

## DETECÇÃO DE DEFEITOS EM PLACAS COMPÓSITAS SUBMETIDAS A IMPACTO A BAIXA VELOCIDADE

E. Rocha<sup>1</sup>, A. M. Amaro<sup>1</sup>, J.M. Monteiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEMUC – Mechanical Engineering Department, University of Coimbra

<sup>2</sup>LOME - INEGI, Mechanical Engineering Department, University of Porto



### RESUMO

*Este trabalho tem como objectivo principal a utilização da técnica de análise não destrutiva, designada por ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry), na inspecção da integridade em placas de materiais compósitos de matriz epóxida reforçado com fibra de carbono, submetidos a solicitações de impacto de baixa velocidade e energia. Placas retangulares e quadradas com diferentes condições de fronteira foram submetidas a cargas de impacto. A influência das condições de apoio e das dimensões das placas no tamanho dos defeitos gerados foi estudada. As placas encastradas e as quadradas, mais rígidas, apresentam um maior valor de dano.*

**Palavras-chave** – Compósitos Carbono/Epóxido, Dano, Interferometria, Impacto a Baixa Velocidade

### 1 - INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas os materiais compósitos têm vindo a revelar-se como um dos grupos de materiais tecnológicos mais interessantes. O desenvolvimento tecnológico depende, em grande parte, dos avanços na área de materiais. A evolução da Engenharia deve-se sobretudo ao aparecimento de novos materiais. A ideia de materiais compósitos não é recente; desde a antiguidade que o homem utilizavam materiais compósitos. A natureza apresenta inúmeros casos onde uma estrutura de compósito está presente. A madeira, por exemplo, é um compósito fibroso constituído de uma matriz de lignina e pectina reforçados com fibras de celulose e é utilizada desde antiguidade. Além dos compósitos naturais, o homem

desde longa data que utiliza intuitivamente o conceito de materiais compósitos ao combinar, por exemplo, palha e barro. O avanço dos materiais tradicionais e o surgimento de novos materiais, como os polímeros, ampliaram significativamente as possibilidades de utilização dos materiais compósitos. Surgiram os compósitos com matriz polimérica reforçada com fibras de vidro e de carbono.

Actualmente os materiais compósitos possuem várias aplicações nos mais diversos campos de engenharia, nomeadamente nas indústrias aeroespacial e aeronáutica, bem como em artigos de desporto, próteses e equipamentos para exames de Raios X (Helms, J. *et al*, 2001). O uso crescente deste tipo de materiais, tornam a investigação do seu comporta-

mento alvo de análise detalhada, fazendo com que os métodos de análise e dimensionamento sejam adaptados, ou mesmo desenvolvidos, permitindo a aplicação dos materiais compósitos de forma otimizada e segura. Os materiais compósitos de matriz polimérica surgiram na sua vertente estrutural, em meados do século XX. O desafio permanente que estes materiais colocam à imaginação, levou a esforços que se traduziram em aplicações cada vez mais exigentes. As aplicações feitas usando materiais compósitos de matriz polimérica continuaram a aumentar, devido às elevadas resistência e rigidez específicas que apresentam. A capacidade de amortecimento interno e o baixo coeficiente de expansão térmica são características que podem ser adaptadas para aplicações específicas (Amaro, A. M., 2003). Os compósitos avançados reduzem os problemas de fadiga e dão uma maior flexibilidade de concepção e fabrico o que pode reduzir significativamente o número de peças necessárias.

Outra das vantagens das matérias compósitas são a resistência as temperaturas extremas, corrosão e desgaste, especialmente em aplicações industriais. Os avanços tecnológicos dos últimos anos permitiram diminuir os custos das matérias-primas e de processamento. Prevê-se que estes materiais, para além de continuarem a ter uma aplicação privilegiada em mercados avançados (militar, espacial e aeronáutico), substituam, de forma crescente, os materiais tradicionais em aplicações mais vulgares de engenharia (como a construção civil – pontes, reforço e reabilitação de estruturas e os transportes – automóvel integralmente em material compósito). Os compósitos laminados apresentam regiões críticas em relação ao seu comportamento, que são as zonas de transição entre materiais com propriedades diferentes e/ou as zonas de ligação entre as lâminas sobrepostas com diferentes orientações de fibras. Estes materiais apresentam também um fraco comportamento quando solicitados por impacto. Impactos por vezes acidentais e de baixa energia, podem produzir danos, nem sempre visíveis, que modificam substan-

