

# IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS ELÁSTICOS E PIEZOELÉTRICOS EM ESTRUTURAS ACTIVAS DO TIPO PLACA: TÉCNICAS DE OPTIMIZAÇÃO CLÁSSICA VERSUS REDES NEURONAS ARTIFICIAIS

A.L. Araújo\*, H. Lopes, M. Vaz, C.M. Mota Soares, J. Herskovits

\* ESTIG – Instituto Politécnico de Bragança  
Campus de Sta, Apolónia, Apartado 134  
5301-857 Bragança, Portugal  
e-mail:araujo@ipb.pt

## SUMÁRIO

Com a crescente tendência para a utilização de sensores e actuadores piezoelétricos embebidos em estruturas laminadas, torna-se necessário conhecer as propriedades da estrutura que assim resulta da interligação de diferentes materiais. As propriedades fornecidas pelos fabricantes destes materiais não são, regra geral, por si só suficientes para prever o comportamento estrutural e permitir implementar algoritmos eficientes de controlo para aplicação em domínios tais como estruturas ultra leves aeroespaciais, estruturas aeronáuticas e para controlo activo de ruído e vibração de estruturas em geral.

Para responder a estas exigências de precisão são propostos em alternativa dois métodos mistos numérico-experimentais para a identificação de propriedades electromecânicas em materiais compósitos laminados com lâminas ou *patches* piezoelétricos. Pretende-se com estes métodos determinar, além das propriedades elásticas dos materiais constituintes do laminado, as propriedades piezoelétricas e dielétricas dos sensores e actuadores integrados. Os métodos são não destrutivos, pois apenas é utilizada informação de um ensaio de vibração em placas livres, no qual se pode usar directamente o material piezoelétrico como sensor e actuator ou recorrer a sensores e actuadores externos à estrutura. O modelo numérico é baseado num modelo de alta ordem de elementos finitos de placa.

O primeiro método recorre a técnicas de programação não linear para a inversão do problema de valores e vectores próprios e o processo de identificação é iterativo.

No segundo método é criado um meta-modelo do problema inverso, através do treino de uma rede neuronal artificial a partir de resultados produzidos pelo modelo numérico.

É descrito também o procedimento experimental para a determinação das frequências naturais da estrutura e dos respectivos modos de vibração, através de técnicas sem contacto.

As propriedades electromecânicas assim obtidas poderão ser utilizadas directamente em modelos de análise estrutural e em algoritmos de controlo activo de vibração e ruído, para a estrutura testada.

É apresentado um exemplo de aplicação, o qual permite avaliar as potencialidades e a aplicabilidade dos métodos propostos.

## IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS ELÁSTICOS E PIEZOELÉCTRICOS EM ESTRUTURAS ACTIVAS DO TIPO PLACA: TÉCNICAS DE OPTIMIZAÇÃO CLÁSSICA VERSUS REDES NEURONAS ARTIFICIAIS

A.L. Araújo\*, H. Lopes\*, M. Vaz\*\*, C.M. Mota Soares\*\*\*, J. Herskovits\*\*\*\*

\* ESTIG – Instituto Politécnico de Bragança  
Campus de Sta, Apolónia, Apartado 134  
5301-857 Bragança, Portugal  
e-mail: aaraujo@ipb.pt

\*\* DEMEGI – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Rua Dr. Roberto Frias  
4200-465 Porto, Portugal  
e-mail: gmavaz@fe.up.pt

\*\*\* IDMEC - Instituto Superior Técnico  
Av. Rovisco Pais  
1049-001 Lisboa, Portugal  
e-mail: cmmsoares@alfa.ist.utl.pt

\*\*\*\* COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Caixa Postal 68503, 21945-970 Rio de Janeiro, Brasil  
e-mail: jose@optimize.ufrj.br

**Palavras-chave:** Identificação, Vibrações, Optimização, Redes Neurais Artificiais

**Resumo.** Neste trabalho são apresentados dois métodos não destrutivos para a identificação de parâmetros elásticos e piezoelétricos em estruturas laminadas activas do tipo placa, com sensores/actuadores de superfície. O primeiro destes métodos resolve o problema inverso através de métodos de optimização clássica, minimizando a diferença entre frequências naturais experimentais e as fornecidas por um modelo de elementos finitos. O segundo método baseia-se na construção de um “meta-modelo” do problema inverso, recorrendo a Redes Neurais Artificiais. Os dois métodos são comparados recorrendo a resultados experimentais de uma placa em vibração livre.

## 1. INTRODUÇÃO

A precisão na determinação de parâmetros elásticos e piezoelétricos para a modelação e análise de estruturas laminadas activas revela-se importante em aplicações de controlo activo. As estimativas obtidas para essas propriedades por métodos tradicionais nem sempre correspondem aos parâmetros reais de cada estrutura, quer devido a alguma variabilidade apresentada pelos diversos componentes, quer devido ao facto destes mesmos parâmetros variarem com a gama dinâmica de interesse e, mais importante ainda, quando estes produtos são combinados como componentes numa configuração de material compósito activo, os valores efectivos destes parâmetros são normalmente bastante diversos.

Para abordar este problema, são propostos dois métodos não destrutivos para a determinação de parâmetros elásticos e piezoelétricos de estruturas activas do tipo placa com sensores/actuadores piezoelétricos de superfície. Ambos os métodos recorrem a frequências naturais experimentais de vibração livre, baseando-se o primeiro em técnicas de optimização clássica para a inversão do problema de valores e vectores próprios e o segundo em técnicas de meta-modelação do problema inverso, recorrendo a redes neuronais artificiais.

Em ambos os métodos, a resposta do sistema consiste num conjunto de frequências naturais não amortecidas de vibração livre de placas completamente livres no espaço. Assim, torna-se de extrema importância tanto a medição experimental precisa da resposta do sistema como um modelo numérico capaz de reproduzir essa mesma resposta. Este modelo numérico é um modelo de elementos finitos de alta ordem para placas laminadas, o qual inclui o efeito piezoelétrico [1].

Este trabalho é uma generalização de trabalhos anteriores que recorrem a técnicas de optimização clássica para laminados constituídos por um ou mais materiais diferentes [2,3,4] e que incluem identificação de parâmetros piezoelétricos [1] e tem o aspecto inovador de aplicar Redes Neuronais Artificiais para estimar parâmetros elásticos e piezoelétricos em laminados activos, usando quantidades de resposta global como sejam as frequências naturais de vibração livre. São também apresentados resultados experimentais obtidos por interferometria holográfica numa placa de material compósito.

Diversas técnicas de identificação de parâmetros elásticos foram já propostas por diferentes autores. Uma descrição de diferentes abordagens para a identificação de propriedades mecânicas em laminados compósitos planos usando métodos baseados em técnicas de optimização clássica e frequências naturais experimentais pode ser encontrada em [5]. Outros métodos baseados também em frequências naturais experimentais para a identificação de propriedades elásticas em laminados compósitos planos recorrem a superfícies de resposta [6] e técnicas de ajuste de modelos [7]. Uma outra classe de métodos inversos para a determinação de parâmetros elásticos em estruturas compósitas baseia-se em medições de ultra-sons e de propagação de ondas combinadas com técnicas de optimização, onde foram utilizados algoritmos genéticos [8,9]. Mais recentemente, foram também usadas redes neuronais artificiais para estimar propriedades elásticas de placas laminadas anisotrópicas usando como resposta deslocamentos de superfície numa simulação de propagação de ondas [10].

No que respeita à identificação conjunta de propriedades elásticas e piezoelétricas em estruturas activas do tipo placa com sensores/actuadores piezoelétricos de superfície, foram propostas algumas técnicas baseadas em métodos de optimização clássica [1,11,12].

