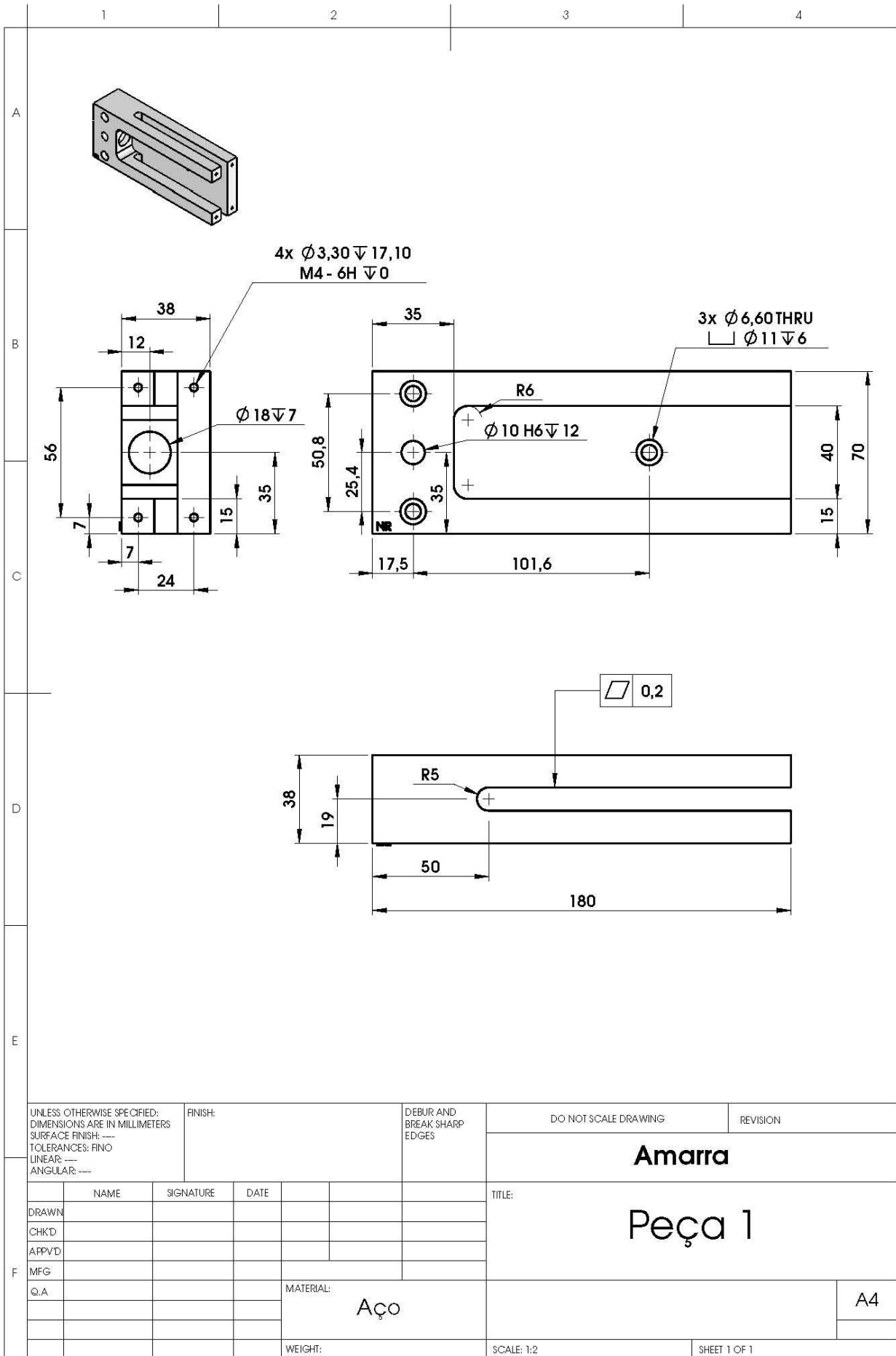


Figura B2.1 Desenho de conjunto do sistema de tracção



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH: ---
 TOLERANCES: FINE
 LINEAR: ---
 ANGULAR: ---

