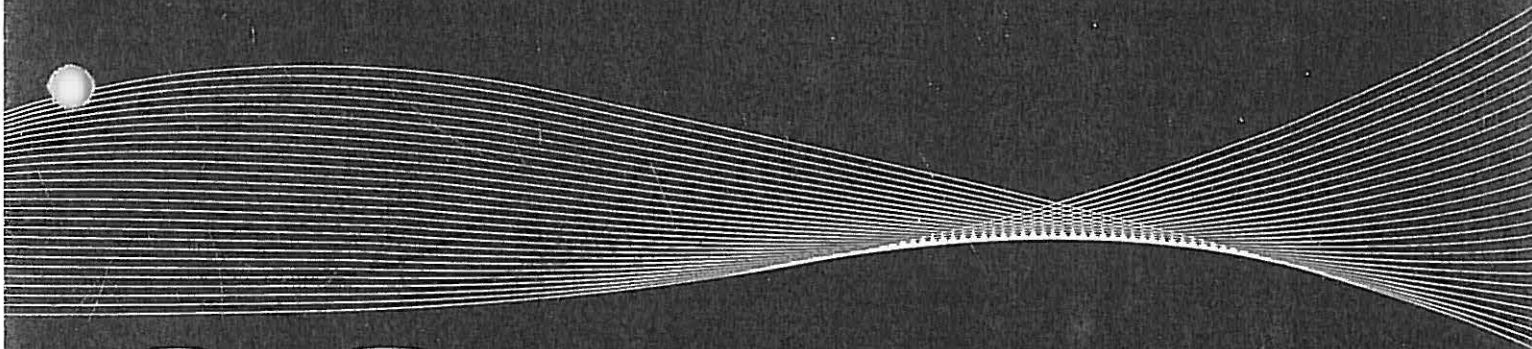




ASSOCIAÇÃO  
PORTUGUESA  
DE ANÁLISE  
EXPERIMENTAL  
DE TENSOES



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](mailto: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@INEGLUP.PT](mailto:INEGI@INEGLUP.PT)  
URL: [WWW.INEGLPT](http://WWW.INEGLPT)

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  
*Lúisa 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
 <b>BIOMECÂNICA</b>	
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
 <b>CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS</b>	
MEASUREMENT OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF A CARBON REINFORCED BISMALEIMIDE 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. Morais (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); Luis 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>Luís Esperto (INETI); António Osório (INETI)</i>	83
FABRICO RÁPIDO DE FERRAMENTAS PELA TECNOLOGIA DMLS <i>Luís Esperto (INETI); António Osório (INETI)</i>	86
<b>COMPORTAMENTO DE MATERIAIS</b>	
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
<b>ENSAIOS EXPERIMENTAIS</b>	
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 (ISO); 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
<b>ENSAIOS DE PONTES E BARRAGENS</b>	
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
<b>INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLO</b>	
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
<b>MECÂNICA DOS MATERIAIS</b>	
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
<b>MÉTODOS ÓPTICOS DE ANÁLISE EXPERIMENTAL</b>	
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
<b>MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ESTRUTURAS</b>	
ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DO ENSAIO ECT (EDGE CRACK TORSION) PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FRACTURA DA MADEIRA Pinus Pinaster. Ait 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 Berlin)</i>	222

## TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS NO PLANO

J. Ribeiro\*, H. Lopes\*, M. Vaz\*\*, P. A. G. Piloto\*

\* - IPB, Instituto Politécnico de Bragança,

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

### RESUMO

*A medição de deslocamentos no plano é um problema comum em Mecânica Experimental pelo que têm sido desenvolvidas várias técnicas para medir estes deslocamentos. As técnicas disponíveis podem ser classificadas em dois grandes grupos: técnicas de campo e técnicas discretas. As primeiras medem de forma global e continua os deslocamentos numa região do plano enquanto que as outras fazem essas medições em pontos discretos. Das inúmeras técnicas experimentais utilizadas na medição de deslocamentos no plano, as mais versáteis são as técnicas ópticas por permitirem uma medição de carácter global e sem contacto. Neste trabalho são descritas algumas medições realizadas com estas técnicas.*

### 1- INTRODUÇÃO

Alguns estudos de Mecânica da Fractura necessitam de uma caracterização rigorosa de campos de tensões na vizinhança de singularidades geométricas. O mesmo se aplica à medição de tensões residuais ou à caracterização de defeitos em estruturas. Nestes casos é necessário dispor de técnicas experimentais que permitam realizar medições de deslocamentos no plano e segundo a sua normal. Neste trabalho será dada especial atenção às técnicas que podem ser utilizadas na medição de campos de deslocamentos no plano sem necessidade de contactar com as superfícies a medir. As técnicas ópticas são as que melhor se adaptam à realização deste tipo de medida pelo que forma seleccionadas as seguintes técnicas:

- Técnicas de Moiré;
- Correlação de Imagem;
- Interferometria Holográfica;

### 2- TÉCNICAS DE MOIRÉ

Nas técnicas de Moiré a superfície a medir é previamente codificada através da gravação de um padrão de intensidade, pontos ou linhas. As alterações geométricas neste padrão, provocadas pela deformação do objecto, permitem obter o campo de deslocamentos, quer directamente por comparação com o padrão original, quer

recorrendo a técnicas de processamento de imagem. A resolução da medida está directamente relacionada com a frequência espacial do padrão. Assim, para uma resolução baixa, Moiré Geométrico, utiliza-se uma frequência até cerca de 100 linha/mm (luz monocromática) a resolução poderá ser aumentada utilizando Moiré Interferométrico, com redes de alta-frequência (até 3000 linhas/mm)[1],[2] e luz coerente (LASER) como se pode ver na fig. 1.

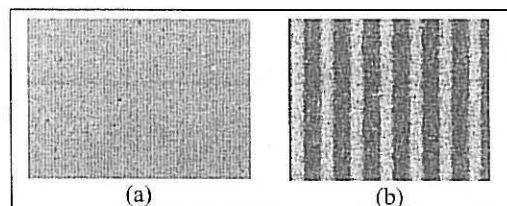


Figura 1. Redes de Moiré: (a) Elevada frequência, 1200 linha/mm (ampliação 500x); (b) Baixa frequência, 4 linhas/mm (ampliação 50x).

As técnicas de Moiré têm como principais vantagens: uma baixa sensibilidade a movimentos de corpo rígido e uma resolução ajustável que permite a realização de ensaios envolvendo grandes deslocamentos. Contudo, esta técnica tem algumas limitações, sendo as mais importantes relacionadas com dificuldades na gravação dos padrões de amplitude na superfície dos objectos, na fig.2 estão representados dois

objectos possuindo uma rede gravada na sua superfície.

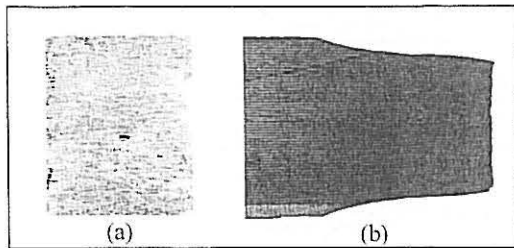


Figura 2 Exemplos de aplicações da técnica de Moiré geométrico para a medição de deslocamentos em ensaios estáticos (a) e dinâmicos (b) [5].

### 3- TÉCNICAS DE CORRELAÇÃO DE IMAGEM

Nas técnicas de correlação de imagem são utilizados padrões de intensidade de carácter aleatório e a imagem da superfície é subdividida num conjunto de áreas iguais. Da correlação entre as subdivisões das duas imagens registadas em diferentes estados de deformação do objecto,  $f(x, y)$  e  $f^*(x^*, y^*)$  obtêm-se os deslocamentos. O valor médio do deslocamento relativo de cada uma das subdivisões pode ser conhecido a partir das dimensões reais da imagem. Esta técnica apresenta como vantagem, uma baixa sensibilidade às perturbações externas, ao contrário das técnicas interferométricas. A sua sensibilidade está, no entanto, limitada pela resolução da câmara e pela sua área de medição. O deslocamento absoluto medido na subdivisão  $i$  entre duas imagens pode definir-se por:

$$\Delta L_j = \Delta L_{o_{i-1,j}} + \varepsilon_j \lambda_{i,j} \quad (1)$$

onde  $\varepsilon_j$  é a deformação no plano,  $\lambda_{i,j}$  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 em duas imagens diferentes, ou seja, a variação de comprimento  $\Delta L$  de cada subdivisão, definida por:

$$\Delta L = \frac{\varepsilon_j * np_j}{ndiv_j} * L_j \quad (2)$$

sendo  $np_j$  a resolução da câmara na direcção  $j$ ,  $ndiv_j$  o número de divisões na direcção  $j$  e  $L_j$  o comprimento de medição na direcção  $j$  do plano. Nas figuras seguintes estão representados alguns exemplos de resultados obtidos com a técnica de correlação de imagem relativo à deformação na superfície de uma placa de borracha que se mostra na fig. 3.

