



## UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE INTERFEROMETRIA HOLOGRÁFICA NA DETECÇÃO DE DEFEITOS EM COMPÓSITOS LAMINADOS

ANA M. AMARO<sup>1</sup>, JOSÉ S. CIRNE<sup>1</sup>, NUNO F. RILO<sup>1</sup>, MÁRIO VAZ<sup>2</sup>, J. MONTEIRO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CEMUC – Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, FCTUC, Portugal

<sup>2</sup> LOME – Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental, FEUP, Portugal

(Recibido 5 de abril de 2004, revisado 9 de noviembre de 2004, para publicación 25 de febrero de 2005)

**Resumo** – No presente trabalho utilizam-se as técnicas de interferometria holográfica para a detecção de defeitos em placas laminadas de carbono/epóxido. Foram analisadas placas com 16 camadas e duas orientações de fibras, sendo uma simétrica, [0,90,0,90]<sub>2s</sub> e outra antissimétrica [0,90]<sub>8</sub>. Impactos de baixa velocidade e energia foram utilizados para gerar defeitos no interior das placas. A presença dos defeitos é revelada por alterações no campo de deslocamentos à superfície. Esta informação foi obtida por ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) e por Shearography. Para a análise dos resultados recorreu-se a algoritmos de processamento de imagem. Verificou-se que as placas com empilhamento antissimétrico oferecem uma maior resistência ao impacto do que as placas com empilhamento simétrico.

**Palavras chave** – Compósitos, dano, interferometria holográfica.

### 1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos com matriz polimérica, reforçados com fibras de carbono, aumentou significativamente no final do século passado. Iniciando-se nas indústrias aeronáutica e espacial a sua utilização tem vindo a ser progressivamente alargada a outras aplicações correntes onde estes materiais apresentam fortes vantagens competitivas. O bom desempenho mecânico destes materiais, aliado a um baixo peso e bom comportamento em ambientes agressivos justificam este crescimento. Apresentam, no entanto, reduzida resistência a impactos de baixa velocidade, o que justifica o estudo do seu comportamento quando submetidos a estas solicitações.

Após o impacto, os compósitos podem desenvolver defeitos no seu interior que reduzem a sua resistência mecânica e podem mesmo inibir a sua utilização. Desta forma é de primordial importância dispor de técnicas de análise não destrutiva que permitam a detecção dessas descontinuidades. No presente trabalho são utilizadas placas laminadas de carbono/epóxido com 16 camadas e diferentes orientações de fibras, simétricas [0,90,0,90]<sub>2s</sub>, e antissimétricas [0,90]<sub>8</sub>, para estudar o comportamento destes materiais. Estas placas foram submetidas a impactos com velocidades inferiores a 1,3 ms<sup>-1</sup>, associados a energias variando entre os 1,5 J e os 3 J, e posteriormente ensaiadas com técnicas holográficas para detectar a presença de defeitos.

Foram utilizadas duas técnicas de interferometria holográfica, ESPI e *Shearography*. Em ambas as técnicas a presença dos defeitos internos é revelada por alterações provocadas no comportamento da superfície do objecto. Para isso é registada uma situação inicial, utilizada como referência em situações posteriores obtidas para diferentes situações de carga. Desta forma é possível analisar qualquer tipo de superfície difusa sem contacto e sem preparação prévia da mesma. Os resultados são obtidos sob a forma de padrões de franjas, que correspondem ao lugar geométrico dos pontos com igual deslocamento ou gradiente de deslocamento, respectivamente. As descontinuidades no padrão de franjas correspondem geralmente a deslocamentos localizados resultantes de descontinuidades no material.

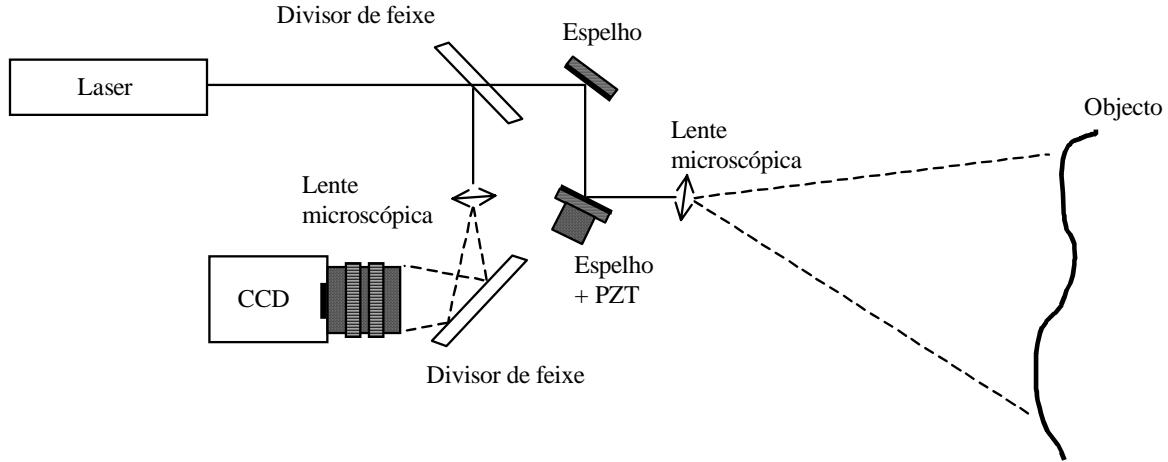


Fig. 1. Esquema do sistema de ESPI utilizado.