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

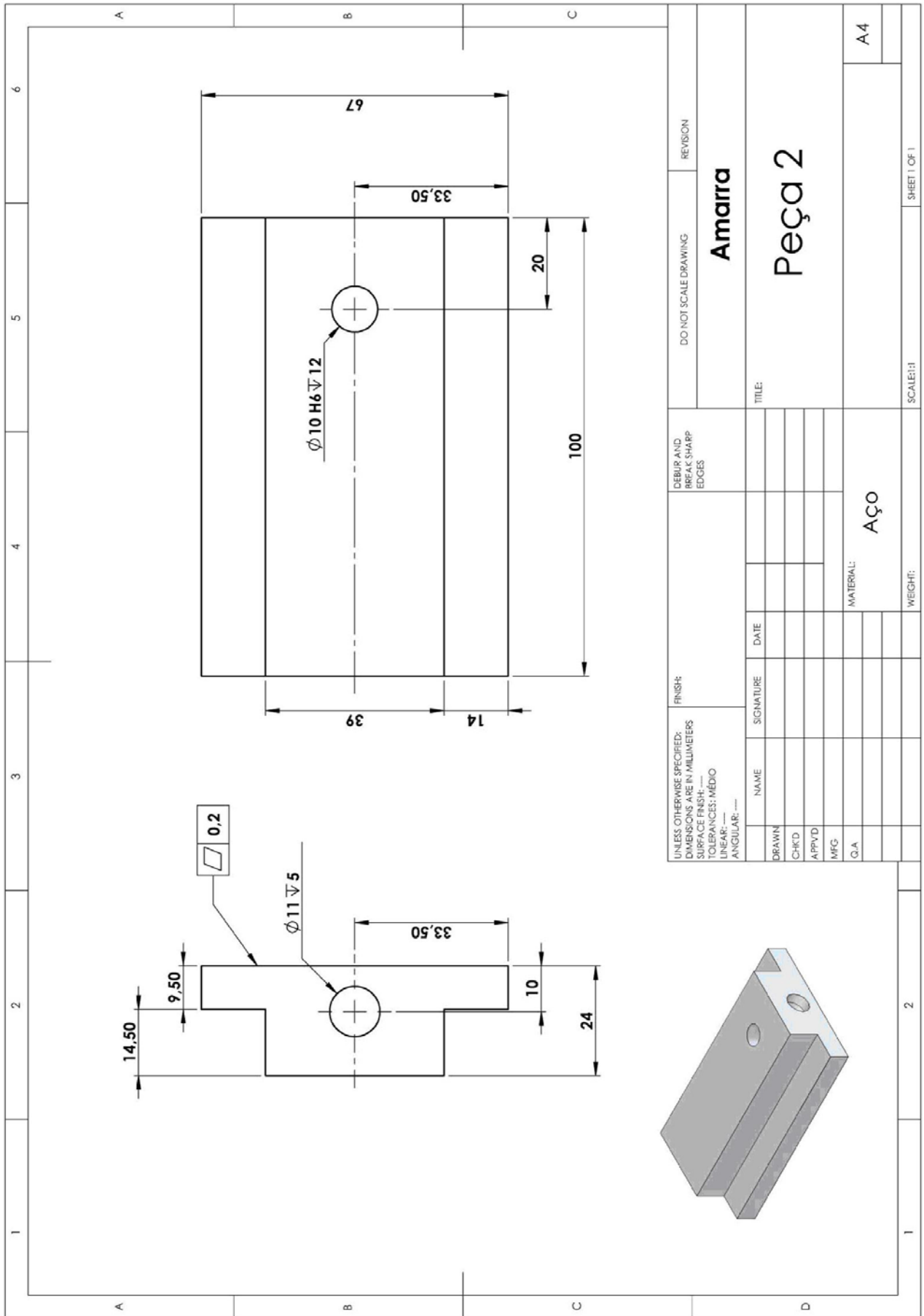
REVISION

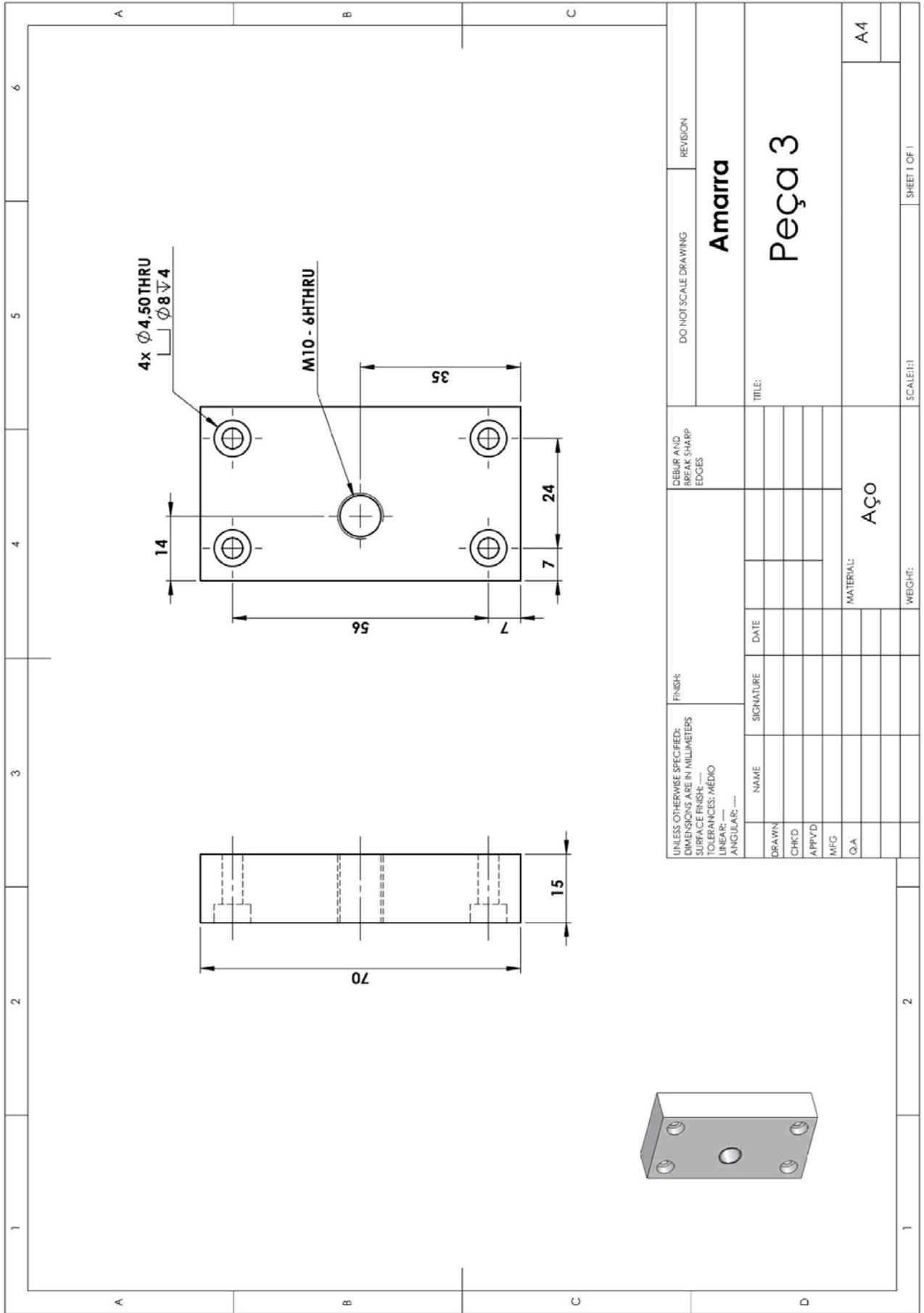
Amarra

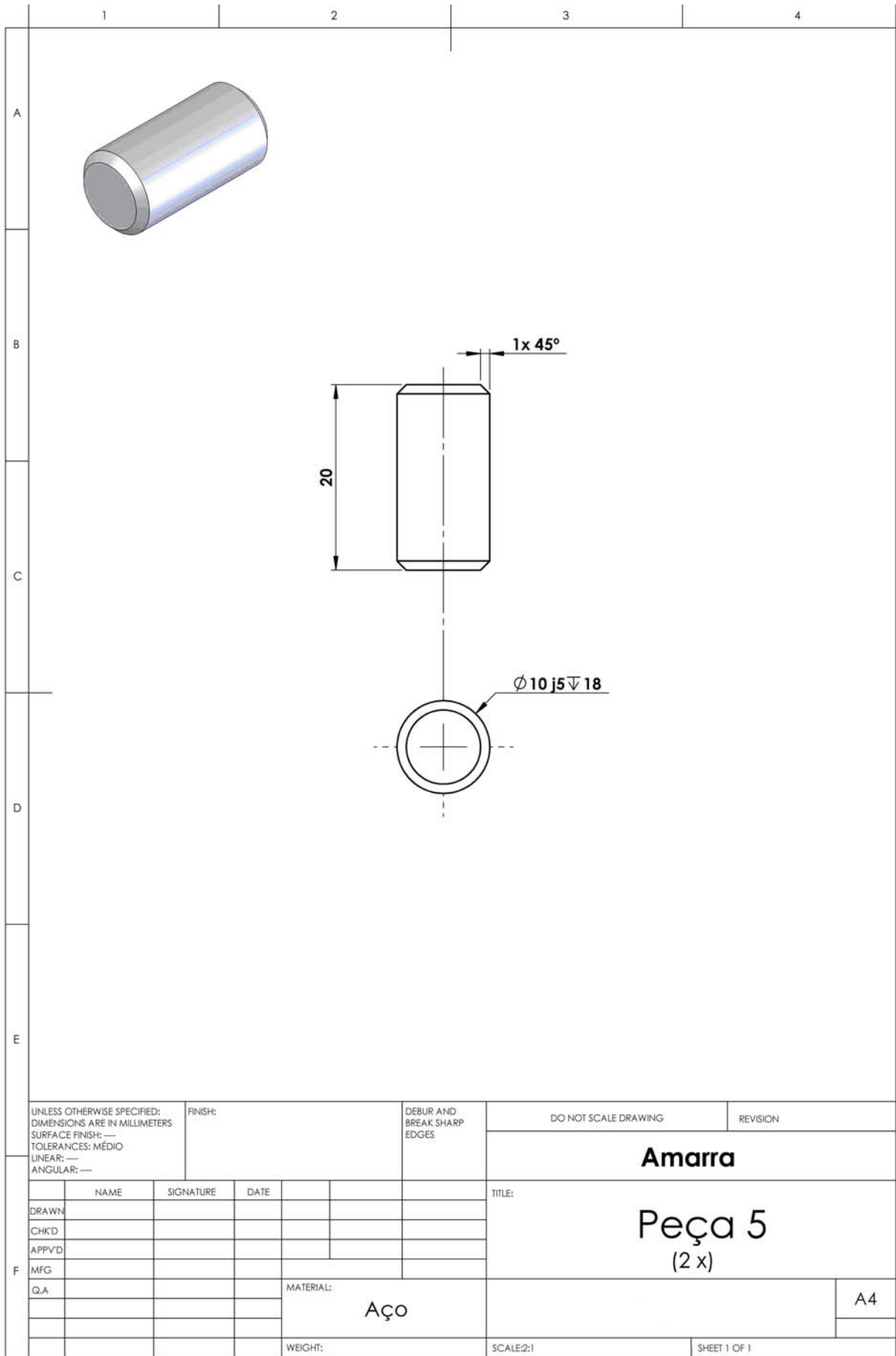
Peça 1

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHKD					
APPV'D					
MFG					
Q.A				MATERIAL:	Aço
				WEIGHT:	

TITLE:	Amarra	REVISION	
	Peça 1		
			A4
SCALE: 1:2		SHEET 1 OF 1	







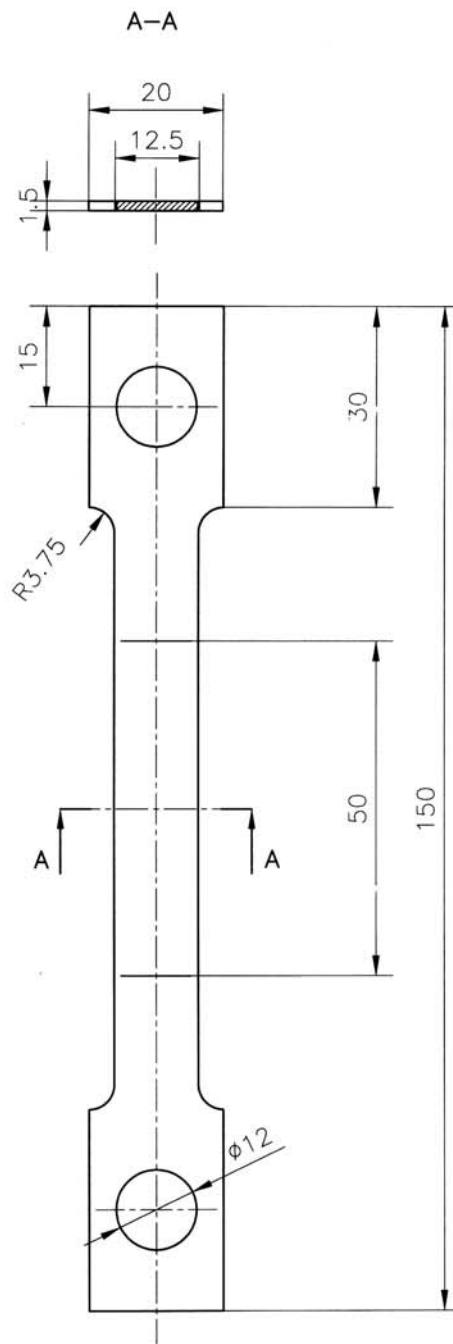
ANEXO C

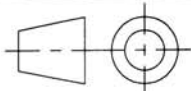
DIMENSÕES E GEOMETRIA DO PROVETE

ANEXO C**DIMENSÕES E GEOMETRIA DO PROVETE**

O provete definido no desenho de definição corresponde a um provete fabricado numa liga de alumínio (1050). As suas dimensões e geometria estão de acordo com a norma portuguesa de ensaios de tracção para provetes planos, contudo fez-se uma adaptação para permitir a sua utilização no ensaio que se desenvolveu neste trabalho, sendo esta alteração correspondente aos dois furos de 12 mm de diâmetro. Estes foram realizados para a fixação do provete nos pinos do sistema de tracção utilizado.

