



ASSOCIAÇÃO
PORTUGUESA
DE ANÁLISE
EXPERIMENTAL
DE TENSOES



06

CONGRESSO NACIONAL *mecânica experimental*
ponta delgada 27-29 julho 2005

EDITORES

Mário A. P. Vaz (FEUP/INEGI) | José A. Simões (U Aveiro) | Paulo A. G. Piloto (IPB-ESTIG)
Rui M. Guedes (FEUP/INEGI) | Arlindo Silva (IST) | M. João Barros (U Açores)

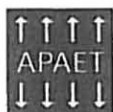
6.º CONGRESSO NACIONAL EM MECÂNICA EXPERIMENTAL

PONTA DELGADA 27 - 29 DE JULHO 2005

UNIVERSIDADE DOS AÇORES

RESUMO DAS COMUNICAÇÕES

ORGANIZADO POR:



ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE
ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

Sede: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa
Tlp: 21 844 3225; Fax: 21 844 3021; e-mail: apaet@lnec.pt; <http://www-ext.lnec.pt/APAET/>
NIF 501 699 546 Contacto: Carolina Rego, Secretariado

**6.º CONGRESSO NACIONAL EM MECÂNICA EXPERIMENTAL
PONTA DELGADA 27 A 29 DE JULHO DE 2005-07-04**

**DEPÓSITO LEGAL: 229793/05
COPYRIGHT ©2005 POR INEGI
ISBN: 972-8826-09-5**

**EDITORA: INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E GESTÃO INDUSTRIAL
RUA DO BARROCO, 174
4465-591 LEÇA DO BALIO
PORTUGAL
TELF: +351 22 957 8714
FAX: +351 22 953 7352
E-MAIL: INEGI@INEGI.UP.PT
URL: WWW.INEGI.PT**

IMPRESSÃO E ACABAMENTO: GRÁFICOS REUNIDOS, LDA.

COMISSÃO ORGANIZADORA

MÁRIO A. P. VAZ (FEUP/INEGI)
JOSÉ A. SIMÕES (U AVEIRO)
PAULO A. G. PILOTO (IPB-ESTIG)
RUI M. GUEDES (FEUP/INEGI)
ARLINDO SILVA (IST)
M. JOÃO BARROS (U AÇORES)
MARIA DE LURDES EUSÉBIO (LNEC)
J. F. SILVA GOMES (FEUP/INEGI)
MÁRIO SANTOS (INETI)

COMISSÃO CIENTÍFICA

A. CARDON (BÉLGICA)
A. CORREIA DA CRUZ (ISQ)
A. S. MIRANDA (UM)
A. T. MARQUES (FEUP)
A. DE FREITAS MENESES (U AÇORES)
A. BARROS (UM)
C. NAVARRO (ESPAÑA)
EMA COELHO (LNEC)
L. SIMAS DINIS (FEUP)
F. Q. MELO (U AVEIRO)
J. F. SILVA GOMES (FEUP)
J. F. DIAS RODRIGUES (FEUP)
J. H. SEABRA (FEUP)
J. J. L. MORAIS (UTAD)
J. M. CATARINO (LNEC)
J. M. CIRNE (FCTUC)
J. M. SILVA (IST)
M. C. CRUZ AZEVEDO
M. JOÃO BARROS (U AÇORES)
MÁRIO SANTOS (INETI)
N. F. RILO (FCTUC)
PAULO A. G. PILOTO (IPB)
S. A. MEGUID (CANADÁ)

PATROCÍNIOS

CÂMARA MUNICIPAL DE PONTA DELGADA
CASA DOS AÇORES DO NORTE
COMISSÃO DE TURISMO DA REGIÃO DOS AÇORES
FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO
UNIVERSIDADE DOS AÇORES
LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL
FUNDAÇÃO PARA A CIÊNCIA E TECNOLOGIA – MCT
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E GESTÃO INDUSTRIAL
SPECTRIS PORTUGAL
MRA

Prefácio

A Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET), cumprindo os seus objectivos de divulgação e promoção das técnicas de Mecânica Experimental, organiza mais um dos seus encontros Nacionais. Este fórum é o primeiro a merecer a designação de Congresso e a ter todos os trabalhos submetidos sujeitos a revisão.

Mantendo a intenção de descentralizar estes encontros, onde normalmente participam os mais reputados investigadores nacionais com interesses neta área, a Direcção da APAET decidiu que o 6.º Congresso seria realizado nos Açores. Desta forma a reunião decorre numa das partes mais agradáveis do território nacional e junto da comunidade académica que integra a Universidade dos Açores. Esta Universidade, que cedo aceitou ser anfitriã do 6.º Congresso, fundada há cerca de três décadas, é hoje reconhecidamente um dos principais pólos de desenvolvimento do arquipélago dos Açores.