cialmente o comportamento dos elementos estruturais com eles fabricados. Por este motivo, tornam-se fundamentais os estudos que permitam analisar e prever o comportamento desses materiais em condições de serviço, como forma de eliminar, ou pelo menos controlar os efeitos do seu possível colapso. Neste trabalho foram analisadas várias placas de carbono/epóxico submetidas a impactos a baixa velocidade, nas mesmas condições de ensaio, mas apoiadas de forma diferente. O que se pretendeu estudar foi a influência das condições de apoio e da dimensão das placas, directamente associadas à rigidez das mesmas, nas dimensões dos defeitos originados.

## 2 - ANÁLISE EXPERIMENTAL

As placas analisadas são laminados de carbono/epóxico com orientação de fibras de  $[0_4, 90_4]_s$  e espessura de 2.4 mm. As placas rectangulares apresentam uma área útil de 100x75 [mm], sendo submetidas a impacto na condição de simplesmente apoiadas (RSA) ou encastradas (RE). As mesmas condições de apoio foram utilizadas nos ensaios das placas quadradas, com uma área útil de 75x75 [mm], designadas por QSA e QE, simplesmente apoiadas e encastradas, respectivamente. Todas as placas foram submetidas a impactos de baixa velocidade ( $1,72 \text{ ms}^{-1}$ ) e energia (3 J).

### 2.1 - Processamento das placas

As placas analisadas foram processadas por autoclave no INEGI, a partir de pré-impregnados com a designação comercial TEXIPREG<sup>®</sup> HS 160 REM. A placa laminada é obtida por empilhamentos sucessivos de lâminas de pré-impregnado com a espessura e a orientação pretendidas. Após o empilhamento coloca-se o laminado numa prensa de pratos quentes, à qual se aplica simultaneamente uma determinada pressão e temperatura para se verificar a compactação do laminado. Este método de processamento de placas designa-se por moldação por autoclave. A moldação por autoclave é uma

combinação da moldação em vácuo com a moldação em pressão, permitindo a obtenção de componentes de boa qualidade. O ciclo de cura, durou cerca de 2 horas, e no presente caso consistiu no aquecimento em autoclave das placas até à temperatura de 130 °C, com uma velocidade de aquecimento de 3 °C/min, sendo de seguida a temperatura do autoclave mantida constante durante 60 min. O arrefecimento foi efectuado à mesma velocidade de 3 °C/min até se atingir a temperatura de 30 °C. As placas foram cortadas, numa serra de disco diamantado, de forma a evitar o arrancamento das fibras, segundo as dimensões requeridas para os ensaios de impacto.

## 2.2- Impacto a baixa velocidade

Para a realização dos ensaios de impacto a baixa velocidade recorreu-se à máquina de ensaio de impacto instalado no laboratório de ensaio de materiais da ESTA-Instituto Politécnico de Tomar.

A máquina de impacto utilizada é uma máquina de queda livre de um peso IMATEK-IM10, figura 1, completamente instrumentada com um sistema de aquisição de dados recebidos de uma célula de carga piezoeléctrica, com uma capacidade de recolha de 32000 pontos, posicionada na raiz do impactor. Esta máquina é constituída por uma torre com duas colunas-guia, um carrinho que suporta o impactor e que corre nestas apoiada em rolamentos. O impactor pode ser elevado até à altura requerida, sendo posteriormente solto na direcção vertical, com reduzido atrito nas colunas / guia. Esta máquina está equipada com um dispositivo de prevenção de segundo impacto “safety road” e um “software” de análise de dados ImpAqt Versão 1.3. O impactor utilizado tem cabeça esférica, diâmetro de 20 mm e massa de 2.545 kg, figura 2.

De referir que num impacto parte da energia é absorvida pela amostra e resulta em deformação permanente e dano, enquanto a restante é convertida em energia de deformação elástica e vibração e depois dissipada sob a forma de calor. Assim, a resistência ao impacto de uma dada placa será

tanto maior quanto maior for a sua capacidade de dissipar energia, correspondendo a uma menor absorção de energia.



