



# 70<sup>o</sup> Congresso Nacional de Mecânica Experimental

APAET 2008

Abílio M.P. de Jesus & Jorge T.Q.S. Pinto (Eds.)



Universidade de  
Trás-os-Montes e Alto Douro

**7º Congresso Nacional de Mecânica Experimental**

**APAET 2008**

UTAD, Vila Real, Portugal, 23-25 de Janeiro de 2008

Livro de Resumos/ Abílio M.P. de Jesus, Jorge T.Q.S. Pinto (Eds.)

© 2008 APAET – Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões/  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa  
Tel: 21 844 3238; Fax: 21 844 3023; e-mail: apaet@lnec.pt; <http://www-ext.lnec.pt/APAET/>

Capa:

Design de Abílio M.P. de Jesus

Fotos: cima para baixo – ensaio de ligação de madeira com corte duplo e cavilha única (Santos, C.L.; Jesus, A.M.P.; Morais, J.J.L.) – ensaio DCB de tecido ósseo cortical (Morais, J.J.L.; Dourado, R.) – ensaio iosipescu aplicado à madeira de *Pinus Pinaster* (Xavier, J.M.C.; Morais, J.J.L.) – instrumentação da tubuladura de reservatório (Jesus, A.M.P).

Impresso por: Sector Gráfico da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Depósito Legal: 269753/08

ISBN: 978-972-669-851-7

CONGRESSO NACIONAL DE MECÂNICA EXPERIMENTAL, 7º, Vila Real, 2008

Congresso Nacional de Mecânica Experimental: Livro de resumos / ed.  
Abílio M. P. de Jesus, Jorge T. Q. S. Pinto. – Lisboa: APAET, 2008.

ISBN 978-972-669-851-7

D.L.:PT 269753/08

I – Jesus, Abílio M. P. de, (ed. lit.) II – Pinto, Jorge T. Q. S., (ed. lit.)

1-Mecânica experimental — Congressos

CDU 62

061.3(469.202)"2008"

IMPRESSO EM PORTUGAL

## Comissão Organizadora

Arlindo Gonçalves (LNEC)  
João Ferreira (IST)  
Joaquim Silva Gomes (FEUP)  
José Cirne (FCTUC)  
José Morais (UTAD) - Presidente  
Mário Santos (INETI)  
Mário Vaz (FEUP)  
Paulo Piloto (IPB)

## Comissão Executiva

Abílio de Jesus (UTAD)  
Jorge Pinto (UTAD)  
Marcelo Oliveira (IPV)

## Comissão Científica

Abílio de Jesus (UTAD)  
Alfredo Balacó de Morais (U Aveiro)  
Alfredo Ribeiro (UTAD)  
Álvaro Cunha (FEUP)  
António Correia da Cruz (ISQ)  
António Sousa Miranda (UM)  
António Torres Marques (FEUP)  
Elsa Sá Caetano (FEUP)  
Elza Fonseca (IPB)  
Ema Coelho (LNEC)  
Francisco Queirós de Melo (U Aveiro)  
Graça Vasconcelos (UM)  
Humberto Varum (U Aveiro)  
Joaquim Barros (UM)  
Joaquim Figueiras (FEUP)  
Joaquim Silva Gomes (FEUP)  
Jorge Pinto (UTAD)  
Jorge Seabra (FEUP)  
José Dias Rodrigues (FEUP)

José Domingos Costa (FCTUC)  
José Reis Campos (FMDUP)  
José Simões (U Aveiro)  
Júlio Montalvão e Silva (IST)  
Luis Simões da Silva (FCTUC)  
Manuel Freitas (IST)  
Marcelo Moura (FEUP)  
Maria João Barros (U Açores)  
Mário Santos (INETI)  
Mário Vaz (FEUP)  
Nuno Rilo (FCTUC)  
Paulo Cruz (UM)  
Paulo Lourenço (UM)  
Paulo Piloto (IPB)  
Paulo Tavares de Castro (FEUP)  
Rui Carneiro de Barros (FEUP)  
Rui Faria (FEUP)  
Rui Guedes (FEUP)  
Rui Simões (FCTUC)