Este Congresso reúne 78 contribuições das várias áreas do conhecimento que recorrem às técnicas da Mecânica Experimental nas suas actividades de investigação. Pela qualidade e número dos trabalhos recebidos este encontro é já uma agradável surpresa.

Finalmente envio os meus agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para que este congresso fosse possível: a Direcção da APAET, as Comissões Organizadora e Científica, os patrocinadores, a Universidade dos Açores e todos os participantes pela qualidade das suas contribuições.

Resta agora esperar que aquilo que já é uma grata surpresa se transforme num agradável 6.º Congresso de Mecânica Experimental.

*Mário A. P. Vaz
Presidente da Comissão Organizadora*

ÍNDICE

ANÁLISE DE ESTRUTURAS

UMA SOLUÇÃO BASEADA EM FORMULAÇÃO HÍBRIDA PARA ANÁLISE DE TENSÕES EM TUBOS CURVOS SOB ESFORÇOS NO PLANO DE CURVATURA 1
Luísa Madureira (FEUP); F. J. Q. de Melo (UA); M. A. P. Vaz (FEUP)

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE CONFORTO NUMA COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA SUBURBANA 4
Paula C. Silva (IPS); J. Montalvão e Silva (IST)

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE COLUNAS DE ILUMINAÇÃO CONFORME A NORMA EN 40 "LIGHTING COLUMNS" 7
Marta Carvalho (Schröder); Arlindo Silva (IST)

DESENVOLVIMENTO DE NOVOS MODELOS PARA O ESTUDO DA ANÁLISE DE TENSÕES E DE DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURAS TUBULARES 10
Elza. M. M. Fonseca (IPB); F. J. Q. de Melo (UA); Carlos A. M. de Oliveira (FEUP)

ENSAIOS LABORATORIAIS DE DUAS ASNAS DE CANTO, DEGRADADAS E REFORÇADAS, DA ANTIGA COBERTURA DO MOSTEIRO DE AROUCA 13
R. O. Rodrigues (FEUP); R. C. de Barros (FEUP)

ANÁLISE DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL

AVALIAÇÃO DO DANO NA FURAÇÃO DE LAMINADOS CARBONO/EPÓXIDO 16
L. M. P. Durão (ISEP); J. M. R. S. Tavares (FEUP); A. T. Marques (FEUP); M. Figueiredo (FEUP); A. G. Magalhães (ISEP); M. de Freitas (IST)

DAMAGE TOLERANCE ANALYSIS OF AIRCRAFT STRUCTURES UNDER SERVICE LOADING 19
M. Milharadas (AFA); L. Reis (IST); A. Fonseca (IST); M de Freitas (IST)

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS EM AÇO PROTEGIDAS COM TINTA INTUMESCENTE 22
L. M. R. Mesquita (IPB); P. A. G. Piloto (IPB); M. A. P. Vaz (FEUP); P. M. M. Vila Real (UA)

PREVISÃO DE VIDA À FADIGA DOS ENGATES (RABETAS) DOS VAGÕES DE TRANSPORTE DE CARVÃO 25
T. Morgado (IPT); C. M. Branco (IST); V. Infante (IST)

ANÁLISE DINÂMICA E VIBRAÇÕES

VIGAS COM TRATAMENTO HÍBRIDO ACTIVO-PASSIVO DE AMORTECIMENTO: CONFIGURAÇÕES, MODELAÇÃO E CONTROLO ACTIVO DE VIBRAÇÕES 28
C. M. A. Vasques (FEUP); J. F. Dias Rodrigues (FEUP)

MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES EM VIADUTOS FERROVIÁRIOS DE MÉDIO VÃO 31
Carlos Rebelo (UC); L. Simões da Silva (UC); Constança Rigueiro (IPCB); Helena Gervásio (GIPAMB)

MÉTODO MSE MODIFICADO PARA A DETERMINAÇÃO DOS FACTORES DE PERDA MODAIS EM ESTRUTURAS COM TRATAMENTOS VISCOELÁSTICOS 34
R. A. S. Moreira (UA); J. F. Dias Rodrigues (FEUP)

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÓDULO COMPLEXO DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS 37
R. A. S. Moreira (UA); J. F. Dias Rodrigues (FEUP)

IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS DOS MODELOS ADF E GHM PARA A CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS 40
C. M. A. Vasques (FEUP); R. A. S. Moreira (UA); J. F. Dias Rodrigues (FEUP)

