

# PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE FLEXÃO EM PLACAS COMPÓSITAS

Hernâni Lopes<sup>1</sup>, Jaime Monteiro<sup>2</sup>, Rui Guedes<sup>3</sup> e Mário Vaz<sup>3</sup>

1 –ESTIG, Instituto Politécnico de Bragança

2- INEGI- Instituto de Engenharia Mecânica e de Gestão Industrial

3 – Departamento de Engenharia Mecânica e de Gestão Industrial, FEUP

## RESUMO

*Este trabalho tem como objectivo principal o estudo experimental/numérico da propagação de ondas de flexão em estruturas laminadas tipo placa. A medição do campo de deslocamentos é efectuada por holografia TV de duplo impulso. Para o efeito foi desenvolvida uma montagem experimental utilizando um LASER de Rubi e um sistema de controlo para, com elevada precisão, gerar e registar no tempo a evolução da força de impacto. Vários registos foram efectuados para diferentes instantes de tempo em duas placas laminadas compósitas.*

*Um programa de elementos finitos, Ansys ®, foi utilizado para, nas mesmas condições de carga e de tempo, simular numericamente a resposta das placas. Por fim, é apresentado o estudo comparativo dos resultados obtidos pelas diferentes técnicas.*

## 1. - INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento dinâmico de placas laminadas tem sido um tema amplamente abordado por diversos autores [1, 2, 3]. Estes estudos são motivados pela utilização massiva deste tipo de estruturas, com propriedades específicas superiores aos dos metais, e à necessidade de conhecer os mecanismos de ruína em serviço. As heterogeneidades e a anisotropia destes materiais tornam a sua análise complexa obrigando ao desenvolvimento de novas ferramentas numéricas e ao recurso a técnicas experimentais adequadas à caracterização do seu comportamento dinâmico. Nestes compósitos a distribuição mais ou menos aleatória de dois ou mais materiais com propriedades mecânicas distintas cria a necessidade de medir as propriedades mecânicas globais do compósito através. A elevada sensibilidade destas estruturas a defeitos internos, como os causados por impactos de baixa velocidade, torna necessário o desenvolvimento de métodos experimentais para a sua identificação e caracterização [4], e ao desenvolvimento de ferramentas numéricas para avaliação da integridade estrutural dos componentes defeituosos. Neste trabalho apresenta-se uma metodologia experimental para medição das ondas de flexão transientes em laminados

compósitos que permitirá identificar as propriedades mecânicas, recorrendo a métodos de cálculo inverso, e a identificação de defeitos internos que debilitem a estrutura.

## 2. - MONTAGEM EXPERIMENTAL

A holografia TV de iluminação contínua é uma das técnicas mais utilizadas para a medição estática ou quasi-estática de deslocamentos em superfícies. Esta técnica óptica de medição global sem contacto que permite efectuar medições com elevada resolução, da ordem de dezenas de nanómetros, em superfícies de geometria complexa. Por seu lado, a holografia TV pulsada é adequada para a medição de fenómenos dinâmicos. Neste caso é utilizado um LASER pulsado para efectuar dois ou mais registos, podendo o tempo entre disparos ser ajustado desde 1  $\mu$ s até alguns milissegundos. O disparo de cada impulso LASER tem curta duração, 60 ns, pelo que o movimento da superfície é capturado como que “congelado” no tempo. Na montagem experimental desenvolvida neste trabalho foi utilizado um LASER de Rubi de duplo impulso com tempo entre disparos ajustável de 1  $\mu$ s a 800  $\mu$ s. Um excitador electromagnético LDS101 foi utilizado para, através duma haste de

grande flexibilidade transversal, gerar uma força impacto, medida por um transdutor da PCB219B colocado na extremidade da haste. Dado que o sistema de medição só permite efectuar dois registos de cada vez e tratando-se de um fenómeno não destrutivo foram efectuadas diversas medições para intervalos de tempo diferentes. Foi construído um sistema de controlo adaptado ao LASER para garantir repetibilidade das medições. A força de impacto e o tempo entre registos forma ajustados de forma a enquadrar o deslocamento na gama de medições da montagem óptica. O primeiro registo, a referência, é efectuado antes do impacto, situação estática da placa, e o segundo registo após o impacto, placa submetida a um estado de deformação transitório. Na fig. 1 apresenta-se um esquema da montagem experimental utilizada neste trabalho.

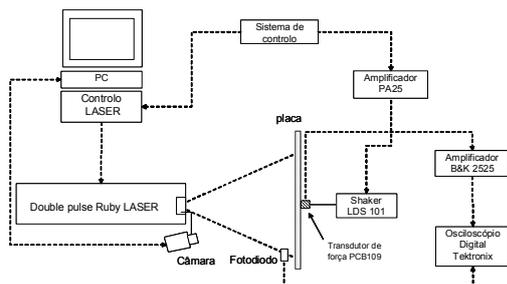


Figura 1 - Esquema da montagem experimental.

A evolução da força de impacto no tempo e o disparo do LASER são registados num osciloscópio digital. Esta informação é posteriormente utilizada no método dos elementos finitos para simular o comportamento da placa. Com esta montagem experimental foram efectuados diversos registos, com diferentes separações temporais, em duas placas compósitas diferentes, cujas propriedades estão apresentadas na tabela 1.

Nesta montagem um par de registos é gravado no CCD utilizando um ajuste conveniente da abertura do sistema óptico para gerar uma portadora espacial no padrão de *Speckle* [5]. Posteriormente esta portadora é removida, desmodulando-a através de uma transformada de Fourier. A

distribuição espacial da fase das franjas secundárias é obtida da diferença das fases dos dois registos.