## Índice

Ensaio "Push-out" para Vigas Parcialmente Embebidas com Betão <i>Piloto, P.A.G.; Gavilán, A.B.R.; Mesquita, L.M.R.</i>	1
Desenvolvimento de Reforço Sísmico Usando FRP: Aplicação a um Pilar Pré-Fabricado de Betão <i>Oliveira, D.V.; Costa, B.; Loureiro, C.; Coelho, N.; Moreira, N.</i>	5
Confinamento de Pilares de Betão Armado Reforçados Total e Parcialmente com Mantas de CFRP Submetidos a Carregamentos Cíclicos de Compressão <i>Ferreira, D.; Barros, J.</i>	9
Caracterização Experimental e Modelação Numérica da Ligação GFRP/Betão <i>Biscaia, H.E.C.; Silva, M.G.; Rodrigues, C.C.</i>	13
Taper Roller Bearings Lubricated with Bio-Greases <i>Graça, B.M.; Campos, A.J.V.; Seabra, J.H.O.</i>	17
The Prediction of Micropitting Initiation on Gear Teeth: a Numerical Model and its Correlation with Experimental Data <i>Brandão, J.A.; Seabra, J.O.; Castro, M.J.</i>	21
Abertura de Novas Superfícies no Corte Ortogonal <i>Silva, C.M.A.; Rosa, P.A.R.; Martins, P.A.F.</i>	25
Avaliação Experimental da Condição Tribologia no Corte Ortogonal <i>Cristino, V.A.M.; Rosa, P.A.R.; Martins, P.A.F.</i>	29
O Efeito da Dureza de um Aço no Coeficiente de Desgaste do Eléctrodo no Processo de Electroerosão <i>Araújo, A.; Marafona, J. D.</i>	33
Módulo de Young – Comparação de Metodologias de Medição <i>Sousa, C.; Restivo, M.T.; Rodrigues, J.D.; Lopes, A.M.; Chouzal, M.F.; Mendes, J.G.</i>	37
Modal Sensing of Beams via Spatially Shaped Distributed Piezoelectric Transducers <i>Vasques, C.M.A.; Rodrigues, J.D.</i>	41
A Phenomenological Model of Passive Control of Vibrations of Beams via Shunted Piezoelectric Transducers <i>Stahlhofer, L.R., Vasques, C.M.A.; Rodrigues, J.D.</i>	45
Desenvolvimento e Validação de um Protótipo de Ensaio para Caracterização Experimental de Materiais Viscoelásticos <i>Moreira, R.A.S.; Martins, R.O.; Silva, J.; Rodrigues, J.D.</i>	49