## 2. MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico é um modelo de elementos finitos de alta ordem para laminados, com expansão cúbica na coordenada de espessura dos deslocamentos no plano e com deslocamento transversal constante em espessura, como mostra a Equação (1) para a placa laminada da Figura 1a.

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) + z\theta_x(x, y, t) + z^2u_0^*(x, y, t) + z^3\theta_x^*(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) + z\theta_y(x, y, t) + z^2v_0^*(x, y, t) + z^3\theta_y^*(x, y, t) \\ w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t) \end{aligned} \quad (1)$$

Em (1),  $u_0$ ,  $v_0$  e  $w_0$  são os deslocamentos da superfície média nas direcções  $x$ ,  $y$  e  $z$ ,  $t$  representa o tempo e  $\theta_x$  e  $\theta_y$  são as rotações das normais ao plano médio em torno do eixos  $y$  (sentido directo) e  $x$  (sentido inverso), respectivamente. As funções  $u_0^*$ ,  $v_0^*$ ,  $\theta_x^*$  e  $\theta_y^*$  são os termos de alta ordem na expansão em série de Taylor do campo de deslocamentos, definidos também em relação ao plano médio do laminado.

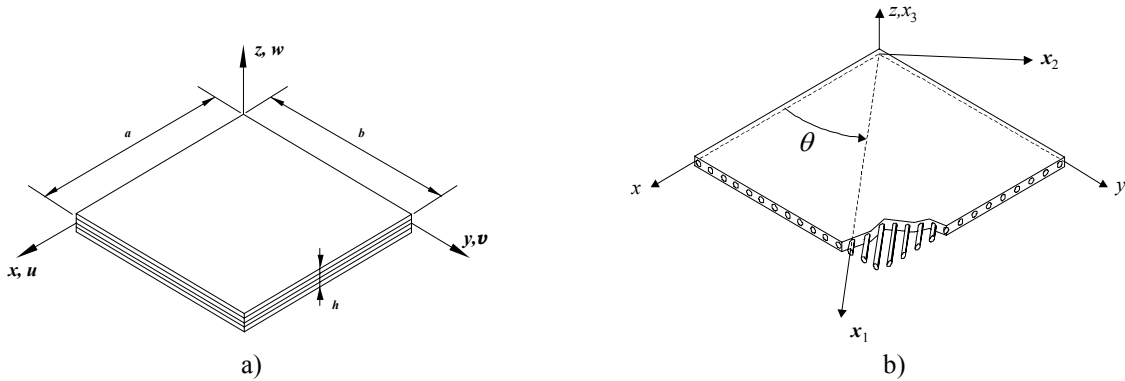


Figura 1. a) Placa laminada no sistema de eixos global e b) lâmina no sistema de eixos local.

Os detalhes referentes à formulação, desenvolvimento e implementação do modelo numérico para dinâmica podem ser encontrados em [13], ao passo que a inclusão do efeito piezoelétrico é descrito em detalhe em [1].

Para cada lâmina (Figura 1b) do laminado, as equações constitutivas no referencial principal local [14,15] são:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} &= \mathbf{Q}\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{e}^T \mathbf{E} \\ \mathbf{D} &= \mathbf{e}\boldsymbol{\varepsilon} + \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} \mathbf{E} \end{aligned} \quad (2)$$

Na Equação (2),  $\boldsymbol{\sigma}$  e  $\boldsymbol{\varepsilon}$  são os vectores contendo as cinco componentes de tensão e

deformação, correspondendo a um estado plano de tensão,  $\mathbf{e}$  é a matriz dos coeficientes piezoelétricos,  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{D}$  são os vectores de campo e deslocamento eléctricos, respectivamente,  $\overline{\boldsymbol{\epsilon}}$  é a matriz dieléctrica e  $\mathbf{Q}$  é a matriz dos coeficientes elásticos, expressa em termos dos seguintes parâmetros elásticos adimensionais:

$$\begin{aligned}
\alpha_2 &= 4 - 4E_2/E_1 \\
\alpha_3 &= 1 + (1 - 2\nu_{12})E_2/E_1 - 4\alpha_0 G_{12}/E_1 \\
\alpha_4 &= 1 + (1 + 6\nu_{12})E_2/E_1 - 4\alpha_0 G_{12}/E_1 \\
\alpha_5 &= (\alpha_1 - \alpha_4)/2 \\
\alpha_8 &= 4(G_{13} + G_{23})\alpha_0/E_1 \\
\alpha_9 &= 4(G_{13} - G_{23})\alpha_0/E_1
\end{aligned} \tag{3}$$

onde  $\alpha_0 = 1 - \nu_{12}^2 E_2/E_1$ .

Aplicando uma transformação de coordenadas entre o referencial principal  $(x_1, x_2, x_3)$  e o referencial global  $(x, y, z)$ , obtêm-se as equações constitutivas neste último referencial [1].

Para um laminado constituído por diversas lâminas de material compósito e piezoelétrico, as equações constitutivas são obtidas após integração na coordenada da espessura. As equações do movimento para vibrações livres são então formuladas pelo método dos elementos finitos, usando um elemento serendipeto de 8 nós com nove graus de liberdade por nó, correspondentes aos nove termos da expansão do campo de deslocamentos (1). Quanto aos graus de liberdade piezoelétricos, a diferença de potencial é constante em cada camada piezoelétrica do elemento. Com estas considerações, obtêm-se a seguinte equação de equilíbrio ao nível do elemento:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{uu}^e & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\boldsymbol{\phi}} \end{Bmatrix}^e + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu}^e & \mathbf{K}_{u\phi}^e \\ \mathbf{K}_{u\phi}^{eT} & \mathbf{K}_{\phi\phi}^e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ \boldsymbol{\phi} \end{Bmatrix}^e = \mathbf{0} \tag{4}$$

onde  $\mathbf{u}^e$ ,  $\ddot{\mathbf{u}}^e$ ,  $\boldsymbol{\phi}^e$  e  $\ddot{\boldsymbol{\phi}}^e$  são os graus de liberdade mecânicos do elemento e correspondentes acelerações, diferenças de potencial do elemento e correspondentes segundas derivadas, respectivamente.  $\mathbf{M}_{uu}^e$  e  $\mathbf{K}_{uu}^e$  são as matrizes de massa e rigidez do elemento, respectivamente, correspondendo a um comportamento puramente mecânico, enquanto que  $\mathbf{K}_{\phi\phi}^e$  é a matriz de rigidez piezoelétrica e  $\mathbf{K}_{u\phi}^e$  é a matriz de rigidez correspondente ao acoplamento entre os efeitos mecânicos e piezoelétricos.

Ainda ao nível do elemento, os graus de liberdade eléctricos são condensados, obtendo-se o seguinte problema de valores e vectores próprios, considerando vibrações livres e harmónicas:

$$(\mathbf{K}^{*e} - \lambda_i^e \mathbf{M}_{uu}^e) \mathbf{u}_i^e = \mathbf{0} \tag{5}$$

onde  $\mathbf{u}_i^e$  é o vector próprio do elemento correspondente ao valor próprio  $\lambda_i^e$  e  $\mathbf{K}^{*e} = \mathbf{K}_{uu}^e - \mathbf{K}_{u\phi}^e \mathbf{K}_{\phi\phi}^{e-1} \mathbf{K}_{u\phi}^{eT}$  é a matriz de rigidez condensada do elemento.