Fig 1 - Máquina de ensaio de impacto IMATEK-IM10.

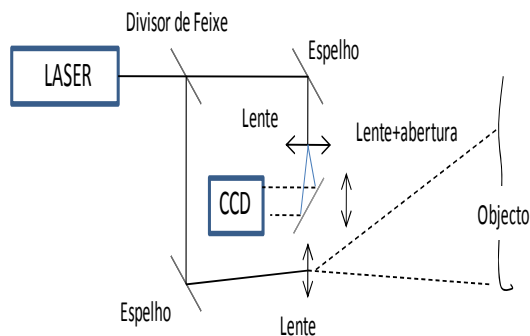


Fig 2 - Impactor de cabeça hemisférica.

## 2.3 - Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI)

Para análise dos defeitos foi utilizada a técnica ESPI. Esta técnica surgiu como desenvolvimento das técnicas de Interferometria Holográfica, e utiliza o vídeo no registo dos hologramas. Para que o registo dos padrões de interferência pudesse ser feito por uma câmara de vídeo foi necessário introduzir algumas alterações na montagem holográfica original. As emulsões fotográficas inicialmente utilizadas permitiam registar até 3000 linhas/mm, enquanto os sensores de CCD não vão além das 50 linhas/mm. O alinhamento de ambos os braços do interferómetro e a utilização de um sistema óptico de imagem permitiram obter padrões

de interferência compatíveis com a resolução dos sensores vídeo. Desta forma é possível registar 25 hologramas/s sem revelação química e sem necessidade de reposicionamento do holograma (Monteiro, J.M., 1998). Dependendo da configuração óptica do sistema de ESPI este pode ser sensível a deslocamentos fora do plano, isto é, deslocamentos paralelos à direcção de observação, ou no plano, deslocamentos perpendiculares à direcção de observação. Para que um sistema seja sensível a deslocamentos no plano, o objecto deve ser iluminado por dois feixes, ou observado segundo duas direcções enquanto para a medição dos deslocamentos fora do plano uma direcção de iluminação e outra de observação são suficientes. Neste último caso a bissetriz do ângulo formado por estas duas direcções define a direcção do vector sensibilidade. Um sistema de ESPI convencional, para a medição de deslocamentos fora do plano, é basicamente um interferómetro de Michelson com registo de interferência em vídeo (Huang, S.-J. et al, 2007), como se pode observar na figura 3.



**Fig 3** - Representação esquemática de um sistema ESPI convencional.

Para a realização deste trabalho utilizou-se um outro tipo de sistema ESPI, não convencional, com o uso de fibra óptica para a condução do feixe, montado no laboratório do LOME-INEG. (figura 4)

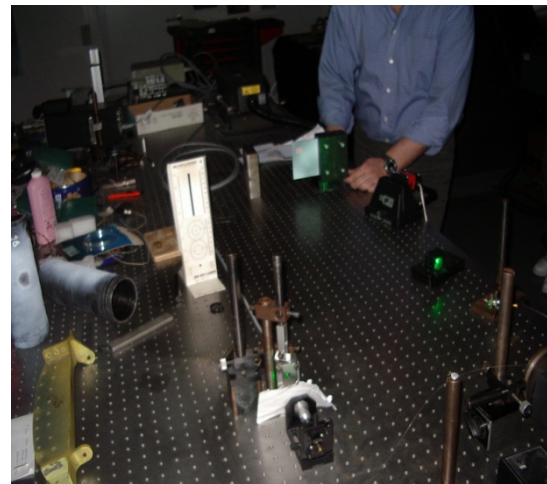
Este sistema em fibra óptica tem algumas vantagens e desvantagens em relação ao sistema convencional.

#### Vantagens:

- Menor número de componentes uma vez que os fios da fibra óptica substituem os espelhos utilizados no sistema convencional;
- Menor perda dos feixes;
- Menor sensibilidade aos riscos externos (poeiras, variações de temperatura,...);
- Baixa perda de transmissão e grande banda passante;
- Pequeno tamanho e peso;
- Imunidade a interferências.