Dynamic Strain Measurement in Composite Laminate Using an Embedded EFPI Sensor/PZT Actuator Hybrid System <i>Oliveira, R.; Ramos, C.A., Marques, A.T.</i>	53
Um Algoritmo de Newmark Baseado no Método das Forças para Uso em Testes Pseudo-Dinâmicos <i>Melo, F.J.Q.; Martins, R.O.; Vaz, M.A.P., Ferreira, J.A.F.</i>	57
Instrumentação e Monitorização de Torres Eólicas <i>Rebello, C.A.S.; Simões, R.A.D.; Silva, L.S.</i>	61
Medição de Tensões Residuais não Uniformes em Profundidade com Moiré Interferométrico <i>Ribeiro, J.; Monteiro, J.; Vaz, M., Lopes, H.; Piloto, P.</i>	65
Utilização da Técnica ESPI para a Detecção de Defeitos em Placas Compósitas <i>Rocha, E.; Amaro, A.M.; Monteiro, J.M.</i>	69
Novo Método de Tratamento de Resultados Aplicado ao Ensaio DCB na Madeira <i>Moura, M.F.S.F.; Morais, J.J.L.; Dourado, N.</i>	73
Modelação por Elementos Finitos de Vigas de Madeira Reforçadas com Lâminas de Carbono <i>Pinto, J.M.T.; Jesus, A.M.P.; Pinto, J.T.Q.S.; Morais, J.J.L.; Lousada, J.L.P.C.</i>	77
Determinação da Condutividade Térmica Efectiva de Tintas Intumescentes <i>Mesquita, L.M.R.; Piloto, P.A.G.; Vaz, M.A.P.; Pinto, T.</i>	81
Processo de Monitorização Adoptado na Reconstrução do Pano de Muralha SE do Baluarte do Cavaleiro em Chaves <i>Pinto, J.; Varum, H., Guedes, J.; Morais, J.</i>	85
Ensaio Experimental de uma Arcada de um Ascensor de Elevação Hidráulica <i>Roseiro, L.M.S.; Leal, R.A.C.P.; Pinto, L.; Rilo, N.F.</i>	89
Estudos Experimentais em Ligações Estruturais Coladas Madeira-Vidro <i>Cruz, P.J.S.; Pequeno, J.M.B.</i>	91
Comportamento Semi-Rígido de Ligações Tradicionais de Madeira <i>Branco, J.M.; Cruz, P.J.S.; Piazza, M.; Varum, H.</i>	95
Desenvolvimento de uma Técnica de Reforço do Esmagamento Localizado em Ligações Tipo Cavilha <i>Santos, C.L.; Jesus, A.M.P.; Morais, J.J.L.; Lousada, J.L.P.C.</i>	99
Caracterização Mecânica de Toros de Madeira Lamelada Colada <i>Branco, J.M.; Cruz, P.J.S.</i>	103
Modelação e Ensaio de uma Estrutura Lamelar de Madeira para Cobertura Cilíndrica <i>Lopes, G.M.; Carvalho, N.R.F.; Mata, R.C.; Barros, R.C.; Teixeira, F.F.; Mariz, M.C.G.</i>	105
Levantamento das Patologias e Monitorização do Arco-Cruzeiro da Igreja da Misericórdia de Aveiro <i>Varum, H.; Vicente, R.; Rodrigues, H.; Fernandes, C.; Costa, A.; André, P.; Nogueira, R.; Lima, H.; Abe, I.; Pinto, J.L.</i>	109