A equação de equilíbrio global, obtida por assemblagem das equações elementares, é:

$$(\mathbf{K}^* - \lambda_i \mathbf{M})\mathbf{u}_i = \mathbf{0} \quad (6)$$

onde  $\mathbf{K}^*$  e  $\mathbf{M}$  são as matrizes globais de rigidez e massa, respectivamente e  $\mathbf{u}_i$  são os vectores próprios do sistema, correspondentes aos valores próprios  $\lambda_i$ .

De forma a minimizar os erros associados com a modelação das condições de fronteira, apenas usamos placas completamente livres no espaço. Assim, há a necessidade de aplicar uma translação à matriz de rigidez, de forma a garantir que esta seja definida positiva [16].

### 3. TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO

As duas técnicas de identificação propostas são descritas de seguida. Ambas as técnicas usam como resposta experimental global da estrutura as suas frequências naturais não amortecidas em vibração livre. A técnica baseada em métodos clássicos de optimização é um procedimento iterativo para resolver o problema inverso, enquanto que a técnica de meta-modelação aproxima directamente o problema inverso através de redes neuronais artificiais.

#### 3.1. Optimização clássica

Nesta abordagem, a técnica de identificação consiste em minimizar a diferença entre a resposta do sistema físico e a resposta do modelo numérico de elementos finitos, ajustando as propriedades elásticas e piezoeléctricas deste último. A resposta consiste num conjunto de frequências naturais de vibração livre da placa, as quais são medidas experimentalmente e posteriormente utilizadas para ajustar a correspondente resposta do modelo numérico.

A função objectivo é uma função de erro quadrático médio:

$$\Phi = \sum_{i=1}^I \mathbf{w}_i \left( \frac{\tilde{\lambda}_i - \lambda_i}{\tilde{\lambda}_i} \right)^2 \quad (7)$$

onde  $\tilde{\lambda}_i$  são os valores próprios correspondentes à frequências naturais experimentais,  $\mathbf{w}_i$  são os pesos usados para exprimir o nível de confiança em cada valor próprio experimental e  $I$  é o número total de valores próprios usados.

O problema é formulado como a minimização constrangida da função de erro (7):

$$\begin{aligned} \min \quad & \Phi(\mathbf{b}) \geq 0 \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{g}(\mathbf{b}) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{b}^l \leq \mathbf{b} \leq \mathbf{b}^u \end{aligned} \quad (8)$$

Na Equação (8),  $\mathbf{b}$  é o vector das variáveis de projecto, cujas componentes são os parâmetros elásticos adimensionais (3) ou as constantes piezoeléctricas  $e_{31}$  e  $e_{32}$  em (2),  $\mathbf{g}$  é o vector dos constrangimentos impostos para manter as matrizes de elasticidade definidas positivas e  $\mathbf{b}^l$  e  $\mathbf{b}^u$  são os limites laterais das variáveis de projecto.

A técnica de optimização numérica integra métodos de minimização não constrangida, baseados no algoritmo de Gauss-Newton, com um algoritmo de ponto interior do arco admissível (FAIPA) para minimização constrangida [17,18].

Devido às diferentes ordens de grandeza das sensibilidades das frequências naturais em ordem aos diferentes tipos de variáveis de projecto (elásticas, piezoeléctricas ou dieléctricas), é usado um procedimento de identificação em três fases [1]. Na primeira fase são identificadas as propriedades elásticas da placa base sem os sensores/actuadores. Seguidamente, os sensores e actuadores são colados à superfície exterior da placa e são curto-circuitados, de forma a eliminar o efeito piezoeléctrico e ser possível a identificação das suas propriedades elásticas. Finalmente, na terceira fase são identificadas as propriedades piezoeléctricas dos sensores/actuadores em circuito aberto. Os parâmetros dieléctricos terão de ser determinados experimentalmente antes desta terceira fase, usando os procedimentos descritos na ASTM D150-98 [19].

### 3.2. Meta-modelação

Nesta abordagem é utilizada uma rede neuronal artificial constituída por duas camadas ocultas de neurónios com o objectivo de estabelecer um modelo do problema inverso, como representado na Figura 2.

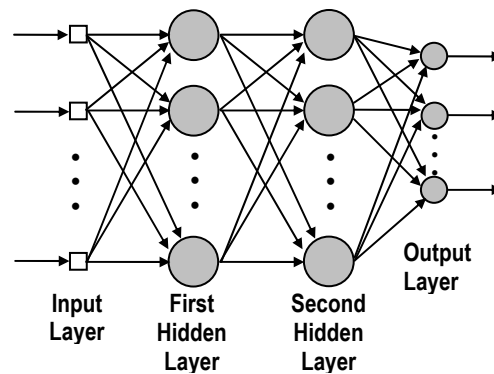


Figura 2. Rede neuronal com duas camadas ocultas

As entradas da rede são as frequências naturais de vibração livre não amortecidas e as saídas são as propriedades elásticas ou piezoeléctricas do laminado. Se se pretender identificar as propriedades elásticas, o número de neurónios de saída são seis, correspondendo às seis constantes elásticas independentes. Por outro lado, se se pretender identificar os coeficientes piezoeléctricos, então são apenas dois os neurónios na camada de saída.

De acordo com [20,21], é suficiente usar duas camadas ocultas para resolver este tipo de problemas inversos, tendo sido escolhido um número de neurónios em cada camada oculta de três vezes o número de entradas e saídas, respectivamente [22].

A rede neuronal pode ser encarada como uma transformação não linear entre o espaço de frequência e o espaço das propriedades elásticas ou piezoeléctricas, sendo cada neurónio definido como a unidade de processamento representada na Figura 3:

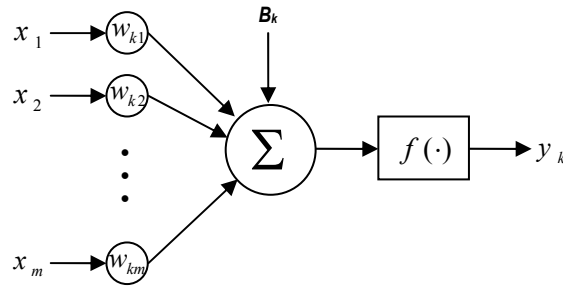


Figura 3. Modelo de um neurónio

Na Figura 3,  $w_{kj}$  é o factor de ponderação associado à entrada  $x_j$  do neurónio  $k$ ,  $B_k$  representa o limiar de activação associado a este mesmo neurónio e  $f$  é a correspondente função de activação. Assim, a saída do neurónio  $k$  pode ser escrita como:

$$y_k = f \left( \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j + B_k \right) \quad (9)$$

Neste trabalho, as funções de activação são do tipo log sigmoid para os neurónios das camadas ocultas e puramente lineares para os neurónios da camada de saída.

A saída da rede pode ser encarada como a transformação não linear (10), onde  $\mathbf{W}$  é a matriz contendo os factores de ponderação e limiares de activação,  $\mathbf{Y}$  é o vector de saída (propriedades elásticas ou piezoeléctricas) e  $\mathbf{X}$  é o vector de entrada (frequências naturais).

$$\mathbf{Y} = \mathbf{f}(\mathbf{W}, \mathbf{X}) \quad (10)$$

Ao estabelecer esta transformação não linear, os parâmetros a serem ajustados são as entradas da matriz  $\mathbf{W}$ . Isto é conseguido através de um processo de aprendizagem supervisionada, mostrando à rede pares de entradas/saídas conhecidas, obtidas a partir do modelo numérico de elementos finitos. Os parâmetros da rede são assim ajustados para que esta consiga reproduzir os dados com que foi treinada, da forma mais próxima possível. Este processo define um problema de minimização não constrangida e foi usado o método de Levenberg-Marquardt para o resolver, minimizando o erro quadrático médio entre as respostas da rede e os valores alvo do conjunto de dados de treino.