FACULDADE DE ENGENHARIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA E GESTAO INDUSTRIAL PORTO	LABORATORIO DE ÓPTICA E MECÂNICA ESTRUTURAL		
--	--	--	--



Quantidade: 1 Material: Al	Des. Verif.	Datas	Nomes	Provete	DEMEGI - FEUP
	Escala 1/1 Toler.		Substituí: Substituído por:		

ANEXO D

INTERFERÓMETRO DE MOIRÉ

ANEXO D

INTERFERÓMETRO DE MOIRÉ

O interferómetro desenvolvido para este trabalho baseou-se nos interferómetros de quatro feixes descritos em alguma bibliografia [1, 2]. Este tipo de interferómetro permite a medição de deslocamentos em duas direcções sem a necessidade de rodar o provete. Para alterar a direcção de medição só há a necessidade de cortar parte do feixe, a componente que passa vai permitir a medição numa direcção, criando a rede virtual correspondente a essa direcção, tal como está indicado e explicado no capítulo 3. Na Figura D.1 está representado, esquematicamente, a interferómetro de quatro feixes utilizado neste trabalho.

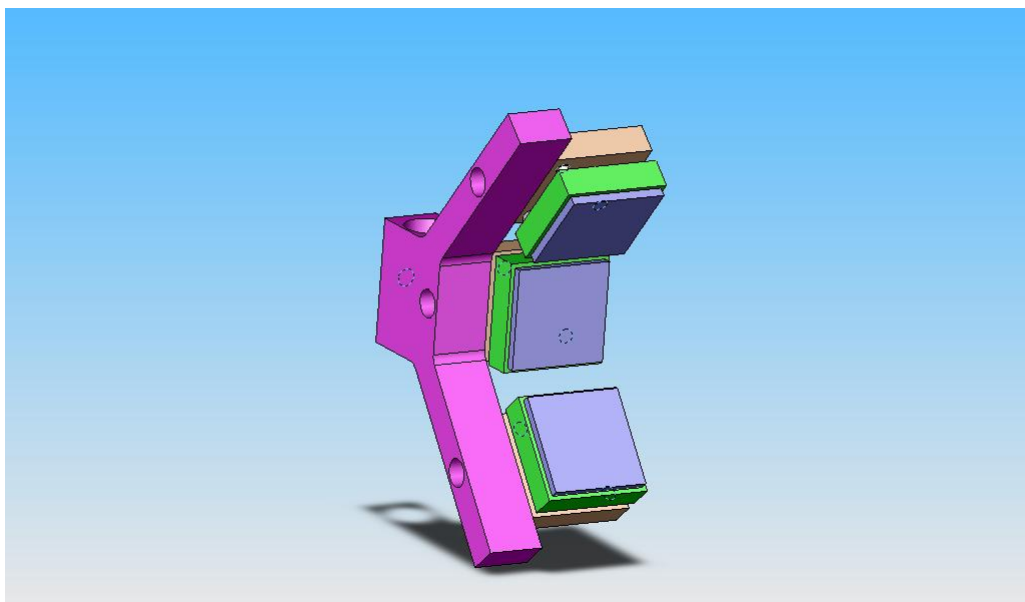


Figura D.1 Representação esquemática do interferómetro de Moiré.

Na figura seguinte está representado desenho de definição do corpo principal do interferómetro de Moiré.

Referências:

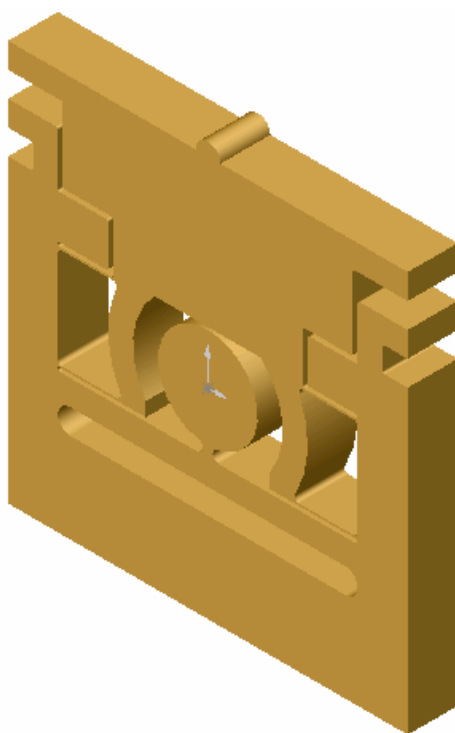
- [1] Post, D., Han, B., Ifju, P., *High Sensitivity Moiré – Experimental Analysis for Mechanics and Materials*, Edited Springer-Verlag, New York, 1994.
- [2] Cloud, G., *Optical Methods of Engineering Analysis*, Cambridge University Press, 1998.