#### Desvantagens:

- Fragilidade da fibra. O manuseio de uma fibra óptica sem encapsulamento é bem mais delicado que no caso dos suportes metálicos. É preciso ter muito cuidado com as fibras ópticas, pois quebram com facilidade.
- Dificuldades de conexões, as pequenas dimensões das fibras ópticas exigem procedimentos e dispositivos de alta precisão na realização das conexões e junções.



**Fig 4** - ESPI em fibra óptica, montado no laboratório do LOME-INEG.

Para realizar os ensaios ESPI é necessário recorrer a métodos de estimulação, sendo que estes permitem evidenciar os defeitos existentes na estrutura, através das alterações introduzidas no campo de deslocamentos. Neste trabalho, tendo em consideração os



materiais ensaiados e o tipo de defeitos em estudo, recorreu-se à estimulação térmica que consiste em aquecer o corpo com uma fonte de calor, induzindo-lhe uma variação de temperatura (figura 5). Se existir uma descontinuidade no objecto que altere a condutividade térmica do material é produzida uma deformação não uniforme da superfície, permitindo a detecção do defeito.

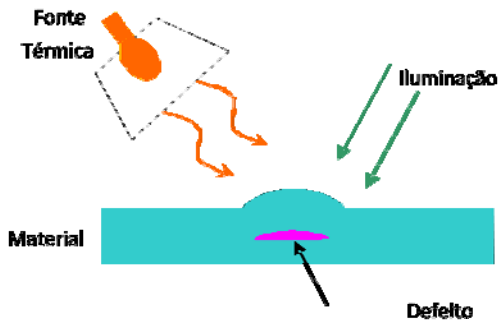


Fig 5.- Estimulação térmica.

### 2.3.1 - Princípios teóricos das técnicas de interferometria

A intensidade da luz detectada por uma câmara CCD antes de deformação pode ser expressa por:

$$I_1 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos \phi \quad (1),$$

sendo  $I_o$  a intensidade da luz do objecto,  $I_r$  a intensidade da luz de referência e  $\phi$  a diferença de fase entre a luz objecto e referência. Após a deformação do objecto a equação (1) é reescrita como:

$$I_2 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (2)$$

onde  $(\phi + \Delta\phi)$  é a mudança de fase relativa devido aos deslocamentos relativos. Quando estas duas imagens são subtraídas e corrigidas pelo sistema de processamento de imagem, a intensidade da imagem resultante pode ser expressa da seguinte forma:

$$I = |I_2 - I_1| = 2\sqrt{I_o I_r} [\cos(\phi + \Delta\phi) - \cos \phi] \quad (3)$$

Se  $\Delta\phi = 2\pi n$ ,  $n \in \mathbb{N}$ , então  $I_1$  e  $I_2$  têm a correlação máxima, pelo que franjas de modo escuro aparecem no monitor ( $I = 0$ ). Se,  $\Delta\phi = 2\pi n + \pi$ ,  $n \in \mathbb{N}$ ,  $I_1$  e  $I_2$  têm a corre-

lação mínima, logo no monitor são detectadas franjas de cor branca (Labbé, 2007).

### 3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nas figuras 6 (a, b e c) a 9 (a, b e c) são apresentados os resultados obtidos para as condições de fronteira e placas consideradas. Nestas figuras pode observar-se o campo de deslocamentos obtido, sendo as dimensões em x, y e z em [mm]. Os resultados apresentados referem-se sempre ao mesmo defeito, para cada uma das placas ensaiadas, sendo apresentados de diferentes formas gráficas, devido ao sistema de tratamento de dados utilizado (Martínez *et al*, 2007). Desta forma, os autores pretendem identificar claramente a presença dos defeitos.

Na tabela 1 estão indicados os valores aproximados para a área delaminada. Não se podendo considerar valores totalmente fiáveis no que concerne à dimensão dos defeitos, servem de comparação, visto todos terem sido obtidos da mesma forma.

Estes valores foram obtidos através das figuras 6 (b) a 9 (b). A profundidade a que os defeitos se encontram não pode ser detectada por recurso a esta técnica de análise não destrutiva.