Os dados de treino da rede para o caso da identificação de propriedades elásticas foram definidos recorrendo ao conceito de matriz ortogonal, reduzindo assim a dimensão deste conjunto de dados de  $5^6$  para 25. Isto corresponde a uma matriz ortogonal L25 para 6 factores (propriedades elásticas) e 5 níveis para cada factor [23]. Tanto as entradas como as saídas foram normalizadas à unidade para evitar o fenómeno da saturação.

Após completo o treino da rede, esta pode ser usada para estimar as propriedades dos materiais, fornecendo-lhe as frequências naturais medidas experimentalmente. Novamente foi utilizada a abordagem das três fases, referida anteriormente.



#### 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Na mecânica experimental as técnicas ópticas são cada vez mais utilizadas para a medição de deslocamento em objectos em vibração. Esta técnica permite medir a amplitude de vibração do objecto com elevada resolução. Esta propriedade depende do comprimento de onda do laser e é da ordem de algumas décimas de micrometro. Sendo uma técnica sem contacto, baseada na interferência entre frentes de onda, pode ser aplicada a superfícies com geometrias complexas. Com a substituição das placas holográficas por sistemas de vídeo é possível obter sistemas compactos e de fácil utilização.

A interferometria holográfica é uma técnica de medição, baseada na correlação entre duas ou mais frentes de onda em que uma delas é reconstruída a partir dum holograma. O interferograma resulta da correlação entre as frentes de onda e corresponde a um conjunto de franjas representando pontos de igual amplitude de vibração. A correlação das frentes de onda pode ser realizada de uma das seguintes formas: *time-average* e dupla exposição. Na correlação em *time-average* são gravados vários ciclos da vibração que são adicionados no mesmo interferograma. Esta técnica permite obter a distribuição espacial da amplitude de vibração e está limitada a medições em objectos com movimento harmónico estacionário.

Finalmente, a correlação em dupla exposição é utilizada para estudar fenómenos dinâmicos rápidos como são as vibrações e deslocamentos transientes. Esta técnica utiliza iluminação por impulsos laser para gravar os hologramas. A curta duração de cada impulso (90ns) faz com esta técnica seja praticamente imune às perturbações exteriores e possa ser utilizada em ambiente industrial.

A correlação em dupla exposição pode ser realizada em qualquer instante depois da gravação de dois ou mais hologramas. Contudo, o tempo entre registos deve ser cuidadosamente escolhido de forma a evitar deslocamentos para além da capacidade de medição desta técnica. Da correlação das frentes de onda resulta um padrão de franjas sobre o objecto. Estas franjas correspondem aos pontos da superfície com igual deslocamento na direcção do vector sensibilidade [24].

A interferometria holográfica gera grandes quantidades de informação que podem ser processadas e interpretadas através de técnicas de processamento de imagem [25]. Vários algoritmos de processamento de imagem estão disponíveis para a representação e interpretação dos resultados.

##### 4.1. Determinação de frequências naturais

Tendo como objectivo a determinação experimental das frequências naturais de vibração através da medição da função de resposta em frequência de um laminado plano de fibra de carbono T300 de dimensões  $278.0 \times 199.5 \times 1.6 \text{ mm}^3$ , com sequência de empilhamento  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$  e com massa de 144.4 g, este foi suspenso verticalmente por elásticos de grande flexibilidade simulando, desta forma, a condição livre-livre. Para a excitação foi utilizado um martelo de impacto Brüel & Kjær modelo 8203 e a resposta foi medida por um Laser Vibrometer Polytec modelo 3000. Os sinais devidamente condicionados são tratados num analisador Brüel & Kjær modelo 2035 e a função de resposta em frequência

determinada (Figura 4).

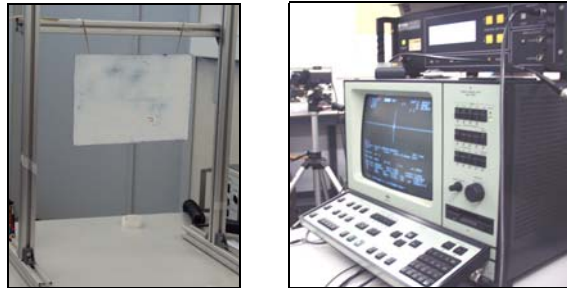


Figura 4: Montagem experimental para a medição da função de resposta em frequência.

Na Figura 5 representa-se uma das funções de resposta em frequência obtida após três médias para a banda de análise 0 Hz a 800 Hz.

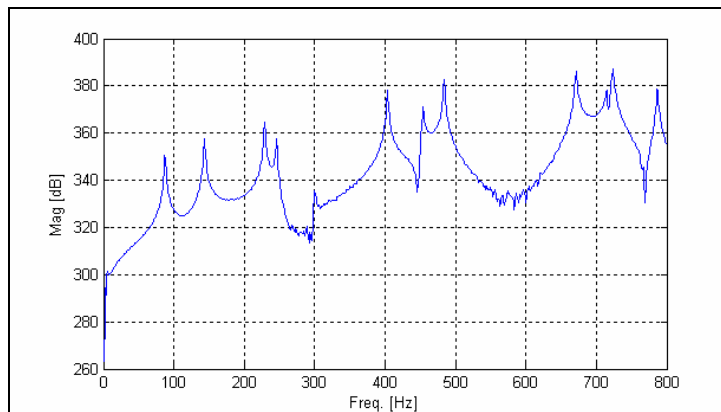


Figura 5: Função de resposta em frequência da placa laminada de carbono.

A partir das funções de resposta em frequência medidas foram identificadas as doze primeiras frequências naturais de vibração da placa para a banda de 0 Hz aos 800 Hz. Na Tabela 1 representam-se as frequências identificadas.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Frequência [Hz]	88	145	229	248	300	407	457	487	678	717	730	790

Tabela 1: Frequências naturais de vibração identificadas por medição experimental

#### 4.2. Determinação de formas naturais

Conhecidas as frequências características recorreu-se a uma segunda técnica experimental para a determinação das formas naturais de vibração da placa. Esta técnica é baseada na holografia TV de duplo impulso e a sua montagem básica está representada na Figura 6. Um

laser de Ruby LUMONICS é utilizado para gerar um par de impulsos separados no tempo de  $1\mu\text{s}$  a  $800\mu\text{s}$ . Os hologramas da dupla exposição são gravados por uma câmara CCD e posteriormente processados através de um módulo de processamento de imagem. É utilizada a correlação por dupla exposição e os padrões de franjas secundárias obtidos representam os pontos de igual deslocamento.

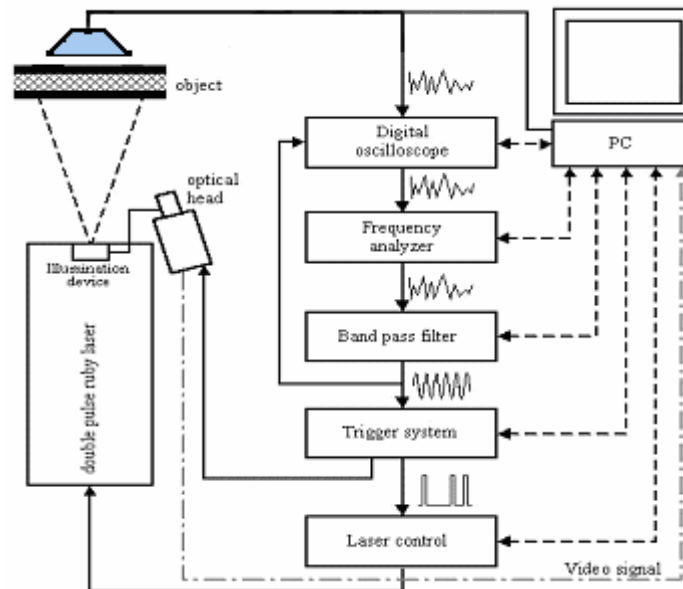


Figura 6: Diagrama da montagem experimental utilizada com interferometria holográfica pulsada.