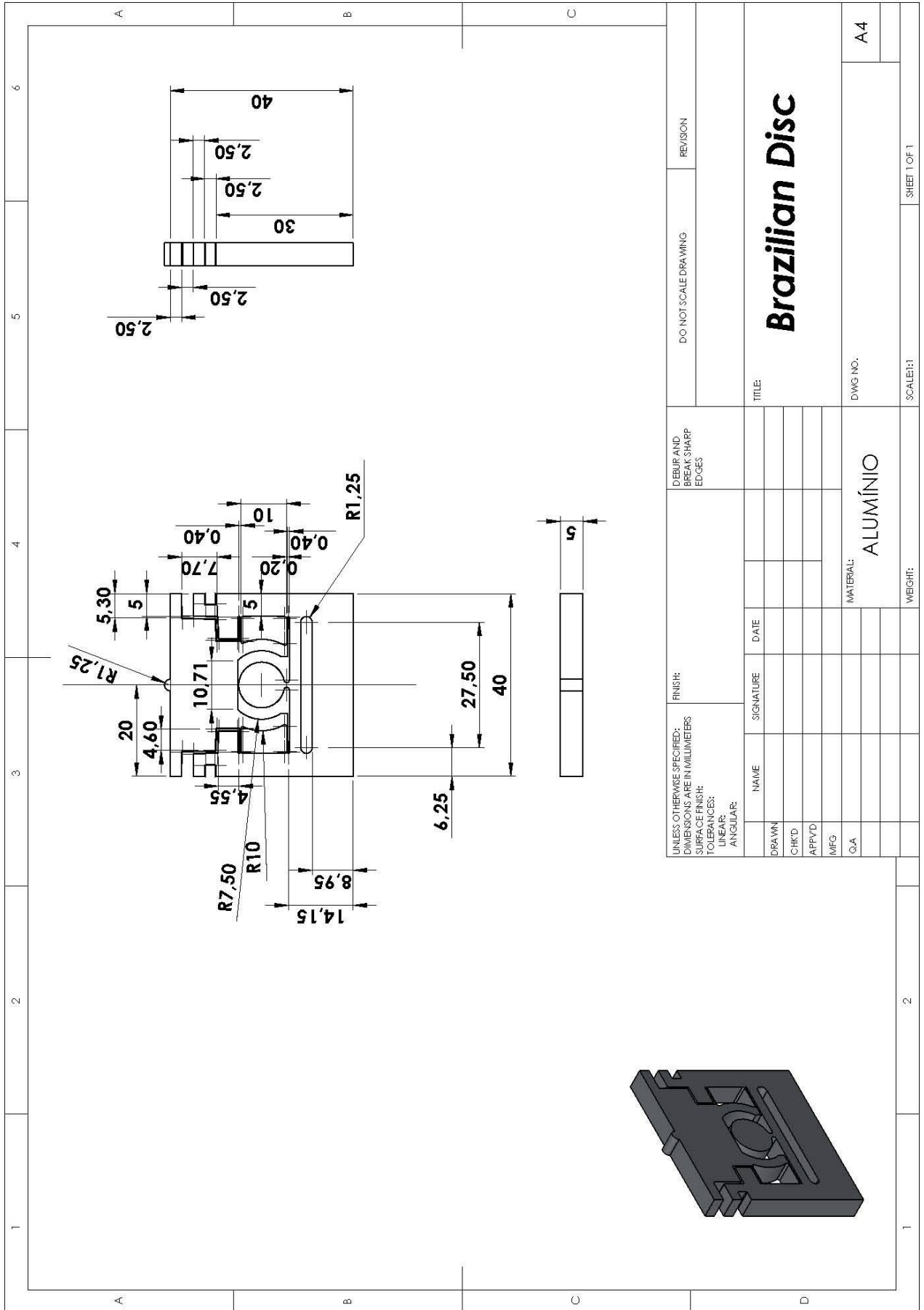
ANEXO E

DIMENSÕES E GEOMETRIA DO *BRAZILIAN DISC*

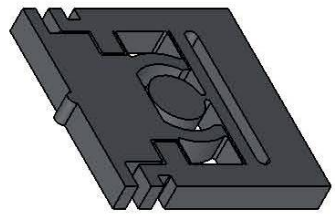
ANEXO E**DIMENSÕES E GEOMETRIA DO *BRAZILAN DISC***

O provete protótipo *Brazilian Disc* definido no desenho de definição corresponde a um provete fabricado numa liga de alumínio.





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:		TOLERANCES:		NAME		SIGNATURE		DATE	
LINEAR:		ANGULAR:		DRAWN		CHKD		APPLYD	
MFG		Q.A		MFG		Q.A		MATERIAL:	
TITLE:		DWSG NO.:		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1		WEIGHT:	
Brazilian Disc		ALUMÍNIO		A4					



ANEXO F

DISPOSITIVO DE FLEXÃO ESTÁTICA PARA MADEIRA

ANEXO F**DISPOSITIVO DE FLEXÃO ESTÁTICA PARA MADEIRA**

O desenvolvimento do sistema para ensaios de flexão estática em madeira baseou-se nas recomendações da norma NP-619, para este tipo de ensaios. Na figura seguinte pode ver-se a representação esquemática da montagem do provete de madeira no dispositivo de flexão.