DESENVOLVIMENTO DE UM ACTUADOR DINÂMICO PIEZOELÉCTRICO <i>R. A. S. Moreira (UA); J. F. Dias Rodrigues (FEUP)</i>	43
BIOMECÂNICA	
ANÁLISE DE VIBRAÇÕES DE UM FÉMUR COM E SEM PRÓTESE UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS <i>Paulo R. Fernandes (IST); J. Fialho (IST)</i>	46
ESTUDO NUMÉRICO DA BIOMECÂNICA DA COMPONENTE TIBIAL DA ARTROPLASTIA DO JOELHO <i>A. Completo (UA); F. Fonseca (UC); J. A. O. Simões (UA)</i>	49
INFLUÊNCIA DOS MÚSCULOS MASSETER E TEMPORAL E DAS FORÇAS DE OCLUSÃO NAS DEFORMAÇÕES INDUZIDAS NA FACE EXTERNA DA MANDÍBULA <i>A. Ramos (UA); A. Ballu (U Bordeaux); M. Mesnard (U Bordeaux); L. M. R. Carvalho (ESS); P. Talaia (UA); J. A. O. Simões (UA)</i>	52
CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DO LIGAMENTO PERIODONTAL EM ESPÉCIMES DE PORCO <i>L. M. R. Carvalho (ESS); R. A. S. Moreira (UA); J. A. O. Simões (UA)</i>	55
MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DO OUVIDO MÉDIO COM UMA PRÓTESE TOTAL DE TITÂNIO <i>Nuno F. Rilo (UC); M. F. Costa Paulino (UC); Rogério A. C. P. Leal (UC); M do Carmo Miguéis (UC)</i>	58
ANÁLISE DO ESTADO DE TENSÃO NA ZONA DO IMPLANTE DE UM FÉMUR COM PRÓTESE DE ANCA DINAMICAMENTE SOLICITADO USANDO MÉTODO PSEUDO-DINÂMICO <i>F. J. M. Q. de Melo (UA); P. Talaia (UA); A. Ramos (UA); J. A. O. Simões (UA); M. A. P. Vaz (FEUP)</i>	61
CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS	
MEASUREMENT OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF A CARBON REINFORCED BISMALLEIMIDE OVER A WIDE RANGE OF TEMPERATURES <i>L. F. M. da Silva (FEUP); R. D. Adams (U Bristol)</i>	64
SOLDADURAS MISTAS AÇO INOXIDÁVEL/AÇO CARBONO ESTUDO DO COMPORTAMENTO À FRACTURA A TEMPERATURAS NEGATIVAS <i>A. Loureiro (UC); D. M. Rodrigues (UC); J. Neves (UC); P. Teixeira (UC)</i>	67
OPTIMIZAÇÃO DA ESCOLHA CONJUGADA DE ALGUNS TIPOS DE AÇOS E PROCESSOS DE SOLDADURA DE ELEVADO RENDIMENTO <i>A. L. Salgado Prata</i>	69
ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DO MÉTODO DO VÃO VARIÁVEL PARA A IDENTIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELÁSTICAS DA MADEIRA <i>J. Xavier (UTAD); N. Garrido (IPV); J. J.L. Moraes (UTAD); J. Pinto (UTAD); P. Camanho (FEUP)</i>	72
APLICAÇÕES FUNCIONAIS DAS ESPUMAS METÁLICAS <i>I. M. A. Duarte (INETI); A. J. M. Ferreira (FEUP); M. J. G. Santos (INETI); J. Banhart (UT Berlin)</i>	74
ESTUDO EXPERIMENTAL DO IMPACTO DE BAIXA VELOCIDADE SOBRE PLACAS LAMINADAS DE FIBRA DE VIDRO EM MATRIZ EPOXY <i>Nuno F. Rilo (UC); Luís M. S. Ferreira (IPT)</i>	77
ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA CORTIÇA <i>C. P. Gameiro (UC); J. M. O. S. Cirne (UC); G. Gary (École Polytechnique)</i>	80