A distribuição da fase no interferograma é calculada através de um algoritmo de processamento de imagem por desmodelação de uma portadora espacial introduzida nas franjas primárias. Finalmente, a deformação da placa é determinada através da eliminação das descontinuidades da distribuição da fase de cada interferograma, processo designado por *unwrapping*.

Neste ensaio a placa foi suspensa na vertical por elásticos de grande flexibilidade de modo a garantir a condição livre-livre. Um altifalante foi colocado na parte anterior da placa de modo a obter a sua excitação acústica. Um gerador de sinal e um amplificador foram utilizados para gerar um sinal harmónico estacionário às frequências naturais de vibração da placa. O mesmo sinal foi utilizado para sincronizar o disparo dos dois impulsos do laser de Ruby.

Na Figura 7 estão representados alguns detalhes da montagem experimental utilizada nas medições por holografia TV.

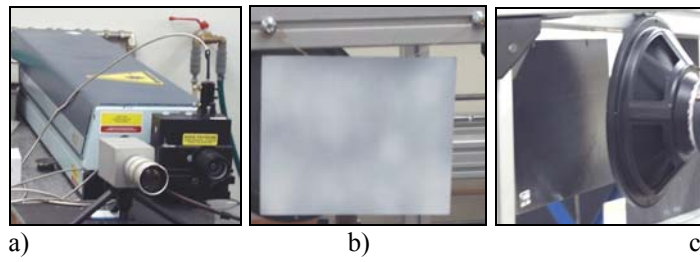


Figura 7: a) laser de Ruby LUMONICS e câmara CCD; b) montagem da placa; c) sistema de excitação acústica

Na Figura 8 estão representadas as formas naturais de vibração medidas por interferometria holográfica para frequências naturais situadas na banda de 0 Hz a 800 Hz.

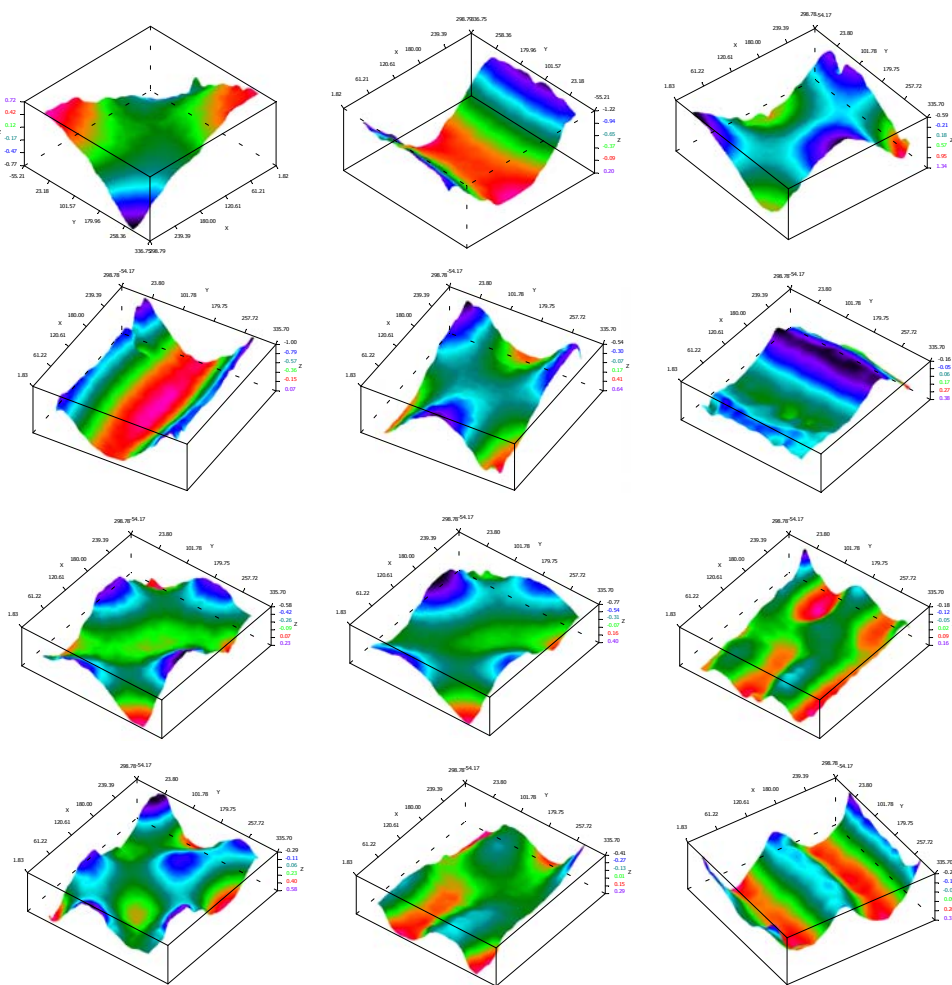


Figura 8: Formas naturais de vibração do laminado de fibra de carbono.

## 5. APLICAÇÃO

Nesta secção são apresentados os resultados de identificação obtidos pelas duas técnicas de identificação descritas anteriormente, as quais se designam aqui por FAIPA (método de optimização clássica) e RNA (redes neuronais artificiais). A placa é a descrita na secção anterior, sendo feita a identificação das suas propriedades elásticas a partir das frequências experimentais obtidas e apresentadas na Tabela 1. No que respeita à identificação das propriedades elásticas e piezoeléctricas de sensores/actuadores, simula-se uma colocação de nove pares de *patches* de PZT-4, de dimensões  $50 \times 30 \times 0.5 \text{ mm}^3$ , igualmente distribuídos e fixos às superfícies superior e inferior da placa. As propriedades identificadas para cada material encontram-se na Tabela 2, assim como as propriedades para as identificações simuladas.

	Carbono T300		PZT-4		
	Identificadas		Alvo	Identificadas por simulação	
	FAIPA	RNA		FAIPA	RNA
$E_1$ [GPa]	126.0	126.2	81.3	81.9	81.0
$E_2$ [GPa]	16.1	15.2	81.3	81.9	82.1
$G_{12}$ [GPa]	5.5	5.7	30.6	30.7	30.6
$G_{13}$ [GPa]	8.6	5.7	25.6	33.6	23.0
$G_{23}$ [GPa]	8.6	6.9	25.6	33.6	31.7
$\nu_{12}$	0.16	0.19	0.33	0.29	0.33
$e_{31}$ (N/Vm)	—	—	-5.2	-5.0	-5.0
$e_{32}$ (N/Vm)	—	—	-5.2	-5.4	-3.1
$\epsilon_{33}$ ( $10^{-9}$ F/m)	—	—	11.5	—	—
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1590		7600	—	—

Tabela 2 – Propriedades dos materiais

Na Tabela 3 apresentam-se as frequências naturais não amortecidas e respectivos resíduos obtidos após identificação para cada uma das três fases. Exceptuam-se as frequências naturais para a Fase 1, visto que estas se encontram já representadas na Tabela 1. Os resíduos são definidos pela seguinte expressão:

$$r_i = (\tilde{f}_i - f_i) / \tilde{f}_i \times 100 \quad (11)$$

onde  $\tilde{f}_i$  e  $f_i$  são as frequências naturais experimentais e numéricas, respectivamente.