Tabela 1- Propriedades das placas compósitas

	Placa A	Placa B
empilhamento	$[0^\circ/-45^\circ/+45^\circ/90^\circ]_{3s}$	$[90^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_s$
espessura [m]	0.0029	0.0015
largura [m]	0.300	0.270
altura [m]	0.300	0.194

### 3. - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A diferença de fase representa o deslocamento relativo da superfície. Na fig. 2, representa-se o mapa de fase da propagação da onda de flexão nas duas placas. O mapa de fase representa um conjunto de isolinhas que correspondem a pontos de igual deslocamento.

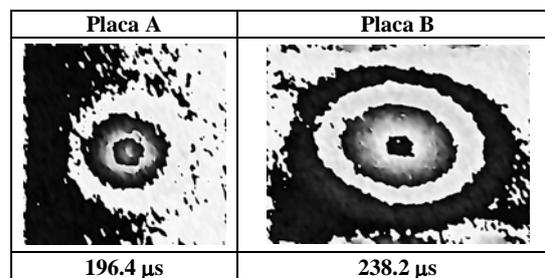


Figura 2- Mapa de fase da propagação das ondas de flexão.

Para uma determinada direcção a velocidade de propagação das ondas de flexão é directamente proporcional ao módulo de elasticidade do material. A partir do mapa fase pode obter-se o valor do módulo de elasticidade e a sua variação nas diferentes direcções da placa. No caso da placa A, franjas circulares, o comportamento assemelha-se ao duma placa isotrópica [7], enquanto que para a placa B, franjas elípticas, apresenta um comportamento claramente ortotrópico.

As técnicas de processamento de imagem designadas por *unwrapping* [6], são aqui utilizadas para eliminar as descontinuidades no mapa de fase para obter uma distribuição de contínua de fase. A partir deste, e conhecido o comprimento de onda da luz LASER, é determinado o campo de deslocamento da superfície. Na fig. 3 representam-se os campos de deslocamento

correspondentes aos mapas de fase da figura 2.

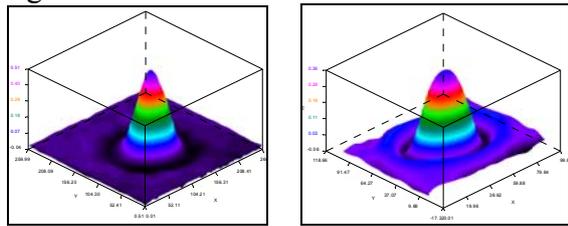


Figura 3- Representação dos campos de deslocamento da fig. 2.

#### 4. – SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A análise pelo método dos elementos finito foi realizada no programa comercial Ansys®. A simulação teve por base a informação registada no osciloscópio digital durante cada ensaio, força de impacto e o tempo após o impacto ter iniciado. As duas placas foram discretizadas em modelos de elementos finitos tipo Solid 191 Layered. Na figura 4 representa-se os resultados obtidos para os dois modelos de placa em estudo.

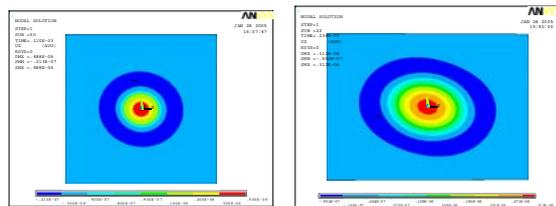


Figura 4- Campo de deslocamentos obtido por elementos finitos.

A análise comparativa entre resultados experimentais e numéricos permite validar o modelo de elementos finitos criado. A partir deste modelo numérico poder-se-á simular o efeito da propagação da onda de flexão devido à presença de defeitos internos.

#### 5. – CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados verifica-se que a montagem experimental serve os objectos do trabalho proposto. Este estudo servirá de base ao desenvolvimento no futuro de novas ferramentas para a identificação das propriedades dos materiais e à detecção de

defeitos em laminados compostos através de técnicas não destrutivas.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia –FCT o apoio financeiro no âmbito do projecto POCI/EME/63236/2004.

#### REERÊNCIAS

- [1] K. E. Fällström, H. Gustavsson, N. E. Molin and A. Wåhlin; Transient Bending Waves in Plates Study by Hologram Interferometry; *Experimental Mechanics*, 29 (4), 378-389, 1989
- [2] K. E. Fällström, H. Gustavsson, N. E. Molin and A. Wåhlin; Transient Bending Waves in Anisotropic Plates Study by Hologram Interferometry; *Experimental Mechanics*, 29 (4), 409-413, 1989
- [3] Fällström, K-E, Lindgren, L-E.; Molin, N-E; Wåhlin, A.; Transient bending waves in anisotropic plates studied by hologram interferometry, *J. Exp. Mech* 29(4), 409-413, 1989.
- [4] Fernando Santos, Mário Vaz, Jaime Monteiro, “A new set-up for pulsed digital shearography applied to defect detection in composite structures”; *Optics and Lasers in Engineering*; Vol 42; Issue 2; pp 131-140; August 2004.
- [5] G. Pedrini, B. Pffister and Tiziani; Double pulse-electronic speckle interferometry; *Journal of Modern Optics*, 1993, Vol. 40 nº 1, 89-96.
- [6] Dennis C. Ghiglia, Mark D. Pritt ‘Two-Dimensional Phase Unwrapping – Theory, and Software’, John Wiley & Sons, Inc. 1998
- [7] H.M. Lopes , R.M. Guedes, M.A. Vaz, J.D. Rodrigues “Study of transient wave propagation in plates using double pulse TV holography”, *Proceedings: International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences*”; Madeira, 26-29 de Julho de 2004.