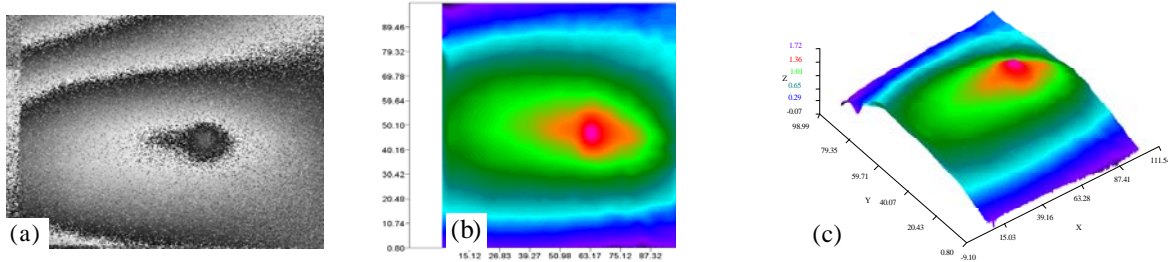
Tabela 1- Áreas delaminadas [mm<sup>2</sup>]

Tipo de apoio/placa	Área delaminada
RSA	233
RE	349
QSA	432
QE	590

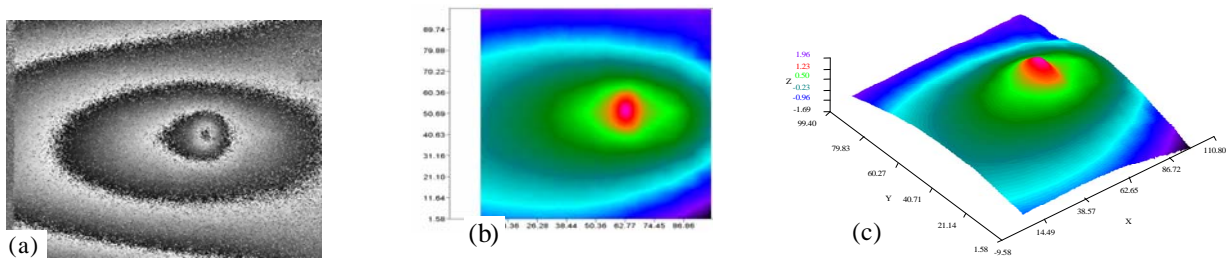
Conforme se pode ver nas figuras 6 (a) a 9 (a) a presença dos defeitos é detectada através da descontinuidade observada nas franjas de interferência. Uma maior densidade de franjas indicia maiores deslocamentos. De acordo com as figuras 6 e 7, e 8 e 9, respectivamente, pode-se observar que a placa encastrada apresenta um defeito de maiores dimensões, de acordo com o apresentado na tabela 1. Este facto pode ser explicado pela maior rigidez da

montagem. A placa encastrada tem um comportamento mais rígido do que a simplesmente apoiada, o que implica um menor coeficiente de amortecimento, logo menor dissipação de energia, que se traduz no aparecimento de um defeito de maiores dimensões. Ao contrário, a montagem em que a placa é simplesmente apoiada é menos rígida, pelo que seria de esperar, para as mesmas propriedades mecânicas e

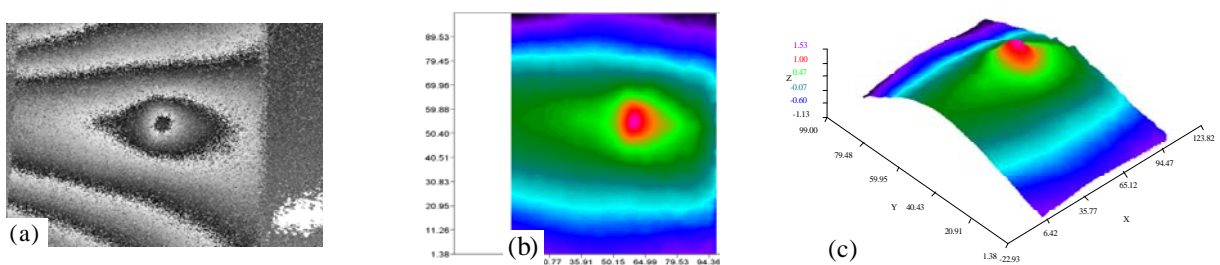
geométricas, e nas mesmas condições de impacto, um menor valor de área de dano, por ocorrer uma maior dissipação de energia. Comparando as figuras 6 e 8 e as figuras 7 e 9, respectivamente, também se observa que as placas quadradas, mais rígidas, apresentam um maior valor de dano, relativamente às retangulares, o que é confirmado pelos valores da tabela 1.