Monitorização do Comportamento do Betão nas Primeiras Idades: Validação Experimental de Modelos Numéricos <i>Ferreira, D.; Azenha, M.; Faria, R.</i>	113
Validação Numérica da Resposta Cíclica Experimental de Pórticos de Betão Armado <i>César, M.T.B.; Oliveira, D.V.; Barros, R.C.</i>	117
Avaliação Experimental da Aderência de Juntas de Alvenaria de Blocos de Betão <i>Vasconcelos, G.; Lourenço, P.B.; Haach, V.G.</i>	121
Influence of the Mortar on the Compressive Behavior of Concrete Masonry Prisms <i>Haach, V.G.; Vasconcelos, G.; Lourenço, P.B.; Mohamad, G.</i>	125
Estudo Numérico sobre a Influência do Esforço Axial no Comportamento de Isoladores de Base do Tipo HDRB <i>César, M.T.B.; Barros, R.C.</i>	129
Fatigue Damage Behaviour of Structural Components under Variable Amplitude Loading <i>Pereira, H.F.S.G.; Jesus, A.M.P.; Ribeiro, A.S.; Fernandes, A.A.</i>	133
Análise de Vibrações Mecânicas em Linhas Férreas de Trens de Metro através de Procedimentos Experimentais, Modelagem Matemática e Computacional <i>Freitas, E.S.; Sousa, E.A.C.;</i>	137
Análise de Estrutura Flexível Submetidas à Materiais Viscoelásticos <i>Sousa, E.A.C.; Queiroz, J.A.S.</i>	143
Dynamic Analysis and Structural Evaluation of Góis Footbridge <i>Cruz, P.J.S.; Salgado, R.; Branco, J.M.</i>	144
Avaliação Experimental da Eficiência de TMDs para Controlo de Vibrações Laterais da Ponte Pedro e Inês <i>Caetano, E.; Cunha, A.; Silva, J. M.; Freitas, F.</i>	151
Sistema de Visão Artificial para Monitorização de Vibrações em Tirantes de Pontes <i>Silva, S.; Bateira, J.; Caetano, E.</i>	153
Modelação das Vibrações Induzidas pela Passagem de Comboios de Alta Velocidade <i>Palácio, A.; Silva, M.A.G.; Antão, A.N.; Silva, J.M.M.</i>	157
Overview of Recent Portuguese Research on Fatigue Behaviour of Ancient Portuguese Riveted Steel Bridges <i>Correia, J.A.F.O. ; Jesus, A.M.P.; Figueiredo, M.A.V.; Ribeiro, A.S.; Fernandes, A.A.</i>	161
Análise Experimental da Rotura pela Fundação de uma Barragem Abóbada <i>Gomes, J.P.; Lemos, J.V.; Pina, C.B.</i>	165
Modelação Numérica e Experimental da Rotura pela Fundação de uma Barragem Gravidade para Acções Dinâmicas <i>Gomes, J.P.; Lemos, J.V.; Pina, C.B.</i>	169
Caracterização do Comportamento à Fractura em Modo I do Tecido Ósseo Cortical <i>Batista, J.F.; Morais, J.L.; Dourado, N.M.; Moura, M.F.; Dias, M.I.; Azevedo, J.T.</i>	173

Estudo da Influência do Comportamento Viscoelástico do Osso e do Cimento na Distribuição de Tensões na Prótese de Anca <i>Nabais, C.; Guedes, R.M.; Simões, J.A.</i>	177
Análise Numérica e Experimental da Migração da Componente Femoral de uma Prótese da Anca <i>Fernandes, P.R.; Folgado, J.; Simões, J.A.</i>	181
Sistema Integrado de Fabrico de Implantes Anatomicamente Adaptados <i>Relvas, C.; Simões, J.A.</i>	183
Avaliação da Resistência do Colo do Fémur Utilizando o Modelo de Elementos Finitos <i>Teixeira, C., Fonseca, E., Barreira, L.</i>	187
Caracterização de cavilhas de fixação intra-medulares de estabilização de fracturas ósseas à flexão e torção <i>Ramos, A., Simões, J.A.</i>	191
Caracterização Experimental do Escoamento de um Cimento Ósseo num Canal de Dimensões Reduzidas <i>Simões, J. A., Martins, N., Completo A., Clemente, C. M.</i>	195
Aquisição e Tratamento de Imagem Aplicada à Modelagem de Estruturas Ósseas <i>Sousa, E.A.C.; Marques, A.S.</i>	199
Imagens Tomográficas Biomédicas Aplicadas à Prototipagem Rápida e à Criação de Modelos Numéricos <i>Sá, J.; Barreira, L.; Fonseca, E.; Teixeira, C.</i>	203
Medição de Forças de Corte no Pé com Sapato Instrumentado <i>Marques, M.A.; Viriato, N.; Vaz, M.A.; Ribeiro, R.</i>	207
Modelação do Pé para Estudo de Tensões Internas Localizadas <i>Marques, M.A.; Nabais, C.; Viriato, N.; Ribeiro, R.; Vaz, M.A.P.</i>	211
Water Degradation Study of Fibers of Different Aliphatic Polyesters <i>Vieira, A.F.C.; Marques, A.T.; Guedes, R.M.</i>	215
Estudo Preliminar da Cinemática da Locomoção de Crianças em Idade Escolar Transportando Mochilas às Costas <i>Rocha, J.; Barbosa, T.M.</i>	219
Influência dos Tecidos Gengivais na Micromobilidade do Sistema Dente/Periodonto. Estudo Experimental <i>Bernardo, N.; Completo, A.; Simões, J.A.; Ferreira, J.</i>	223
Estudo Biomecânico das Tensões Exercidas pelas Molas Ortodônticas sobre as Estruturas Dentárias <i>Machado, C.B.; Vaz, M.P.; Campos, J.R.; Correia, A.</i>	227
Simulação Numérica do Comportamento de uma Mandíbula Humana Durante Actividade Mastigatória <i>Piloto, P.; Ribeiro, J.; Campos, J.C.R.; Correia, A.; Vaz, M.</i>	231
Análise Experimental de Tensões em Conectores de Próteses Fixas Dentárias Tipo Cantilever	