	Fase 1		Fase 2			Fase 3		
	$r_i$ [%]		$\tilde{f}_i$ [Hz]	$r_i$ [%]		$\tilde{f}_i$ [Hz]	$r_i$ [%]	
	FAIPA	RNA		FAIPA	RNA		FAIPA	RNA
1	0.05	0.29	104.6	0.07	0.04	104.6	0.07	0.04
2	0.17	0.05	142.9	0.10	-0.02	143.0	0.10	0.01
3	-0.20	-0.13	240.2	0.02	0.05	240.4	0.03	-0.01
4	-0.12	-0.43	260.8	0.04	0.02	261.0	0.04	0.02
5	-0.23	-0.38	322.4	0.05	0.05	322.6	0.06	0.01
6	-0.18	-0.29	413.2	0.01	-0.01	413.5	0.01	0.00
7	0.13	0.11	517.1	-0.05	0.04	517.6	-0.04	0.01
8	0.06	0.05	554.7	0.04	0.02	555.0	0.04	0.02
9	0.26	-0.08	697.4	0.01	0.03	697.8	0.02	-0.01
10	0.10	0.09	786.6	0.01	0.03	786.9	0.02	0.00
11	-0.07	-0.35	865.4	0.01	-0.05	867.8	-0.00	0.00
12	0.02	-0.12	893.9	0.01	0.04	894.5	0.01	0.02
13	—	—	943.3	0.05	-0.03	944.8	0.04	0.01
14	—	—	1025.0	-0.05	0.03	1025.9	-0.05	0.00
15	—	—	1211.5	-0.09	0.01	1213.8	-0.09	-0.00
16	—	—	1430.8	-0.02	-0.04	1434.4	-0.03	-0.00

Tabela 3 – Frequências naturais e resíduos obtidos após identificação

Na simulação de identificação das propriedades do PZT-4 foram consideradas 16 frequências naturais devido ao facto da introdução destes sensores/actuadores produzirem efeitos mais pronunciados nas frequências mais elevadas. Este facto é sobretudo mais evidente para a Fase 3, onde as diferenças são bastante pequenas, indiciando a necessidade de se trabalhar em bandas de frequência mais elevadas ou, alternativamente, estudar a melhor localização dos *patches*, de forma a maximizar a sua influência sobre alguns dos modos nesta banda de frequência em análise (Figura 8).

## 6. CONCLUSÕES

Foram apresentados duas abordagens distintas para a identificação de propriedades elásticas e piezoeléctricas em estruturas activas do tipo placa com sensores/actuadores de superfície, bem como o respectivo procedimento experimental. Quanto ao procedimento experimental, ficou demonstrado ser possível utilizar técnicas de holografia TV pulsada para a medição das formas naturais de vibração da placa livre. A utilização de uma montagem óptica cuidada e um sistema de trigger desenvolvido para este efeito permitiu eliminar os efeitos dos movimentos de corpo rígido.

A partir de uma observação directa dos resultados pode-se concluir que as duas técnicas produzem bons resultados, embora a técnica de meta-modelação baseada em redes neuronais artificiais apresente por vezes resíduos superiores, estando sujeita a uma maior variabilidade.

Devido à reduzida espessura da placa os módulos de corte transversais  $G_{13}$  e  $G_{23}$  não podem ser identificados com precisão, visto o efeito de corte nesta placa ser desprezável.

Ocorre ainda alguma propagação de erro, especialmente evidente na identificação das propriedades piezoelétricas na Fase 3 e mais concretamente usando redes neuronais.

Uma comparação de tempos de execução entre as duas abordagens mostra que o método da meta-modelação por redes neuronais é cerca de duas vezes mais lento que o método baseado em técnicas de optimização clássica.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da FCT/POCTI/FEDER, Projectos POCTI/EME/12028/98/2001, POCTI/2001/EME/37559 e FCT/GRICES-CNPq (Brasil). O primeiro autor agradece ainda ao Professor Pauli Pedersen e à Universidade Técnica da Dinamarca todo o apoio e colaboração.

## REFERÊNCIAS

- [1] A.L. Araújo, C.M. Mota Soares, J. Herskovits, P. Pedersen, Development of a finite element model for the identification of mechanical and piezoelectric properties through gradient optimisation and experimental vibration data, *Composite Structures*, 58, 307-318 (2002).
- [2] C.M. Mota Soares, M. Moreira de Freitas, A.L. Araújo, P. Pedersen, Identification of material properties of composite plate specimens, *Composite Structures*, 25, 277-285 (1993).
- [3] A.L. Araújo, C.M. Mota Soares, M.J. Moreira de Freitas, Characterization of material parameters of composite plate specimens using optimization and experimental vibrational data, *Composites B*, 27B, 185-191 (1996).
- [4] A.L. Araújo, C.M. Mota Soares, M.J. Moreira de Freitas, P. Pedersen, Combined numerical-experimental model for the identification of mechanical properties of laminated structures, *Composite Structures*, 50, 363-372 (2000).
- [5] P. Pedersen, Identification techniques in composite laminates, In: C.A. Mota Soares, C.M. Mota Soares, M.J.M. Freitas, editors, *Mechanics of Composite Materials and Structures*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 443-452 (1999).
- [6] R. Rikards, H. Abramovich, T. Green, J. Auzins, A. Chate, Identification of elastic properties of composite laminates, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 10, 335-352 (2003).
- [7] J. Cunha, J. Piranda, Application of model updating techniques in dynamics for the identification of elastic constants of composite materials, *Composites B*, 30(1), 79-85 (1999).
- [8] K. Balasubramaniam, N.S. Rao, Inversion of composite material elastic constants from ultrasonic bulk wave phase velocity data using genetic algorithms, *Composites B*, 29B, 171-180 (1998).
- [9] G. R. Lui, W.B. Ma, X. Han, An inverse procedure for determination of material constants of composite laminates using elastic waves, *Comput. Methods Appl. Engrg.*, 191, 3543-3554 (2002).
- [10] G. R. Lui, K.Y. Lam, X. Han, Determination of elastic constants of anisotropic laminated

- plates using elastic waves and a progressive neural network, *J. Sound Vib.*, 252(2), 239-259 (2002).
- [11] H.T. Banks, R.C. Smith, Y. Wang, *Smart Material Structures – Modeling, Estimation and Control*, Wiley, New York (1996).
- [12] H.T. Banks, R.C. Smith, D.E. Brown, V.L. Metcalf, R.J. Silcox, The estimation of material and patch parameters in a PDE-based circular plate model, *J. Sound Vib.*, 199(5), 777-799 (1997).
- [13] J.S. Moita, C.M. Mota Soares, C.A. Mota Soares, Buckling and dynamic behaviour of laminated composite structures using a discrete higher order displacement model, *Comput. Struct.*, 73, 407-423 (1999).
- [14] J.A. Mitchell, J.N. Reddy, A refined hybrid plate theory for composite laminates with piezoelectric laminae, *I. J. Solids Struct*, 32(16), 2345-2367 (1995).
- [15] J.N. Reddy, On laminated composite plates with integrated sensors and actuators, *Eng. Struct.*, 21, 568-593 (1999).
- [16] O.C. Zienkiewicz, *The Finite Element Method in Engineering Science*, McGraw-Hill, New York (1971).
- [17] J. Herskovits, A feasible directions interior point technique for nonlinear optimization, *J. Optim. Theory Appl.*, 99(1), 121-146 (1998).
- [18] J. Herskovits, A view on nonlinear optimization, In: *Advances Structural Optimization*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1995).
- [19] ASTM D150-98, Standard test methods for AC loss characteristics and permittivity (dielectric constant) of solid electrical insulation, American Society for Testing and Materials (1998).
- [20] S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Prentice Hall, New Jersey (1999).
- [21] E.D. Sontag, Feedback stabilization using two-hidden-layer nets, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 3, 981-990 (1992).
- [22] Z. Zhang, K. Friedrich, Artificial neural networks applied to polymer composites: a review, *Composite Science and Technology*, 63, 2029-2044 (2003).
- [23] G. Taguchi, S. Konish, *Taguchi Methods, Orthogonal Arrays and Linear Graphs: Tools for Quality Engineering*, Dearborn: American Supplier Institute (1987).
- [24] Burch, J. M.; Holographic Measurement of Displacement and Strain, *Journal of Strain Analysis* 9(1), 1-3 (1974).
- [25] Chousal, J.A.G.; Processamento de Imagem na Interpretação de Franjas Interferométricas em Análise Experimental de Tensões, (*Image processing in the interpretation of interferometric fringes in Experimental Mechanics*), MSc Thesis, FEUP (1991).