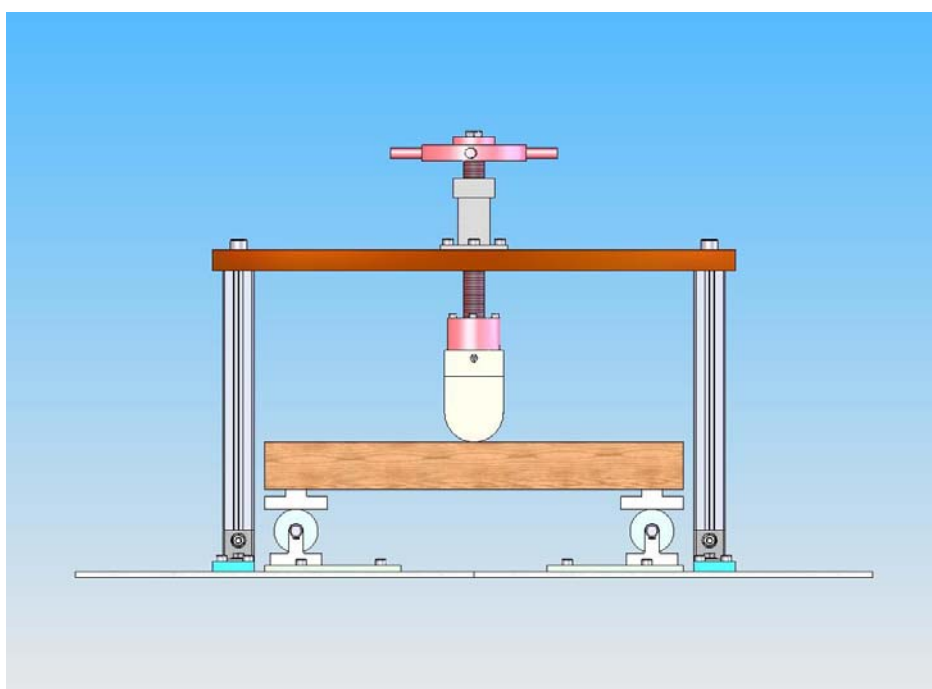
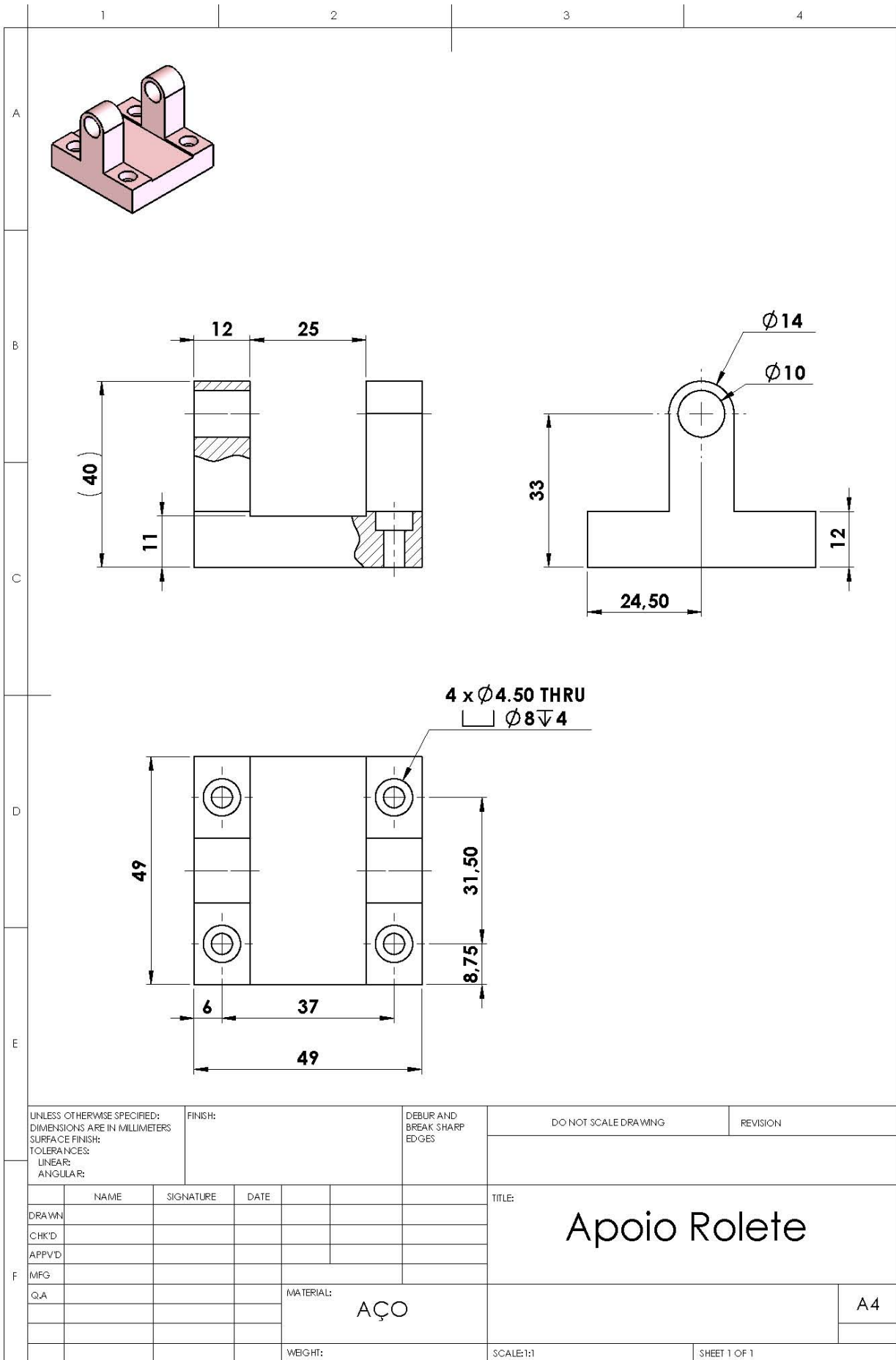
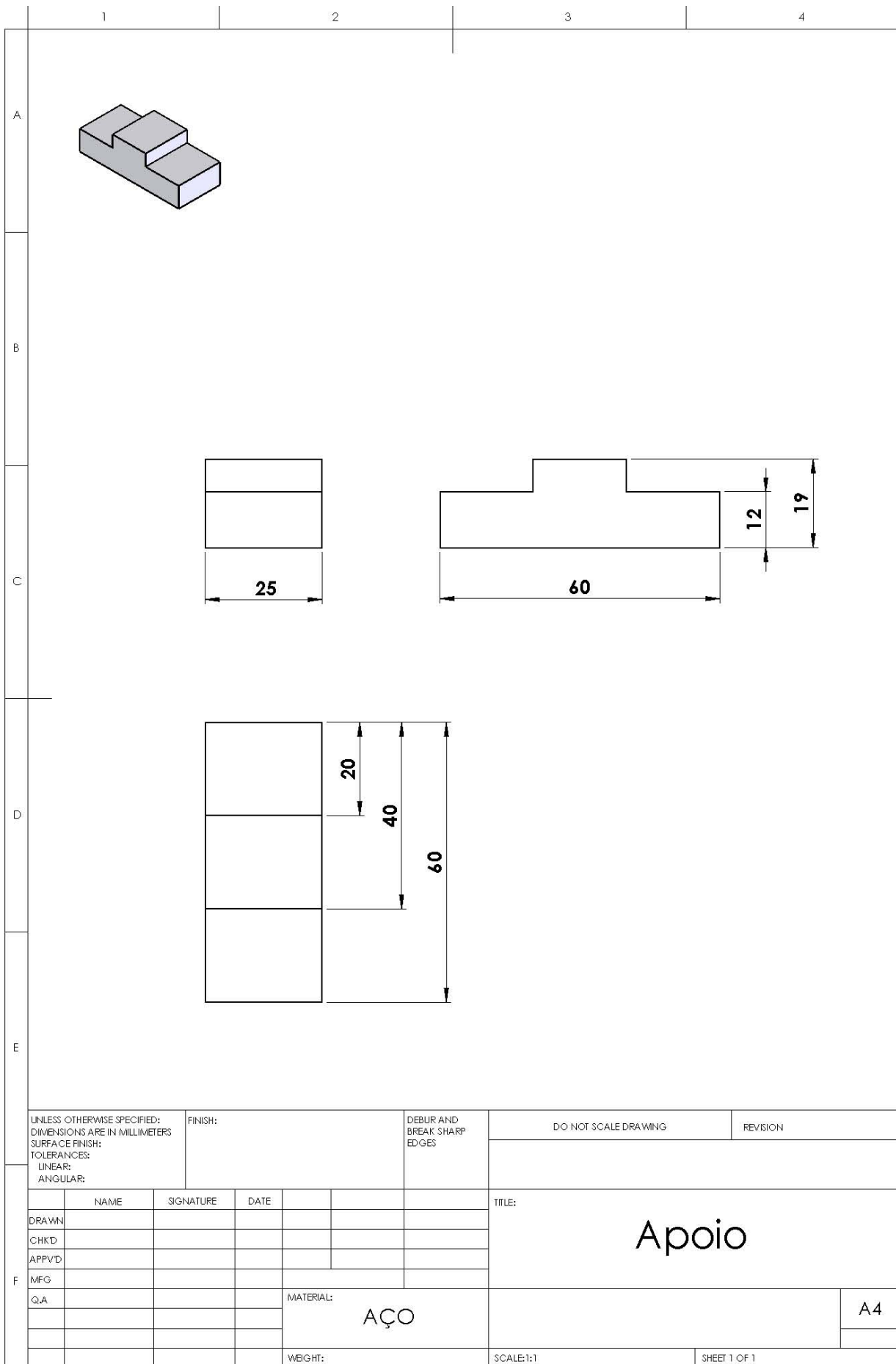
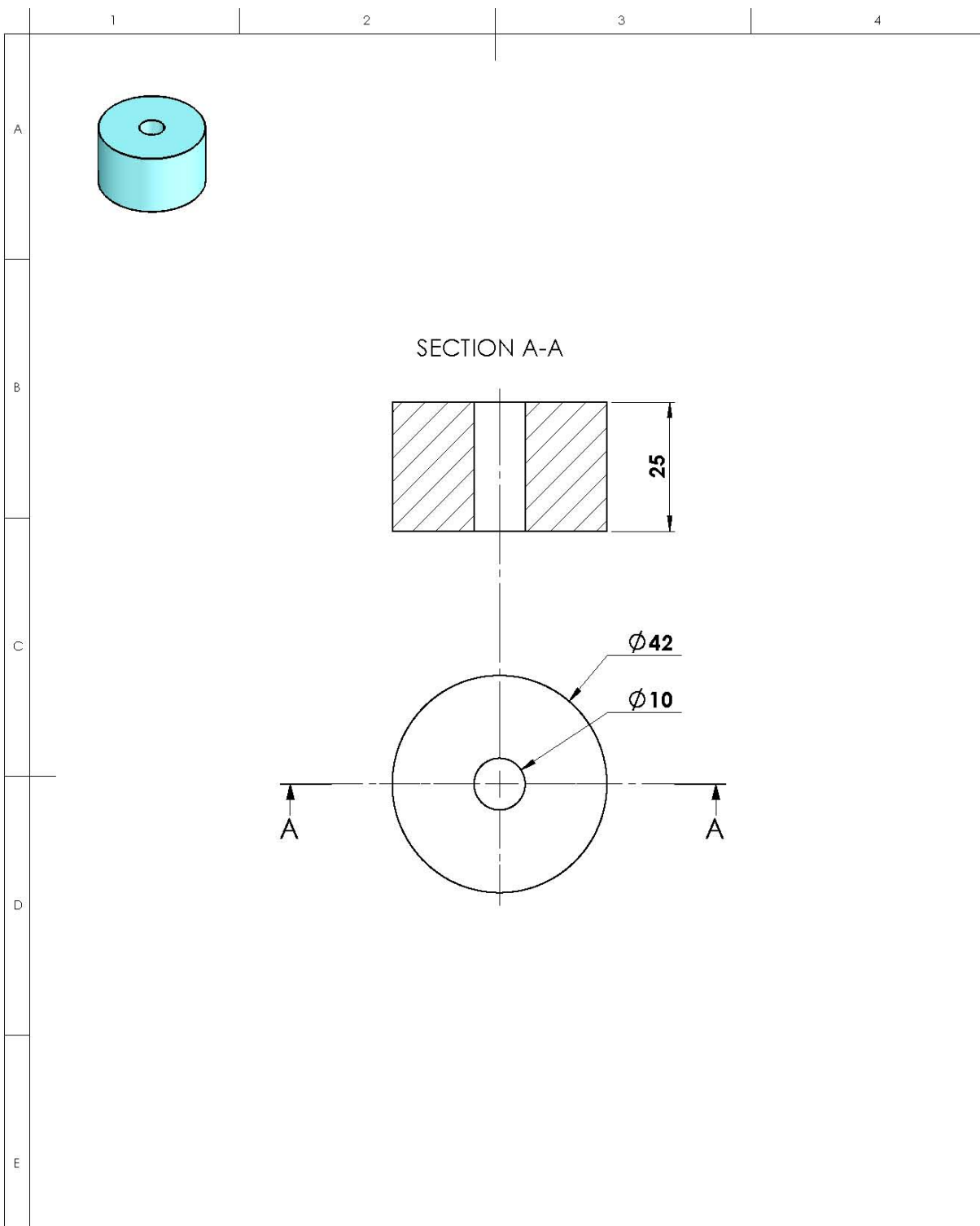


Figura F.1 Representação esquemática do dispositivo de flexão para madeira.

Nas figuras que se seguem estão representados os desenhos de definição dos principais elementos utilizados e desenvolvidos para o sistema de flexão estática para madeira.







UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHK'D			
APP'VD			

TITLE:

Rolete

F	Q.A.			

MATERIAL:
AÇO

A4

WEIGHT:

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1

ANEXO G

CALIBRAÇÃO EXPERIMENTAL

ANEXO G

CALIBRAÇÃO EXPERIMENTAL

As calibrações experimentais deverão ser feitas, preferencialmente, recorrendo a um provete plano que é traccionado axialmente.

No trabalho que foi desenvolvido no LOME para a determinação dos coeficientes de calibração \bar{A} e \bar{B} utilizou-se como material um aço ao carbono com a designação de S235 (módulo de elasticidade de 200 GPa, coeficiente de Poisson de 0.29) e uma roseta de extensómetros do tipo A [1] com designação EA-06-062RE-120 fabricada pela Vishay. O provete tem as dimensões e geometria indicada na Figura G.1.

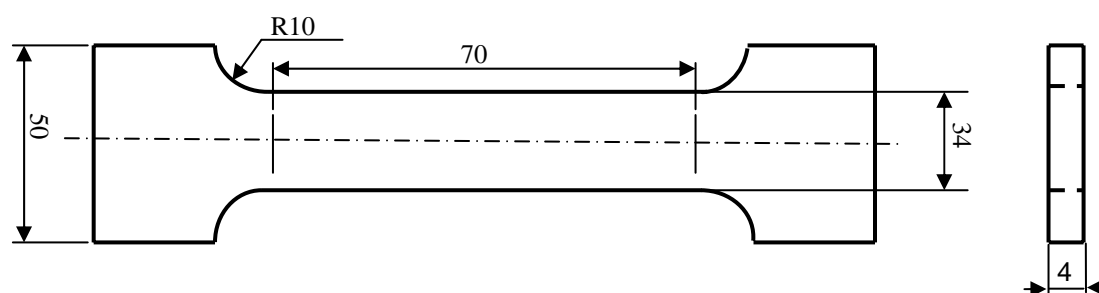


Figura G. 1 Dimensões e geometria do provete utilizado na determinação dos coeficientes de calibração.