<i>Correia, A.; Fernandes, J.C.S.; Campos, J.C.R.; Vaz, M.A.; Viriato, N.</i>	235
Erosão Laser 3D – Tecnologia de Micromaquinação <i>Silva, A.J.; Dias, S.A.S.; Osório, A.M.B.A.</i>	239
Dynamic Behavior of Sandwich Plates with Cork Compound Cores: Modeling and Characterization <i>Silva, J.S.; Moreira, R.A.S.; Rodrigues, J.D.</i>	243
Avaliação Estrutural do Aço Rápido M3/2 Sinterizado através da Tecnologia DMLS <i>Esperto, L., Martins, I.M., Santos, M.</i>	247
Implementação do Método de “Oberst” para Medição de Amortecimento em Compósitos de Cortiça com Borracha Sintética <i>Cláudio, R.A.; Nunes, N.N.; Sequeira, A.; Silva, L.; Martins, C.</i>	251
Experimental Characterization of the Compressive Behavior of Granites <i>Vasconcelos, G.; Lourenço, P.B.</i>	255
Fatigue Crack Growth Behaviour of the Friction Stir Welded 6082-T6 Aluminium Alloy <i>Moreira, P.M.G.P.; Jesus, A.M.P.; Ribeiro, A.S.; Castro, P.M.S.T.</i>	259
Desenho de Experiências - Estratégias <i>Domingues, R., Oliveira, F.A.C.; Esperto, L.</i>	263
Influência da Humidade e do Envelhecimento Físico no Comportamento Elástico de um Époxido <i>Custódio, P.M.C.; Tranchete, T.M.; Morais, J.J.L.; Guedes, R.J.M.; Xavier, J.M.C.</i>	267
Influência dos Parâmetros de Maquinagem no Dano de Placas Compósitas <i>Durão, L.M.P.; Magalhães, A.G.; Marques, A.T., Tavares, J.M.R.S.</i>	271
Caracterização Mecânica Experimental de Ladrilhos Cerâmicos de Revestimento <i>Rilo, N.F.; Pereira, R.A.T.R.; Dias, A.B.; Leal, R.A.C.P.</i>	275
Residual Stress Evaluation of a Mig Welded Plate Using the Sectioning Method and the Hole Drilling Method <i>Moreira, P.M.G.P.; Richter-Trummer, V.; Silva, R.A.M.; Figueiredo, M.A.V.; Castro, P.M.S.T.</i>	277
Estudo do Dano em Tubos de Matriz Termoplástica Reforçada com Fibras Contínuas <i>Correia, S.M.; Silva, J.F.; Monteiro, J.; Nunes, J.P.; Marques, A.T.</i>	281
Characterisation of the Radial Variability of Stiffness Parameters of P. Piaster by the Virtual Fields Method <i>Xavier, J.; Avril, S.; Pierron, F.; Morais, J.</i>	285
Comportamento Estático e à Fadiga de Juntas Coladas com Perfis Pultrudidos <i>Ribeiro, A.S.; De Jesus, A.M.P.; Ferreira, A.J.M.; Pereira, A.H.C.</i>	289

# MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS NÃO UNIFORMES EM PROFUNDIDADE COM MOIRÉ INTERFEROMÉTRICO

J. Ribeiro<sup>1</sup>, J. Monteiro<sup>2</sup>, M. Vaz<sup>3</sup>, H. Lopes<sup>1</sup>, P. Piloto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IPB, Instituto Politécnico de Bragança

<sup>2</sup> INEGI, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

<sup>3</sup> FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



## RESUMO

Este trabalho teve como principal objectivo desenvolver uma técnica 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 não uniformes em profundidade. Foram, também, desenvolvidos métodos de calibração e de medida.

## 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 [Lu (1996)]. 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 [Ribeiro (2006)], para além destas elas podem ser provocadas durante operações de manutenção ou reparação. 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. 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*, [Nobre (2000)], aplicado em superfícies e do *cold work* [Papanikos (1997)], aplicado em furos para rebites. 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.

Este trabalho teve como intuito o desenvolvimento de uma técnica de medição do campo de tensões residuais, para isso, associou-se ao método do furo uma técnica óptica, Moiré interferométrico. As técnicas ópticas têm como principais vantagens, quando comparadas com a clássica extensometria utilizada no método do furo, a possibilidade de permitir uma medição de campo, medir em regiões mais próximas do bordo do furo, possibilitando, ainda, uma análise da variação relaxamento das tensões com o afastamento do bordo do

furo. Durante o desenvolvimento desta técnica foi necessário implementar uma metodologia para o fabrico de redes de difracção com 1200 linhas/mm, para isso, fizeram-se vários testes e análises microscópicas tendo sido necessário controlar vários parâmetros importantes: espessura da rede de silicone e do revestimento de alumínio, bem como o índice reflectividade do revestimento (superior a 60%). Após a obtenção das redes de difracção foram transferidas para a superfície do provete onde se fizeram as medições, utilizou-se, para isso, uma película de epóxico, sobre a qual era colocada a rede fabricada anteriormente, após a polimerização do epóxico procedia-se à retirada da rede mestre original, ficando replicada na superfície do provete a rede que iria ser utilizada na medição. Para a determinação do valor das tensões residuais com a técnica do furo associada a uma técnica optica utilizou-se a expressão desenvolvida por Wu [Wu (1998)], mas alterada para aplicação ao furo incremental:

$$\begin{bmatrix} u^i(x_k, y_k) & v^i(x_k, y_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_k \\ \sin \theta_k \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^i \begin{bmatrix} A^{ij} + B^{ij} \cos 2\theta_k \\ A^{ij} - B^{ij} \cos 2\theta_k \\ 2B^{ij} \sin 2\theta_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^j \\ \sigma_{yy}^j \\ \tau_{xy}^j \end{bmatrix} \quad (1)$$

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  $i$ ;  $\sigma_{xx}^j$ ,  $\sigma_{yy}^j$  e  $\tau_{xy}^j$  são as três componentes da tensão residual na camada  $j$ . Os coeficientes de calibração foram determinados numericamente, recorrendo a um programa de elementos finitos (Ansys®), com os qual foi simulado o ensaio do furo incremental.

## 2-PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para a medição de tensões residuais não uniformes utilizou-se um provete em aço (AISI 4337), sujeito a um processo de

granalhagem, de modo a criar um elevado campo de tensões de compressão à superfície e que diminuam drasticamente em profundidade, de tal forma, que a 1 mm da superfície o efeito da granalhagem é praticamente nulo.

Antes da realização do ensaio foi colada uma rede de Moiré para realizar a medição dos deslocamentos em duas direcções. A montagem experimental utilizada para medir as tensões residuais num provete granalhado, recorrendo ao método do furo incremental associado à técnica óptica de Moiré interferométrico, está apresentada na figura 1.