# **Congresso de Métodos Computacionais em Engenharia**

**Incorporando**  
**VIII Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional**  
**(APMTAC)**  
**VI Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería**  
**(SEMNI)**

**Lisboa, 31 de Maio - 2 de Junho**

## **Programa**



## 31 de Maio

### Pequeno Auditório

#### 11:15 – 12:45 MATERIAIS COMPÓSITOS I

Mesa: Cristóvão Mota Soares e J. Llorca

Modelos de identificação do dano com base nas características dinâmicas de estruturas

*J. V. A. dos Santos, C. M. M. Soares, C. A. M. Soares e N. M. Maia*

Optimização de estruturas laminadas adaptativas com controlo activo

*J. S. Moita, C. M. M. Soares e C. A. M. Soares*

Estudo de placas compósitas através do desenvolvimento de polinómios de legendre e funções de base radial

*A. J. M. Ferreira*

Análise viscoelástica de cascas laminadas ortotrópicas através do MEF

*R. R. Paccola, L. Vanalli e H. B. Coda*

O MEF aplicado à análise elastoplástica de estruturas compostas por lâminas ortotrópicas

*R. R. Paccola, L. Vanalli e H. B. Coda*

Avaliação numérica e experimental da influência da assimetria material em juntas de sobreposição simples de materiais compósitos

*A. G. Magalhães e M. F. S. F. de Moura*

#### 14:30 – 16:15 MATERIAIS COMPÓSITOS II

Mesa: Cristóvão Mota Soares e J. Llorca

Identificação de parâmetros elásticos e piezoéctricos em estruturas activas do tipo placa: técnicas de optimização clássica versus redes neuronais artificiais

*A. L. Araújo, H. Lopes, M. Vaz, C. M. M. Soares e J. Herskovits*

Dimensionamento de secções de betão armado em flexão composta desviada com o MC90

*M. H. F. M. Barros, C. C. Ferreira e A. F. Barros*

Previsão das características de vibração e amortecimento de um laminado compósito

*J. P. A. Reina, J. F. Dias Rodrigues e A. T. Marques*

Caracterização de danos de maquinaria em placas compósitas

*L. M. P. Durão, J. M. R. S. Tavares, A. G. Magalhães, A. T. Marques e M. Freitas*

Comportamento de materiais compósitos solicitados a elevadas velocidades de deformação

*R. M. Guedes, M. A. Vaz, P. Magalhães e F. Ferreira*

Um modelo híbrido para análise da fiabilidade dos compósitos estruturais

*C. C. António*

# **Métodos Computacionais em Engenharia**

**Incorporando  
VIII Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional  
(APMTAC)  
VI Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería  
(SEMNI)**

**Lisboa  
2004**



# **Congresso de Métodos Computacionais em Engenharia**

Incorporando

VIII Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional  
(APMTAC)

VI Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería  
(SEMNI)

Lisboa, 2004

**Editores:**

**Carlos A. Mota Soares**

**António L. Batista**

**Gabriel Bugeda**

**Manuel Casteleiro**

**José Maria Goicolea**

**João A. C. Martins**

**Carlos A. B. Pina**

**Hélder C. Rodrigues**

**Publicado por:**

**APM|AC**

**Associação Portuguesa de Mecânica  
Teórica, Aplicada e Computacional**

**SEMNI**

**Sociedad Española de Métodos  
Numéricos en Ingeniería**

**Laboratório Nacional de Engenharia Civil**

**Métodos Computacionais em Engenharia**

Editores: Carlos A. Mota Soares, António L. Batista, Gabriel Bugeda, Manuel Casteleiro,  
José Maria Goicolea, João A. C. Martins, Carlos A. B. Pina, Hélder C. Rodrigues

Copyright © Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Divisão de Edições e Artes Gráficas  
Av. Brasil, 101 – 1700-066 Lisboa

Edição 2004

Tiragem: 500 exemplares

Palavras-chave: Engenharia / Método de computação / Congresso / ES / PT  
Keywords: Engineering / Computational methods / Congress / ES / PT

CDU 62:519.6(063)(460)+(469)  
ISBN 972-49-2008-9

Depósito Legal: 211340/04

Concepção gráfica: Helder David

## PREFÁCIO

Este livro contém os resumos e os artigos científicos (incluídos no CD anexo) apresentados no Congresso de Métodos Computacionais em Engenharia, que decorreu no LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Lisboa, de 31 de Maio a 2 de Junho de 2004. O congresso é uma organização conjunta da APMTAC - Associação Portuguesa de Mecânica Teórica, Aplicada e Computacional e da SEMNI – Sociedad Española de Métodos Numéricos en Ingeniería e integra num único evento o VI Congresso de Métodos Numéricos en Ingeniería (SEMNI) e o VIII Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional (APMTAC).

A incorporação destes dois Congressos num único resulta da excelente colaboração existente entre a APTMAC e a SEMNI em organizações anteriores, nomeadamente no Congresso de Métodos Numéricos en Ingeniería que se realizou em Madrid entre 3 e 6 de Junho de 2002. Pretende-se com esta organização conjunta dar um contributo fundamental para o aprofundamento da colaboração científica não só entre as duas associações, mas principalmente entre os investigadores portugueses e espanhóis nesta área da ciência aplicada.

O conteúdo do livro é muito vasto e reflecte a importante actividade que tem sido desenvolvida em Portugal e Espanha não só nos aspectos mais teóricos dos métodos numéricos e computacionais, mas também nas suas aplicações em diversas áreas tais como análise e optimização de estruturas, mecânica dos fluidos, geomecânica, visualização gráfica, análise de materiais compósitos e electromagnetismo, entre outras. Deve destacar-se ainda o número significativo de trabalhos em áreas emergentes tais como as da bioengenharia, engenharia acústica, química-física computacional e modelação ambiental. É de salientar ainda a importante participação e contribuição de vários investigadores Ibero - Americanos.

Os organizadores agradecem aos coordenadores das sessões temáticas e aos autores dos artigos científicos apresentados no Congresso a contribuição fundamental que deram para o seu êxito, quer através da apresentação dos trabalhos de investigação quer pela sua participação nas diferentes discussões científicas.