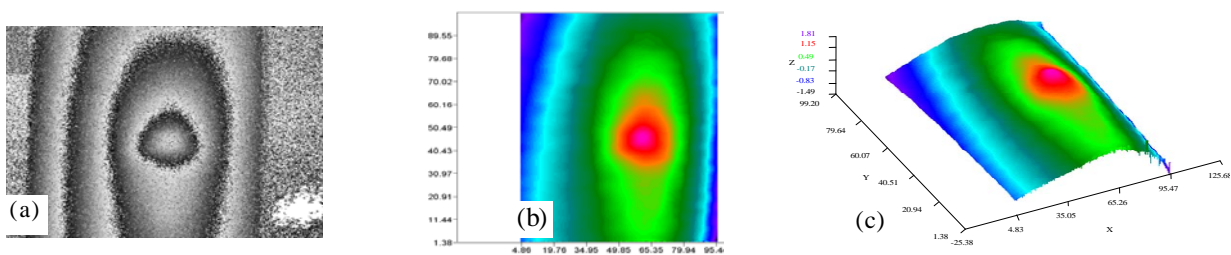
**Fig 6** - Detecção de um defeito numa placa laminada ensaiada em RSA: (a) Mapa de fase; (b) Representação em falsa cor; (c) Tridimensional.



**Fig 7** - Detecção de um defeito numa placa laminada ensaiada em RE: (a) Mapa de fase; (b) Representação em falsa cor; (c) Tridimensional.



**Fig 8** - Detecção de um defeito numa placa laminada ensaiada em QSA: (a) Mapa de fase; (b) Representação em falsa cor; (c) Tridimensional.



**Fig 9** - Detecção de um defeito numa placa laminada ensaiada em QE: (a) Mapa de fase; (b) Representação em falsa cor; (c) Tridimensional.

#### 4. CONCLUSÕES

A técnica ESPI revelou-se eficaz na detecção de defeitos, mesmo que de pequenas dimensões, neste tipo de placas. O *software* de tratamento de resultados permite a obtenção de imagens que conferem ao utilizador uma melhor caracterização e detecção da presença de eventuais defeitos. Confirmou-se que as placas mais rígidas, encastradas e quadradas, apresentam defeitos de maiores dimensões. Este facto deve-se à capacidade que o material tem em dissipar ou absorver a energia de impacto a que foi sujeito.

#### REFERÊNCIAS

- Amaro, A. M. *Estudo do comportamento Mecânico de Materiais compósitos: Utilização conjugada do Método de elementos Finitos e de Técnicas de Interferometria Holográfica e Ultrasonoras*. Tese de Doutoramento, FCTUC, 2003
- Helms, J.; Li, G.; Peng, S.-S. *Impact response of a composite laminate bonded to a metal substrate*. Journal of Composite Materials, vol.35, No. 3, (2001) pp. 237-252
- Huang, S.-J.; Lin, H.-L.; Liu, H.-W. *Electronic speckle pattern Interferometry applied to the displacement measurement of sandwich plates with two fully potted inserts*. Composite Structures, 79, (2007) pp. 157-162.
- Labbé, F. *Strain-rate measurements by electronic speckle-pattern Interferometry*. Optics and Lasers Engineering, 45, (2007), pp. 827-833.
- Martínez, A.; Rayas, J. A. *Evaluation of error in the measurement of displacement vector components by using electronic speckle pattern Interferometry*. Optics communications, 271 (2007), pp. 445-450.
- Monteiro, J.M. *Desenvolvimento de um sistema de interferometria Homográfica (ESPI) para análise de estruturas sob solicitações estáticas e dinâmicas*. Tese de Mestrado, FEUP, 1998