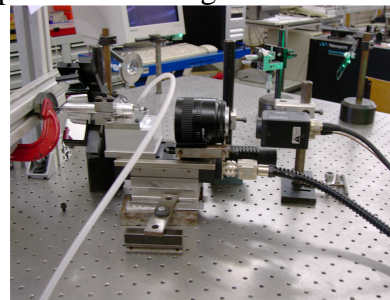


Fig. 1 – Montagem experimental utilizada para a medição de tensões residuais num provete granalhado recorrendo ao método do furo incremental associada à técnica de Moiré Interferométrica.

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.

Após cada incremento foram captadas quatro imagens com um acréscimo de fase de  $\pi/2$  entre imagens consecutivas.

## 3-RESULTADOS

Com base nas imagens captadas, para cada incremento, recorreu-se a um programa de processamento de imagem desenvolvido no Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental, para se obter os deslocamentos, nas duas direcções ortogonais ( $u$ ,  $v$ ), em torno do furo, provocados pelo relaxamento de tensões.

Na figura 2 pode ver-se o exemplo do mapa de fase e o campo de deslocamentos na direcção  $v$  (após o *unwrapping*) obtidos para o segundo incremento.

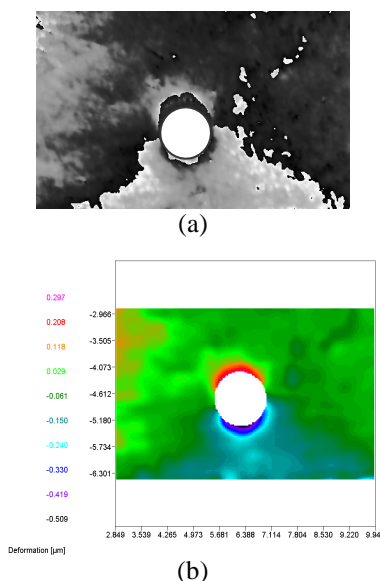


Fig. 2 – Imagens com Moiré interferométrico para a medição do relaxamento de tensões após o segundo incremento: (a) mapa de fase na direcção  $v$ ; (b) campo de deslocamentos na direcção  $v$  após *unwrapping*.

A partir dos campos de deslocamentos obtidos para cada incremento é possível determinar as respectivas tensões residuais recorrendo à equação (1).

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 [Nobre (2000)], bem como os calculados pela simulação numérica elaborada no âmbito deste trabalho.

Na figura 3 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 [Nobre (2000)]. 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.

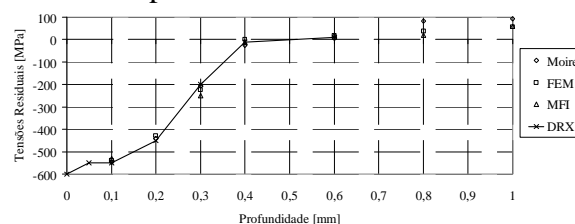


Fig. 3 – Distribuição das tensões residuais dum provete granalhado construído em aço AISI 4337. Comparação entre os resultados obtidos com: Moiré interferométrico, MEF, MFI e DRX.

#### 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 [Ribeiro (2006)]. 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.

#### REFERÊNCIAS

- James, M. R., Lu, J., “Handbook of Measurement of Residual Stresses”, Edit. Jian Lu, The Fairmont Press, Inc. United States, 1996.
- Ribeiro, J., Monteiro, J., Vaz, M., Piloto, P., Lopes, H., “Residual Stress Assessment Using Optical Techniques”, 7<sup>th</sup> European Conference on Residual Stresses, Berlin, 13-15 October, 2006.
- 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.
- 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.
- Papanikos, P., “Mechanics of Mixed Mode Fatigue Behaviour of Cold Worked Adjacent Holes”, thesis for Doctor of Philosophy, University of Toronto, Toronto, 1997.
- 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.
- Ribeiro, J. E., “Caracterização Experimental e Numérica de Campos de Tensões Residuais Provocadas por Processos de Fabrico”, tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, 2006.