As dimensões do provete tiveram em consideração o problema do efeito de bordo, para o evitar considerou-se que a largura deveria ser superior a $6r_m$ (r_m o raio do centro dos extensómetros da roseta), a espessura teria, no mínimo, $2.4r_m$ e o comprimento entre as amarras seria superior a cinco vezes o valor da largura para assegurar a uniformidade do campo de tensões aplicado [2].

O material do provete deve estar o mais liberto possível de tensões residuais [2], assim fez-se um tratamento térmico ao provete para libertação de tensões. Segundo Soares [3], o tratamento térmico adequado para a libertação de tensões é um recozido de distensão, que consiste em manter as peças no forno entre meia hora a duas horas, a uma temperatura compreendida num intervalo de 500 e 650°C. Após esse período deve fazer-se um arrefecimento lento para evitar o aparecimento de tensões residuais. Na figura G.2 está indicado o tratamento térmico do provete. O arrefecimento foi muito lento (no forno) e para evitar a oxidação e descarbonização utilizou-se um forno de atmosfera neutra.

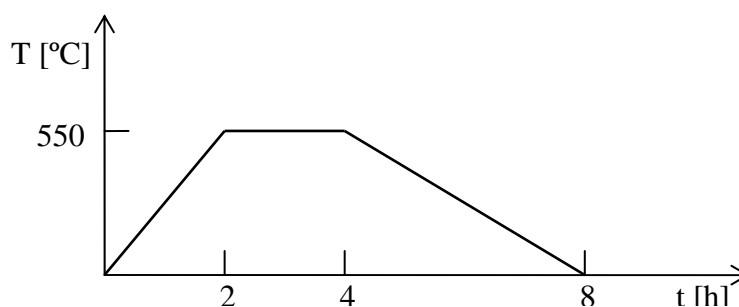


Figura G.2 Recozido de distensão para a libertação de tensões residuais no provete.

Colou-se a roseta de extensómetros no centro do provete, tendo o cuidado de colocar o extensómetro 1 da roseta na direcção paralela ao eixo de tracção e o extensómetro 3 na direcção perpendicular a esse eixo.

O ensaio foi realizado segundo a norma ASTM E837-01. Segundo esta, a tensão aplicada no ensaio não deverá ser superior a um terço da tensão de cedência do material e a razão entre a profundidade do furo (z) e o diâmetro do centro dos extensómetros da roseta (D) deverá ser de 0.4.

Assim, para o caso em estudo a tensão de cedência do aço S235 é de cerca de 350 MPa, no ensaio aplicou-se uma tensão de 112 MPa.

A razão $z/D=0.4$, como o valor de D da roseta utilizada é 5.13 mm então a profundidade do furo é de 2.1 mm.

Após a análise e avaliação destes coeficientes procedeu-se ao ensaio em que se utilizou uma máquina de ensaios de tracção Tinius Olsen.

Os passos dados no procedimento da calibração foram, resumidamente, os seguintes:

1- Colocação do provete na máquina de tracção e fazer-se o zero do circuito da roseta de extensómetros.



Figura G.3 Colocação do provete na máquina de ensaios e o zero do circuito da roseta de extensómetros.

2- Aplicação da carga, 14700 N, no provete até à obtenção da tensão de calibração desejada, 112 MPa.

3- Medição das deformações ε_1' e ε_3' , antes da furação.

ε_1' [μ strain]	ε_3' [μ strain]
545	-145

4- Descarregar o provete e retirá-lo da máquina de ensaios de tracção.

5- Introduzir o furo no provete com uma profundidade do furo de 2.1 mm, no centro da roseta de extensómetros. Recorre-se à maquinagem de alta velocidade (400000 rpm).

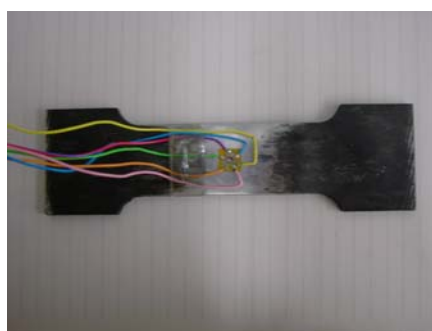


Figura G.4 Provete após furação.

6- Recolocação do provete na máquina de ensaios de tracção, refazer o zero do circuito da roseta de extensómetros e reaplicar uma carga idêntica à anterior, 14700 N.

7- Medição das deformações ε_1'' e ε_3'' , depois da furação.

ε_1'' [μ strain]	ε_3'' [μ strain]
305	-76

As deformações de calibração correspondentes à carga de 14700 N e tensão de 112 MPa são:

$$\varepsilon_{c1} = \varepsilon_1'' - \varepsilon_1'$$

$$\varepsilon_{c3} = \varepsilon_3'' - \varepsilon_3'$$

Para este caso seria,

ε_{c1} [μ strain]	ε_{c3} [μ strain]
-240	-69

Uma vez que a calibração é feita com as tensões principais diferentes de zero, podem desenvolver-se expressões para os valores calibrados \bar{A} e \bar{B} .

Sabendo que a deformação radial pode ser expressa pela equação:

$$\varepsilon_c = \sigma_c \left[\bar{A} + \bar{B} \cos(2\alpha) \right]$$

Então, substituindo α por 0° no extensômetro 1 e 90° no extensômetro 3, teríamos:

$$\varepsilon_{c1} = \sigma_c \left[\bar{A} + \bar{B} \cos(0^\circ) \right] = \sigma_c (\bar{A} + \bar{B})$$

$$\varepsilon_{c3} = \sigma_c \left[\bar{A} + \bar{B} \cos(2 \times 90^\circ) \right] = \sigma_c (\bar{A} - \bar{B})$$

Desenvolvendo as equações anteriores, tem-se:

$$\bar{A} = \frac{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c3}}{2\sigma_c}$$

$$\bar{B} = \frac{\varepsilon_{c1} - \varepsilon_{c3}}{2\sigma_c}$$

A partir das equações pode determinar-se os valores de \bar{A} e \bar{B} .

\bar{A}	\bar{B}
-7.68E-13	-1.39E-12

O furo foi realizado com uma fresa de 1,6 mm de diâmetro, contudo o sistema de furação tinha alguma excentricidade o que originou a maquinagem de um furo um pouco maior, mas dentro das grandezas permitidas pela norma. O furo foi medido com o sistema óptico da máquina de furação e tem um diâmetro de 2,3 mm.



Figura G.5 Medição do diâmetro do furo com o sistema óptico da máquina de furação.

Recorrendo à norma é possível determinar o valor dos coeficientes de calibração assim para um $z/D=0.4$, $D_0/D=0,45$ (D_0 é o diâmetro do furo) os coeficientes de calibração obtidos a partir da norma [1] foram:

\bar{A}	\bar{B}
-7.71E-13	-1.44E-12

O que corresponde a um erro relativo de:

	\bar{A}	\bar{B}
Erro (%)	0.4	3.7

Referências:

- [1] ASTM, *Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*, ASTM Standard E387-01, American Society for Testing and Materials, 2001.
- [2] Lu, J; James, M. R. and others, *Handbook of Measurement of Residual Stresses*, Society for Experimental, Inc., Edited by Jian Lu, 1996.
- [3] Soares, Pinto, *Aços – características e tratamentos*, Editado pela Livraria Livroluz, 4ª Edição, 1987.

ANEXO H

SISTEMA DE FURAÇÃO

ANEXO H

SISTEMA DE FURAÇÃO

O sistema de furação utilizado e desenvolvido para este trabalho teve em consideração o posicionamento dos provetes, o atravancamento das montagens e a região iluminada do provete. O sistema foi desenvolvido para ter uma elevada flexibilidade e poder utilizar uma turbina de ar comprimido ou um berbequim eléctrico. Na figura seguinte está representado esquematicamente o sistema de furação em que é utilizado uma turbina de ar comprimido.