MATERIAIS E MECANISMOS DE LIGAÇÃO ENTRE PARTÍCULAS DE PÓS METÁLICOS NO PROCESSO DMLS <i>Luis Esperto (INETI); António Osório (INETI)</i>	83
FABRICO RÁPIDO DE FERRAMENTAS PELA TECNOLOGIA DMLS <i>Luis Esperto (INETI); António Osório (INETI)</i>	86
COMPORTAMENTO DE MATERIAIS	
ESTUDO EXPERIMENTAL E ANALÍTICO, EM COMPRESSÃO, DE DIFERENTES ESPUMAS PARA APLICAÇÃO EM CONSTRUÇÃO SANDWICH <i>Marco Leite (IST); João Lopes (IST); Arlindo Silva (IST)</i>	89
APLICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS EM COMPONENTES DA SUSPENSÃO DE VEÍCULOS AUTOMÓVEIS <i>Sérgio Santos (IPL); Arlindo Silva (IST)</i>	92
FAIXAS DE MANTA DE CFRP NO CONFINAMENTO DE ELEMENTOS DE PILAR DE BETÃO ARMADO <i>D. R. S. M. Ferreira (UM); J. A. O. Barros (UM)</i>	95
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PLACAS DE MATERIAL COMPÓSITO SUJEITO A IMPACTO <i>Marta Rodrigues (IPT); Carlos Coelho (IPT); Marco Leite (IPT); L. M. Ferreira (IPT)</i>	97
COMPORTAMENTO MECÂNICO E ROTURA A LONGO PRAZO DE TUBAGENS EM MATERIAL COMPÓSITO <i>Hugo Faria (INEGI); Rui M. Guedes (FEUP); A. T. Marques (FEUP)</i>	100
APLICAÇÕES DE ESPUMAS DE LIGAS DE ALUMÍNIO NO SECTOR DE TRANSPORTES <i>I. M. A. Duarte (INETI); A. J. M. Ferreira (FEUP); M. J. G. Santos (INETI); J. Banhart (UT Berlin)</i>	103
APLICAÇÕES ESTRUTURAIS DAS ESPUMAS METÁLICAS <i>I. M. A. Duarte (INETI); A. J. M. Ferreira (FEUP); M. J. G. Santos (INETI); J. Banhart (UT Berlin)</i>	106
MECHANICAL PROPERTIES OF PVC PARTICULATED COMPOSITES <i>C. Capela (IPL); J. A. M. Ferreira (UC); J. D. Costa (UC)</i>	109
ENSAIOS EXPERIMENTAIS	
UM PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA A CARACTERIZAÇÃO DOS ESFORÇOS EM TUBAGENS SOLDADAS ENTERRADAS, SUJEITAS A CARGAS ACIDENTAIS NA SUPERFÍCIE <i>J. A. R. Soares (ISEL); L. A. A. Ferreira (FEUP); F. J. M. Q. de Melo (UA), J. Dias Lopes (ISQ); Ferreira Marques (TRANSGÁS)</i>	112
MEDIÇÃO DE FORÇAS DE INTERACÇÃO RODA/CARRIL, EM CURVA, NUM RODADO EXTREMO DE UM VEÍCULO FERROVIÁRIO <i>J. D. Silva (IPS); R. A. Cláudio (IPS); A. J. Valido (IPS); P. J. Moita (IPS)</i>	115
A ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES NO CONTEXTO DE UM CASO DE ESTUDO MULTIDISCIPLINAR <i>J. C. Marques (FEUP); M. T. Restivo (FEUP); M. F. G. Vieira (FEUP); M. A. P. Vaz (FEUP); F. D. M. B. Magalhães (FEUP)</i>	117
FACTORES SUSCEPTÍVEIS DE INFLUENCIAR O CONFORTO HUMANO NUMA PERSPECTIVA DE SAÚDE PÚBLICA <i>M. A. R. Talaia (UA)</i>	120