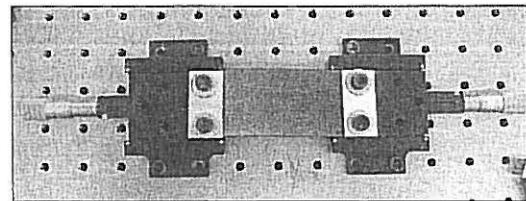


Figura 3 Imagem da montagem experimental utilizada na medição de deslocamentos no plano.

Na fig. 4 está representado o campo de deslocamentos, nas direcções longitudinal e transversal, obtidos sobre a superfície do objecto representado na figura anterior.

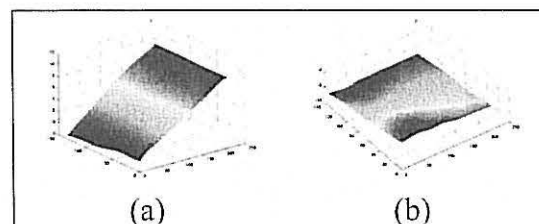


Figura 4 - Deslocamento no plano segundo a direcção X (a) e segundo a direcção Y (b).

### 4- TÉCNICAS HOLOGRÁFICAS

A holografia é uma técnica óptica com a qual se pode gravar e reconstruir toda a informação numa frente de onda (amplitude e fase) sendo a gravação destas grandezas feita com recurso a fenómenos interferométricos. Esta técnica tem como principais vantagens a possibilidade de medição no plano e fora dele, bem como a sua elevada resolução ( $\lambda/2$ ) da radiação laser de iluminação [3]. Contudo, é muito sensível a perturbações exteriores o que implica que o objecto a medir deva estar rigidamente fixado à montagem óptica uti-

lizada. Para a medição de deslocamentos no plano podem utilizar-se montagens com dupla iluminação e registo de hologramas em vídeo. Na fig. 5 representa-se esquematicamente uma montagem utilizada para realizar medições de deslocamentos no plano.

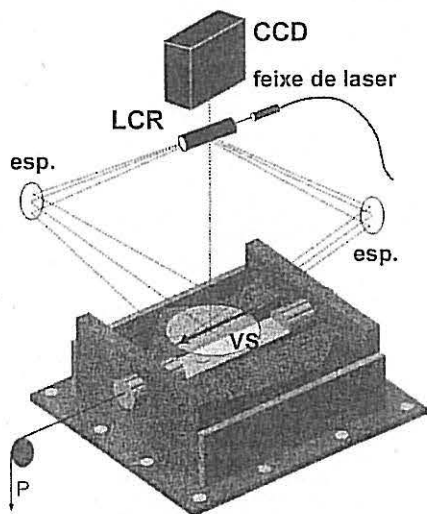


Figura 5 – Montagem óptica para medir deslocamentos no plano.

Com esta montagem é possível obter com elevada resolução os campos de deslocamentos na superfície do objecto. A montagem é sensível a deslocamentos no plano segundo a direcção paralela ao plano que contém os dois feixes.

## REFERÊNCIAS

- [1] Post, D., Han B., Ifju P. "High Sensivity Moiré – Experimental Analysis of Mechanics and Materials", Springer – Verlag, New York, 1994.
- [2] Kobayashi, A. and others "Handbook on Experimental Mechanics", Ed Albert S. Kobayashi, SEM, New York, 1993.
- [3] H Lopes, R M Guedes, M A Vaz, J D Rodrigues "Experimental response and numerical simulation of plates submitted to small mass impact" Proc. The Ninth International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, Egmond-aan-Zee, Holanda 2-4 Setembro de 2003.
- [4] Zhu, Wu "Détermination des contraintes résiduelles par interférométrie de Moiré et méthode de perçage du trou incrémental", PhD, Université de Technologie Troyes, 1998.
- [5] Ferreira, F. "Análise do Comportamento Dinâmico de Componentes Estruturais Sob Solicitações Generalizadas", PhD, FEUP 2003.
- [6] Ribeiro, João, Vaz, Mário, Piloto, Paulo "Medição de Campos de Tensão Recorrendo à Técnica de Moiré", Métodos Computacionais em Engenharia incorporando o VIII Congresso Nacional de MAC e VI Congresso Ibérico de Métodos Numéricos em Ingenieriam, Lisboa, 31/5 a 2/6, 2004.
- [7] Peters, W. and Ranson, W. "Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis", Optical Engineering, 21, pg. 427-431, 1982.
- [8] 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.