Lisboa, 31 de Maio de 2004

Carlos A. Mota Soares  
*Universidade Técnica de Lisboa*  
António L. Batista  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Gabriel Bugeda  
*Universidad Politécnica de Catalunya*  
Manuel Casteleiro  
*Universidad de A Coruña*

José Maria Goicolea  
*Universidad Politécnica de Madrid*  
João A. C. Martins  
*Universidade Técnica de Lisboa*  
Carlos A. B. Pina  
*Laboratório Nacional de Engenharia Civil*  
Hélder C. Rodrigues  
*Universidade Técnica de Lisboa*

## PREFACIO

Este libro contiene los resúmenes y los artículos científicos (incluidos en el CD anejo) presentados en el Congreso de Métodos Computacionales en Ingeniería, que se celebró en el LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil en Lisboa del 31 de Mayo al 2 de Junio de 2004. Este congreso ha sido fruto de la organización conjunta por parte de APMTAC – Associação Portuguesa de Mecânica Teórica, Aplicada e Computacional y de SEMNI – Sociedad Española de Métodos Numéricos en Ingeniería e integra en un único evento el VI Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería (SEMNI) y el VIII Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional (APMTAC).

La incorporación de estos dos congresos en uno único es fruto de la excelente colaboración existente entre APMTAC y SEMNI en ocasiones anteriores, en concreto en el Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería que se celebró en Madrid del 3 al 6 de Junio de 2002. Se pretende con esta organización conjunta realizar una contribución fundamental para profundizar la colaboración científica no sólo entre las dos asociaciones, sino principalmente entre los investigadores portugueses y españoles en este área de la ciencia aplicada.

El contenido del libro es muy amplio y refleja la importante actividad que ha sido desarrollada en Portugal y España no sólo en los aspectos más teóricos de los métodos numéricos y computacionales, sino también en sus aplicaciones en áreas diversas como: análisis y optimización de estructuras, mecánica de fluidos, mecánica de suelos, visualización gráfica, análisis de materiales compuestos y electromagnetismo, entre otras. Debe destacarse también el número significativo de trabajos en áreas emergentes como las de bioingeniería, ingeniería acústica, químico-física computacional y modelización medioambiental. Por otra parte cabe resaltar la importante participación de varios investigadores iberoamericanos.

Los organizadores desean agradecer a los coordinadores de las sesiones temáticas y a los autores de los artículos científicos presentados al congreso la contribución fundamental prestada para su éxito, tanto a través de la presentación de los trabajos de investigación como por su participación en las distintas discusiones científicas.

Lisboa, 31 de Mayo de 2004

Carlos A. Mota Soares  
*Universidade Técnica de Lisboa*  
António L. Batista  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Gabriel Bugeda  
*Universidade Politécnica de Catalunya*  
Manuel Casteleiro  
*Universidade de A Coruña*

José Maria Goicolea  
*Universidad Politécnica de Madrid*  
João A. C. Martins  
*Universidade Técnica de Lisboa*  
Carlos A. B. Pina  
*Laboratório Nacional de Engenharia Civil*  
Hélder C. Rodrigues  
*Universidade Técnica de Lisboa*

## **AGRADECIMENTOS / AGRADECIMIENTOS**

Os organizadores do congresso agradecem o apoio prestado pelos seguintes organismos / Los organizadores del congreso agradecen el apoyo prestado de los siguientes organismos:

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)

Instituto Superior Técnico (IST)

Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT)

Gabinete de Relações Internacionais da Ciência e do Ensino Superior (GRICES)

Fundação Luso-Americana


Fundação Calouste Gulbenkian



Sobre la convergencia del método iterativo de Schwarz para sistemas singulares <i>R. Bru, F. Pedroche e D. B. Szyld</i> .....	278
--	-----

## MATERIAIS COMPÓSITOS

O efeito do reforço de fibras no campo térmico de materiais compósitos <i>A. Andrade-Campos e F. Teixeira-Dias</i> .....	281
Avaliação numérica e experimental da influência da assimetria material em juntas de sobreposição simples de materiais compósitos <i>A. G. Magalhães e M. F. S. F. de Moura</i> .....	282
Estudo de placas compósitas através do desenvolvimento de polinómios de legendre e funções de base radial <i>A. J. M. Ferreira</i> .....	283
Identificação de parâmetros elásticos e piezoéctricos em estruturas activas do tipo placa: técnicas de optimização clássica versus redes neuronais artificiais <i>A. L. Araújo, H. Lopes, M. Vaz, C. M. M. Soares e J. Herskovits</i> .....	284
Um modelo híbrido para análise da fiabilidade dos compósitos estruturais <i>C. C. António</i> .....	285
Modelado numérico de no linealidad constitutiva en laminados compuestos - teoria de mezclas <i>F. Rastellini e S. Oller</i> .....	286
A influência das tensões residuais no comportamento mecânico global de materiais compósitos de matriz metálica <i>F. Teixeira-Dias, J. Pinho-da-Cruz, A. Andrade-Campos e L. F. Menezes</i> .....	287
Análisis y simulación computacional de una estructura de material compuesto <i>G. Atanacio e L. López</i> .....	288
Análise estrutural de cascas adaptativas <i>I. F. P. Correia, C. M. M. Soares, C. A. M. Soares e J. Herskovits</i> .....	289
Previsão das características de vibração e amortecimento de um laminado compósito <i>J. P. A. Reina, J. F. Dias Rodrigues e A. T. Marques</i> .....	290
Optimização de estruturas laminadas adaptativas com controlo activo <i>J. S. Moita, C. M. Soares e C. M. Soares</i> .....	291
Flexão de elementos curvos em materiais compósitos obtidos por autoclave <i>J. Travassos e A. Leite</i> .....	292
Modelos de identificação do dano com base nas características dinâmicas de estruturas <i>J. V. A. dos Santos, C. M. M. Soares, C. A. M. Soares e N. M. Maia</i> .....	293
Caracterização de danos de maquinaria em placas compósitas <i>L. M. P. Durão, J. M. R. S. Tavares, A. G. Magalhães, A. T. Marques e M. Freitas</i> .....	294
Identificação de propriedades mecânicas de materiais compósitos utilizando redes neuronais artificiais <i>L. Roseiro, U. Ramos e R. Leal</i> .....	295



**Métodos Computacionais  
em Engenharia**

**APMTAC**  
**SEMNI**

**Lisboa**

31 de Maio a 2 de Junho de 2004  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil



## COMISSÃO CIENTÍFICA

**Início**

**Prefácio**

**Objectivos**

**Comissão científica**

**Organização**

**Sessões Temáticas**

**Programa**

**Artigos**

**Apoios**

**J Infante Barbosa (ENIDH/UE)**

**Gabriel Bugeda (UPC)**

**Dinar Camotim (IST)**

**Maria G Carvalho (IST)**

**Manuel Casteleiro (UDC)**

**Miguel Cervera (UPC)**

**Raimundo Delgado (FEUP)**

**Manuel Doblaré (UNIZAR)**

**José Dominguez (US)**

**J Teixeira de Freitas (IST)**

**A Fortunato (LNEC)**

**José M Goicolea (UPM)**

**Antonio Huerta (UPC)**

**Rogério P Leal (FCTUC)**

**J Vieira de Lemos (LNEC)**

**Paulo B Lourenço (UM)**

**Francisco Michavila (UPM)**

**Fermin Navarriva (UDC)**

**E Arantes e Oliveira (IST)**

**P Pimentel Oliveira (UBI)**

**Xavier Oliver (UPC)**

**Eugenio Oñate (UPC)**

**José Carlos Pereira (IST)**

**M Seabra Pereira (IST)**

**José Luis Pérez (UGR)**

**Paulo G Piloto (IPB)**

**Artur Portela (UNL)**

**Paulo Vila Real (UA)**

**J César Sá (FEUP)**

**F Seabra Santos (FCTUC)**

**Luís Cruz Simões (FCTUC)**