AMBIENTE QUENTE – UM ESTUDO DE CASO <i>M. A. R. Talaia (UA)</i>	123
TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS <i>J. E. Ribeiro (IPB); M. A. P. Vaz (FEUP); P. A. G. Piloto (IPB); J. M. Monteiro (INEGI)</i>	126
MONITORIZAÇÃO DA INTEGRIDADE DE ESTRUTURAS COMPÓSITAS COM SENSORES EM FIBRA ÓPTICA <i>R. de Oliveira (INEGI); C. A. Ramos (ISEP); O. Frazão (INESC); A. T. Marques (FEUP)</i>	129
DEVELOPMENT OF TESTING APPARATUS TO STUDY FAILURE OF PLASTIC GEARS <i>C. Capela (IPL); F. Ventura (UC); M. C. Gaspar (IPCB)</i>	132
ENSAIOS DE PONTES E BARRAGENS	
ENSAIO DE ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES PARA O ESTUDO DA ESTABILIDADE DA PONTE MÓVEL DE LEIXÕES <i>J. F. Silva Gomes (FEUP); M. A. P. Vaz (FEUP)</i>	135
MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UMA PONTE NOVA EM ARCOS DE ALVENARIA DE PEDRA <i>A. Arede (FEUP); A. Costa (FEUP); C. Costa (FEUP); C. Barbosa (FEUP); P. Costa (FEUP)</i>	138
ENSAIOS DINÂMICOS DE VIADUTOS FERROVIÁRIOS AUTOMATIZAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE ENSAIO E PROCESSAMENTO <i>F. Magalhães (FEUP); A. Cunha (FEUP); E. Caetano (FEUP)</i>	140
MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA CONDUTA/JUNTA DE DILATAÇÃO INSTALADO NA NOVA PONTE HINTZE-RIBEIRO <i>Hélder Silva (FEUP); Carlos Félix (FEUP); A. A. Henrique (FEUP); J. A. Figueiras (FEUP)</i>	143
ANÁLISE DE FADIGA DA PONTE FERROVIÁRIA DE ALCÁCER DO SAL <i>Diogo Ribeiro (FEUP); Rui Calçada (FEUP); Raimundo Delgado (FEUP)</i>	146
INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLO	
MONITORIZAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICO DE PLACAS COMPÓSITAS USANDO SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA <i>S. F. O. Silva (FEUP); O. Frazão (INESC); J. B. Almeida (FEUP); J. L. Santos (INESC); M. T. Restivo (FEUP)</i>	149
MEDIÇÃO DE TENSÕES LATERAIS COM PZT: APLICAÇÃO AO PÉ <i>A. Marques (ISEP); M. A. P. Vaz (FEUP); R. Ribeiro (FEUP); J. G. M. Mendes (FEUP)</i>	151
ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES EM MATERIAIS COMPÓSITOS UTILIZANDO SENSORES DE BRAGG EMBEBIDOS <i>C. A. Ramos (ISEP); J. L. Esteves (FEUP); A. T. Marques (FEUP)</i>	154
CALIBRAÇÃO DE ACELERÓMETROS POR INTERFEROMETRIA ÓPTICA – EXTENSÃO DA GAMA DE MEDIÇÃO EM FREQUÊNCIA E ACELERAÇÃO <i>M. I. A. Godinho (INETI); A. Cabral (INETI); M. C. Nunes (INETI); J. M. Rebordão (INETI) V. Oliveira (INETI)</i>	156
MECÂNICA DOS MATERIAIS	
ESTUDO TEÓRICO EXPERIMENTAL DOS FUNDAMENTOS DO CORTE ORTOGONAL: PARTE I - MECÂNICA DE DEFORMAÇÃO JUNTO À ARESTA DE CORTE <i>Pedro A. R. Rosa (IST); Jorge M. C. Rodrigues (IST); Paulo A. F. Martins (IST)</i>	159