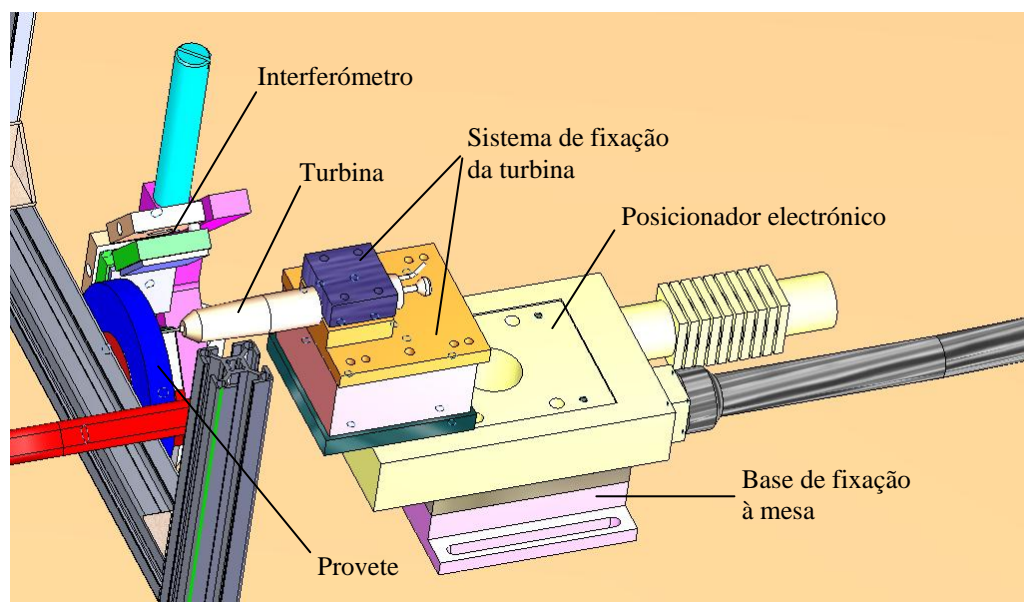
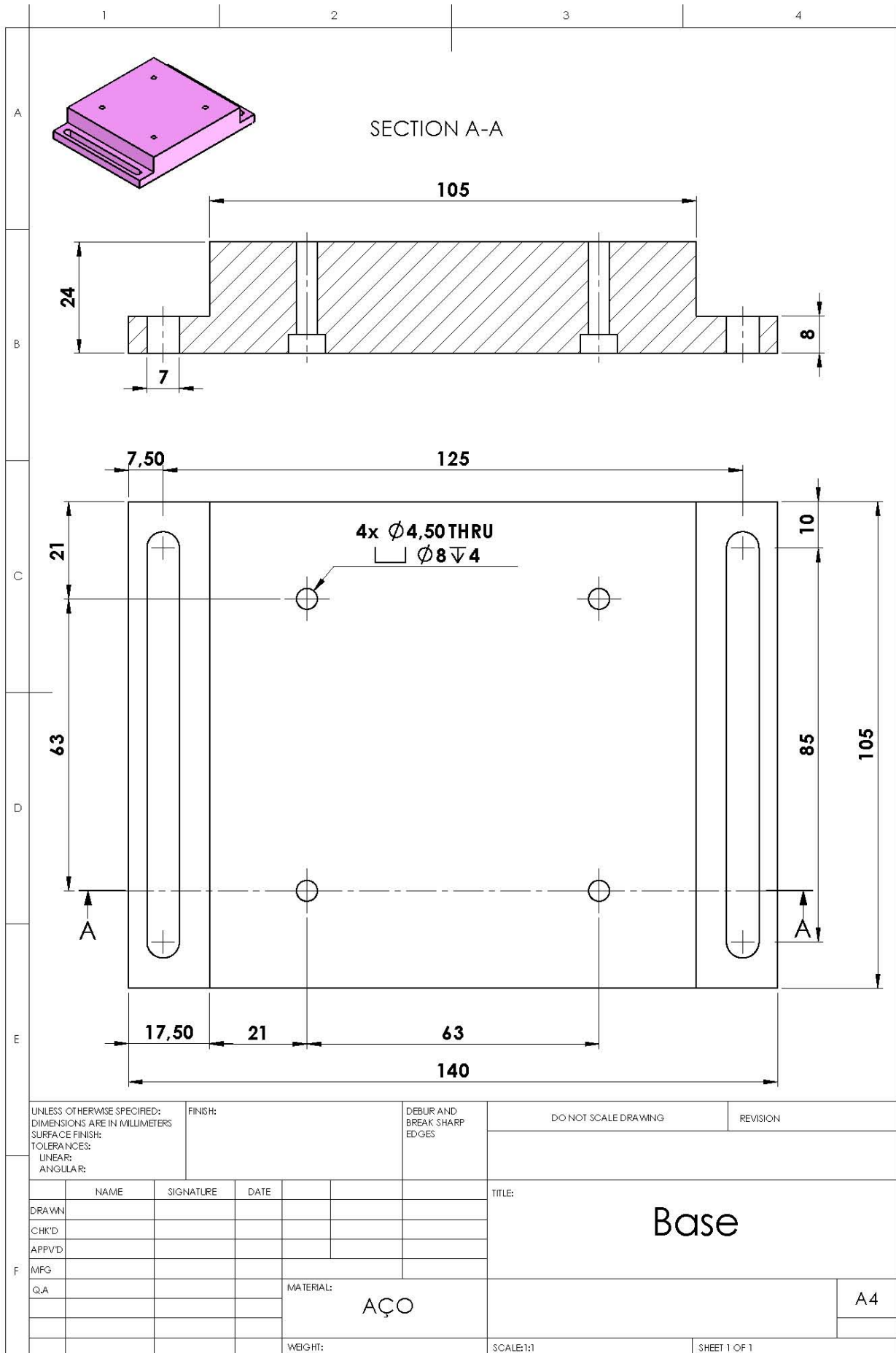
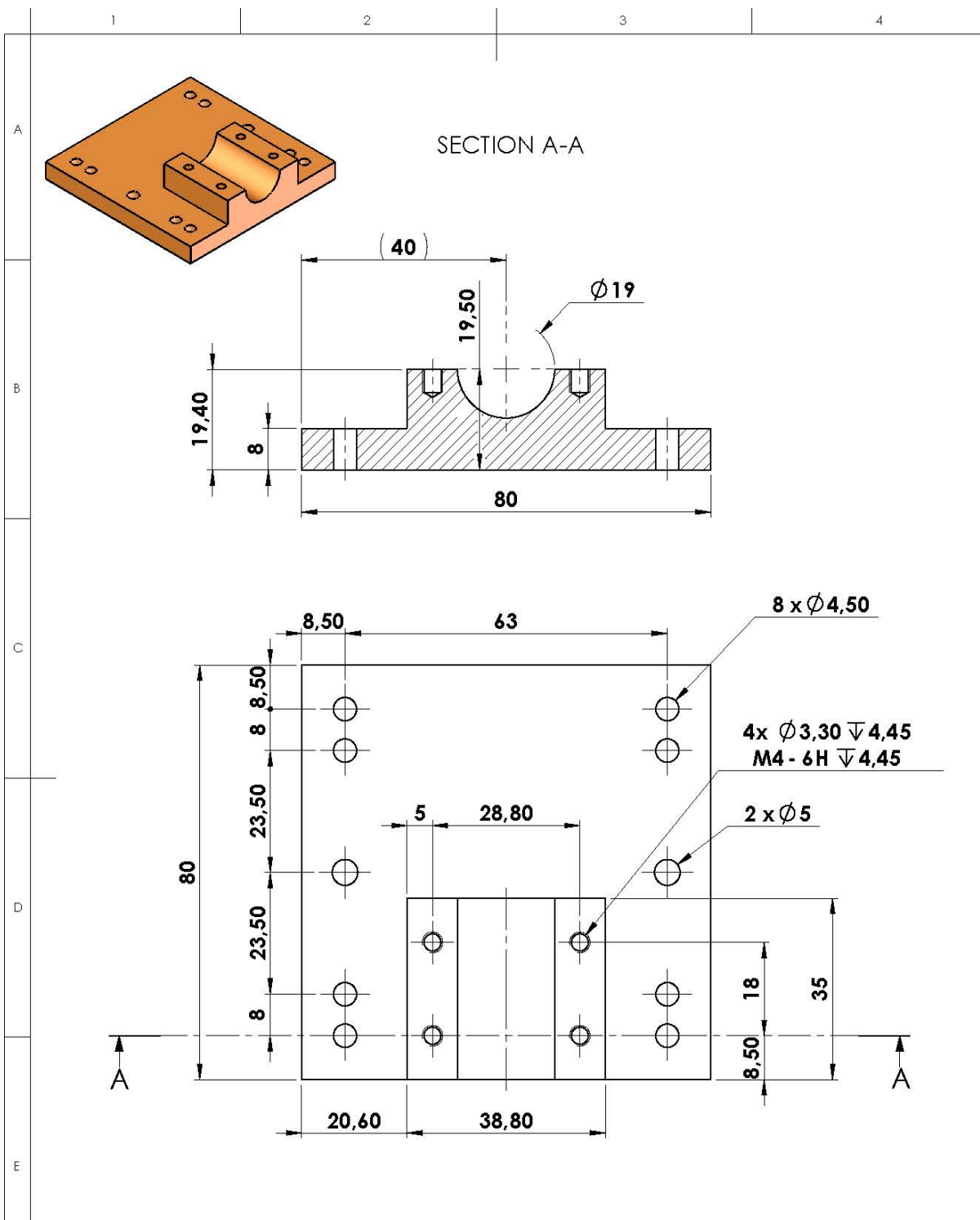