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CORTE NA MICROGEOMETRIA DAS SUPERFÍCIES OBTIDAS POR FRESAGEM EM AÇO ST 52.3 NORMALIZADO <i>Valentino A. M. Cristino (IST); Pedro A. R. Rosa (IST); Jorge M. C. Rodrigues (IST)</i>	161
ESTUDO DA INICIAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FENDAS POR FADIGA EM CONTACTOS ELASTOHIDRODINÂMICOS <i>V. Mota (FEUP); L. A. A. Ferreira (FEUP)</i>	163
SPECIMEN SIZE INFLUENCE ON THE R-CURVE BEHAVIOUR OF A QUASI-BRITTLE MATERIAL: WOOD <i>N. M. Dourado (UTAD); S. Morel (LRBB-França); M. F. S. F. Moura (FEUP); J. J. L. Morais (UTAD); G. Valentin (LRBB-França)</i>	166
PRODUÇÃO DE COMPONENTES INTEGRADOS DE ESPUMAS DE LIGAS DE ALUMÍNIO COM INSERTOS METÁLICOS <i>I. M. A. Duarte (INETI); A. J. M. Ferreira (FEUP); M. J. G. Santos (FEUP); J. Banhart (UT Berlin)</i>	169
DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO TECNOLÓGICO DE PRODUÇÃO DE ESPUMAS METÁLICAS EM CONTÍNUO <i>I. M. A. Duarte (INETI); A. J. M. Ferreira (FEUP); M. J. G. Santos (FEUP); J. Banhart (UT Berlin)</i>	172
MÉTODOS ÓPTICOS DE ANÁLISE EXPERIMENTAL	
MODELOS PONTUAIS DE DISTRIBUIÇÃO EM VISÃO COMPUTACIONAL <i>M. J. Vasconcelos (FEUP); João M. R. S. Tavares (FEUP)</i>	175
UMA ABORDAGEM PARA A OBTENÇÃO DE INFORMAÇÃO 3D A PARTIR DE MOVIMENTOS DE CÂMARA <i>João M. R. S. Tavares (FEUP)</i>	178
APLICAÇÕES DA CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM À MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS EM MATERIAIS COM CARACTERÍSTICAS MECÂNICA DIVERSAS <i>J. A. G. Chousal (FEUP)</i>	181
CORRESPONDÊNCIA ENTRE PONTOS NO SEGUIMENTO DE MOVIMENTO EM IMAGENS <i>Raquel R. Pinto (FEUP); João M. R. S. Tavares (FEUP); Miguel V. Correia (FEUP)</i>	184
APLICAÇÃO DA INTERFEROMETRIA HOLOGRAFIA SUBAQUÁTICA PARA ANÁLISE ESTRUTURAL <i>J. M. Monteiro (INEGI); H. M. Lopes (IPB); J. L. Valin Rivera (UE Amazonas); M. A. P. Vaz (FEUP)</i>	187
INSPECÇÃO NÃO DESTRUTIVA POR TÉCNICAS DE ULTRASSONS EXCITADAS POR LASER <i>Jorge M. Reis (FEUP); Fernando M. G. de Almeida (FEUP); M. A. P. Vaz (FEUP)</i>	189
TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS NO PLANO <i>J. E. Ribeiro (IPB); H. M. Lopes (IPB); M. A. P. Vaz (FEUP); P. A. G. Piloto (IPB)</i>	192
TÉCNICAS DE DERIVAÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS SEM PROPAGAÇÃO E RUÍDO <i>H. M. Lopes (IPB); R. M. Guedes (FEUP); M. A. P. Vaz (FEUP)</i>	195
PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE FLEXÃO EM PLACAS COMPÓSITAS <i>H. M. Lopes (IPB); J. M. Monteiro (INEGI); R. M. Guedes (FEUP); M. A. P. Vaz (FEUP)</i>	198
OBTENÇÃO DE PERFIS 3D COMPLEXOS POR PERFILOMETRIA TRIDIMENSIONAL COM PROJECCÃO DE CAMPOS DE LUZ ESTRUTURADA <i>P. J. Tavares (FEUP); M. A. P. Vaz (FEUP)</i>	201

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA COMPUTACIONAL PARA OBTENÇÃO DA FORMA 3D DE OBJECTOS USANDO TÉCNICAS DE VISÃO ACTIVA <i>Teresa Azevedo (INEGI); João M. R. S. Tavares (FEUP); M. A. P. Vaz (FEUP)</i>	204
MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ESTRUTURAS	
ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DO ENSAIO ECT (EDGE CRACK TORSION) PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FRACTURA DA MADEIRA <i>Pinus Pinaster.Ait</i> EM PURO MODO III <i>M. A. L. Silva (UTAD); M. F. S. F. Moura (FEUP); J. J. L. Morais (UTAL)</i>	207
MODELO TERMO-ELÉCTRICO EM ELEMENTOS FINITOS PARA ELECTROEROSÃO <i>José Marafona (FEUP); J. A. G. Chousal (FEUP)</i>	210
MODELOS PARA PLACAS COMPÓSITAS BASEADOS EM APROXIMAÇÕES POR FUNÇÕES DE BASE RADIAL <i>A. J. M. Ferreira (FEUP); C. M. C. Roque (FEUP); R. M. M. Jorge (FEUP)</i>	213
USO DE ELEMENTOS DE INTERFACE NA ANÁLISE NUMÉRICA DO DANO EM PLACAS LAMINADAS DE CARBONO/EPÓXIDO <i>A. M. Amaro (UC); M. F. S. F. Moura (FEUP); J. M. O. S. Cirne (UC); Nuno F. Rilo (UC)</i>	216
O MÉTODO LIVRE DE ELEMENTOS DE GALERKIN NA ANÁLISE NÃO-LINEAR DE ESTRUTURAS ANISOTRÓPICAS <i>Jorge Belinha (IDMEC); Lúcia M. J. S. Dinis (FEUP)</i>	219
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA CINÉTICA DO PROCESSO DE EXPANSÃO DE UMA ESPUMA METÁLICA <i>I. M. A. Duarte (INETI); A. J. M. Ferreira (FEUP); M. J. G. Santos (FEUP); J. Banhart (UT Berlim)</i>	222

TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

J. Ribeiro*, M. Vaz**, P. Piloto*, J. Monteiro***

* - IPB, Instituto Politécnico de Bragança,

** - FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

*** - INEGI, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

RESUMO

Ao longo das últimas décadas praticamente todas as técnicas de análise experimental de tensões foram utilizadas na caracterização de tensões residuais. Dadas as dificuldades encontradas algumas técnicas foram especialmente desenvolvidas para esta aplicação. Neste texto descreve-se o trabalho já realizado no Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME) para caracterizar campos de tensões residuais utilizando algumas das técnicas disponíveis.

1- INTRODUÇÃO

Tensões residuais são aquelas que se mantêm instaladas nos componentes após terem sido removidas todas as cargas e constrangimentos. Estas tensões, quando instaladas num material ou estrutura, são internas e auto-equilibrantes. As técnicas de medição de tensões residuais podem ser classificadas em três tipos: técnicas destrutivas, semi-destrutivas e não destrutivas. Para realizar a sua caracterização, por métodos mecânicos, provoca-se uma perturbação ao estado de equilíbrio inicial e estabelece-se um novo estado de equilíbrio; o que constitui as técnicas de relaxação de tensões residuais. Algumas destas técnicas podem mesmo conduzir à inutilização do componente ou estrutura. Outros métodos existem em que se determinam as tensões residuais através da variação das características físicas dos componentes (difracção de raios X).

Neste trabalho pretende-se fazer a medição de tensões residuais utilizando algumas técnicas semi-destrutivas. A perturbação do estado de equilíbrio inicial é obtida com a realização dum pequeno furo, que geralmente não compromete a integridade da estrutura ou do componente. Para a caracterização do campo de deslocamentos obtido por relaxação de tensões, optou-se pela utilização de duas técnicas de campo com elevada resolução; Moiré Interferométrico e Interferometria Holográfica. Foi ainda utilizada como técnica discreta a exten-

metria eléctrica. Para determinação dos parâmetros de calibração e para o cálculo de tensões residuais, recorreu-se à simulação numérica no programa de elementos finitos ANSYS®.

Numa primeira fase foram determinados os parâmetros de calibração, por via experimental, recorrendo ao método convencional do furo. Para tal foi utilizada uma roseta de extensómetros especialmente desenvolvida para esta técnica e uma máquina de ensaios convencional, como a representada na figura 1.

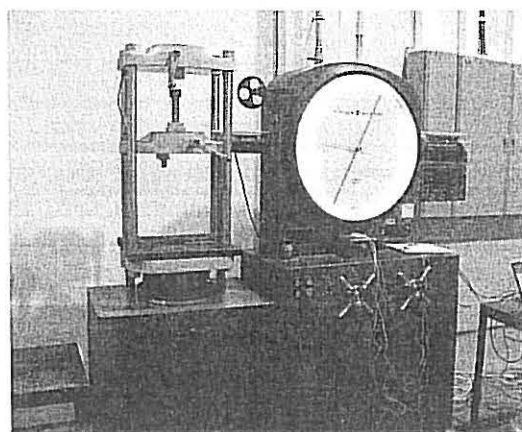


Fig. 1 – Máquina de ensaios uni axial utilizada na obtenção dos parâmetros de calibração.

Para obter a relaxação de tensões foi realizado um furo cego, concêntrico com a roseta de extensómetros, utilizando o equipamento que se pode ver na figura 2. A prévia determinação experimental dos parâmetros de calibração permitiu validar o modelo utilizado na simulação numérica. Neste foram calculadas as deformações correspondentes a um estado de tensão

imposto, os valores calculados foram comparadas com os medidos durante o ensaio de tracção.



Fig. 2 - Montagem do provete para a furação de relaxação de tensões utilizando o método do furo cego.

2- MODELO NUMÉRICO

A malha de elementos finitos que se representa na fig. 3 foi utilizada para simular

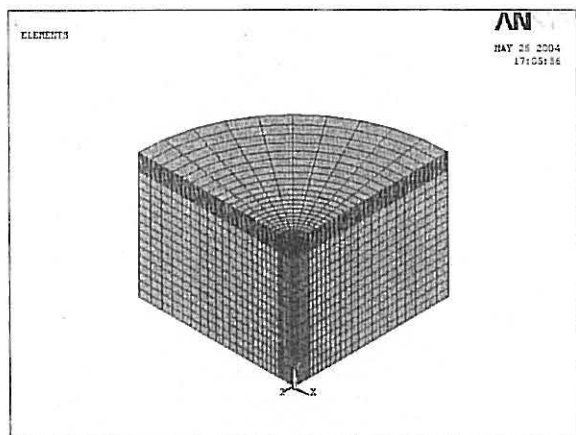


Fig. 3- Malha de elementos finitos utilizada.

Após a obtenção dos parâmetros de calibração, ver figura 4, procedeu-se à medição das tensões residuais recorrendo às técnicas já referidas.