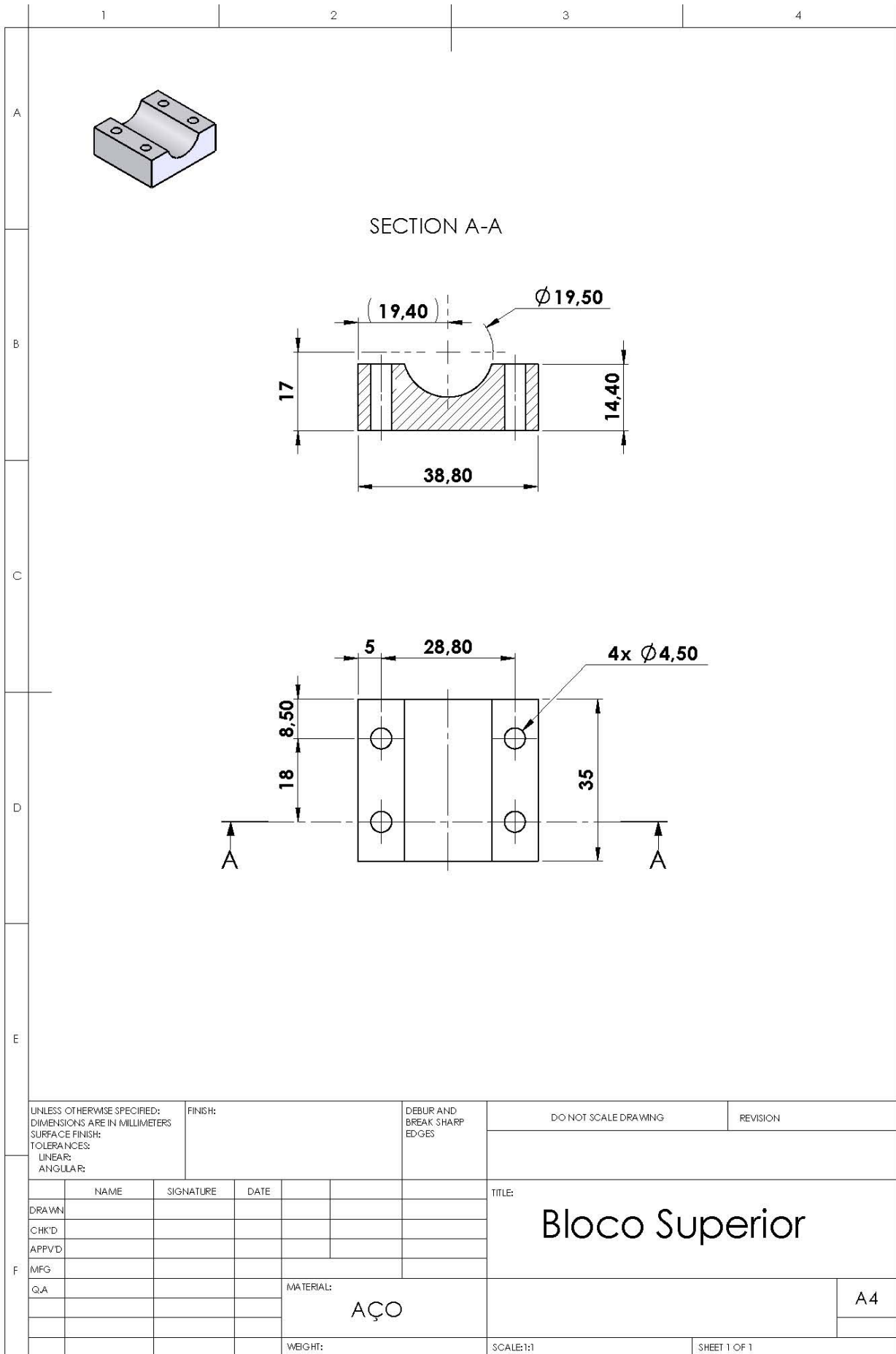
Figura H.1 Representação esquemática do sistema de furação e da montagem óptica para Moiré interferométrico.

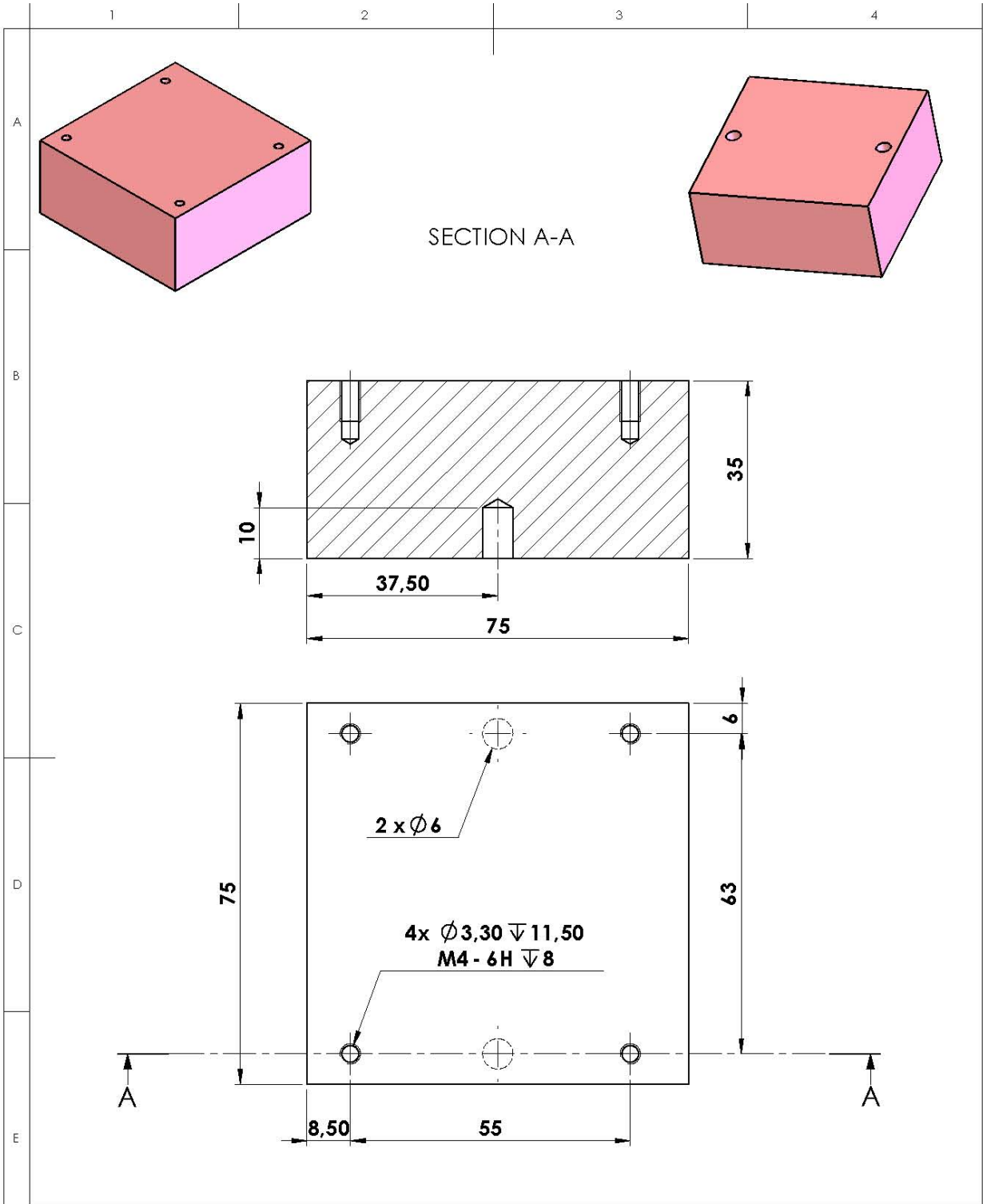
Nas figuras seguintes estão representados os desenhos de definição de alguns elementos importantes do sistema de furação.





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN						<h1>Bloco Inferior</h1>			
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A				MATERIAL:		<h2>AÇO</h2>			
				WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1	





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:		Calço	
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
Q.A						MATERIAL:		A4	
						ALUMÍNIO			
						WEIGHT:		SCALE: 1:1	
								SHEET 1 OF 1	