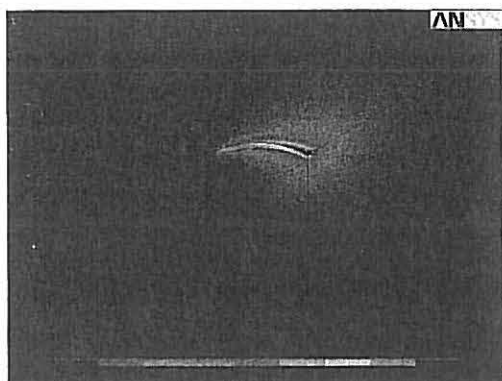


Fig. 4 - Campo de tensões utilizado para a determinação dos parâmetros de calibração.

3- CASO DE ESTUDO

Foi estudado um componente obtido por laminagem a frio, com tensões residuais resultantes do processo de fabrico.

A primeira técnica utilizada para a medição de tensões residuais foi a tradicional técnica do furo cego com extensometria eléctrica. Esta técnica é a mais utilizada para a medição de tensões residuais, é relativamente simples de utilizar, embora tenha como principal desvantagem o facto do erro de medição depender da maior ou menor excentricidade do furo. Desta forma a experiência do operador condiciona a precisão desta técnica.

De seguida fez-se a medição das tensões recorrendo à técnica de Moiré Interferométrico. Trata-se de uma técnica de campo especialmente adaptada para a medição no plano, com uma baixa sensibilidade a movimentos de corpo rígido e uma resolução ajustável ao passo da rede. A gravação da rede exige procedimentos de difícil realização, exigindo muita experiência por parte do operador.

Por último, utilizou-se a Interferometria Holográfica. Esta técnica de campo é extremamente sensível a movimentos de corpo rígido, pelo que na medição foi utilizada uma fixação rígida e uma mesa óptica. A grande vantagem desta técnica é a sua elevada resolução ($\lambda/2$ da radiação laser), permitindo medir deslocamentos muito pequenos.

Para a análise dos resultados obtidos nas medições com as técnicas ópticas, foi necessário recorrer a programas de processamento de imagem, pelo que foram desenvolvidas rotinas baseadas no cálculo de FFTs para obtenção dos mapas de fase. Desta forma foi possível determinar os campos de deslocamentos. Para se determinar o campo de deformações utilizaram-se rotinas de derivação. Os resultados destas medições foram comparados entre si, bem como com os valores resultantes da simulação numérica.

REFERÊNCIAS

- [1] Mathar, J., "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation around Drilled Holes" Transactions ASME. 56, (4), 1934.
- [2] Lu, J; James, M. R. and others "Handbook of Measurement of Residual Stresses", Society for Experimental, Inc., Edited by Jian Lu, 1996.
- [3] ASTM, 2001 "Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method", ASTM Standard E387-01, American Society for Testing and Materials.
- [4] Residual Stresses, Vishay, Measurements Group, Inc., USA, 1984.
- [5] Kandil, F. A., Lord, J. D., e outros "Review of Residual Stress Measurements Methods – a Guide to Technique Selection", NPL Report, UK, 2001.
- [6] Wu, Z.; Lu, J.; Han, B. "Study of Residual Stress Distribution of Moiré Interferometry and Incremental Hole Drilling", Journal of Applied Mechanics, Vol. 65, pg. 837-850, December 1998.
- [7] Post, D., Han B., Ifju P. "High Sensivity Moiré – Experimental Analysis of Mechanics and Materials", Springer – Verlag, New York, 1994.
- [8] Kobayashi, A. and others "Handbook on Experimental Mechanics", edited by Albert S. Kobayashi, Society for Experimental Mechanics, New York, 1993.
- [9] Zhu, Wu "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 Troyes, 1998.
- [10] Bulha kJ. "Interférométrie Différentielle sur réseau: Nouvelle Méthode Optique de Mesure de Déformations avec Grande Résolution Spatiale", Doctorat, Université Jean Monnet – Saint-Étienne, Saint-Étienne, France, 2001.
- [11] Viotti, M., and Kaufmann, G. "Accuracy and Sensitivity of a Hole Drilling and Digital Speckle Pattern Interferometry Combined Technique to Measure Residual Stresses", Optics and Lasers in Engineering, vol. 41, pg. 297-305, 2004.
- [12] Viotti, M. and others "Residual Stress Measurement Using a Radial In-plane Speckle Interferometer and laser annealing: preliminary results", Optics and Lasers in Engineering, vol. 42, pg. 71-84, 2004.
- [13] Schjer, G. S., "Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements", Journal of Engineering Materials and Technology, vol. 103, nº4, pg. 157-163, 1981.