## 2. AS TÉCNICAS DE INTERFEROMETRIA HOLOGRÁFICA

Os sistemas de interferometria utilizados no presente trabalho baseiam-se no interferómetro de Michelson [1], onde duas frentes de onda coerentes são combinadas para obter registos holográficos com gravação simultânea de amplitude e fase. Neste aspecto as técnicas utilizadas, ESPI e *Shearography*, diferem apenas no facto de na primeira uma das frentes de onda ser especular, isto é, tem fase constante, enquanto na segunda ambas correspondem a padrões de speckle, fase aleatória. Combinando dois destes registos, obtidos com o objecto em diferentes situações de carga, obtém-se padrões de interferência que se encontram relacionados com o comportamento dos objectos.

Nos sistemas de *Shearography*, o princípio para a obtenção de franjas de interferência é apenas a existência de correlação entre o padrão de franjas, granulado laser, antes e após a deformação. Este sistema não requer a realização de diferenciação numérica, visto que permite a diferenciação óptica [2]. Lee *et al* [3] realizaram estudos em materiais compósitos com duas técnicas de *Shearography*, tendo concluído que as mesmas são adequadas para a detecção de defeitos e análise mecânica destes.

As técnicas de ESPI surgiram a partir do desenvolvimento das técnicas de interferometria holográfica, substituindo as emulsões fotográficas por uma câmara de vídeo. Dependendo da configuração óptica do sistema de ESPI este pode ser sensível a deslocamentos fora do plano ou a deslocamentos no plano. Para que um sistema seja sensível a deslocamentos fora do plano, o objecto é iluminado por um feixe de luz e a referência obtida através de um feixe especular proveniente da mesma fonte, como se pode ver na Fig. 1. O alinhamento conveniente do feixe proveniente do objecto e do feixe de referência tornam a gravação de registos holográficos compatível com a menor resolução dos sistemas vídeo (50 linhas/mm em vez de 3000 linhas/mm das placas holográficas). A montagem utilizada para medir deslocamentos no plano utiliza dupla iluminação e não foi utilizada neste trabalho.

O sistema de ESPI utilizado consiste num interferómetro onde um feixe de luz coerente é dividido para gerar os dois braços do interferómetro, feixe referência e feixe objecto. Um dos feixes é filtrado e utilizado como feixe de referência, enquanto o outro ilumina o objecto em análise. A luz difundida pela superfície do objecto é captada pelas lentes do sistema óptico e combinada com o feixe de referência. O padrão de granulado resultante da interferência dos dois feixes é captado por uma câmara CCD e armazenado num sistema de processamento de imagem. Este padrão contém a informação que codifica a superfície do objecto em análise. Após solicitação do objecto é gravado um segundo padrão de granulado que apresenta modificações correspondentes às eventuais alterações da superfície. Correlacionando os dois padrões de granulado é possível obter a distribuição espacial dos deslocamentos com uma resolução da ordem de metade do comprimento de onda da luz utilizada [4].

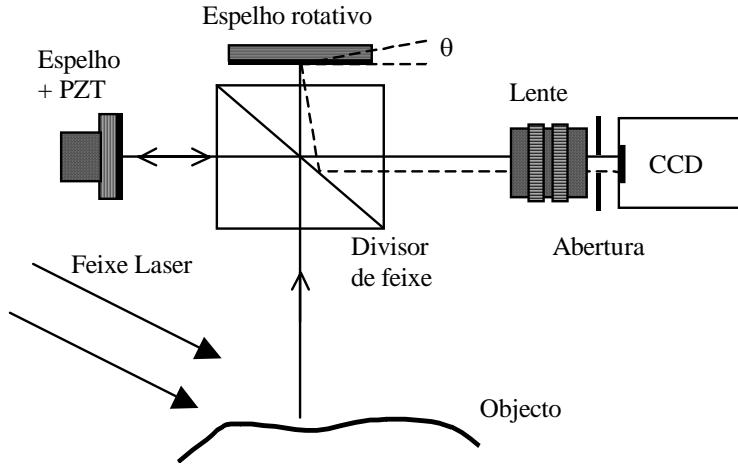


Fig. 2. Esquema do sistema de Shearography.

Outra configuração do interferómetro de Michelson pode também ser utilizado para detectar defeitos. Designada por *Shearography* [5], esta técnica permite a obtenção directa da derivada dos deslocamentos segundo a direcção normal ao plano [6, 7]. Esta informação assume maior interesse quando se pretende detectar deslocamentos localizados. A *Shearography* foi inicialmente desenvolvida como técnica de detecção de tensões residuais em metais, tendo posteriormente derivado para a detecção de defeitos. Habib [8] recorreu a esta técnica para a determinação de deslocamentos e tensões, em função do tempo e da temperatura, em diversos tipos de revestimentos, como por exemplo epoxy, material utilizado no presente trabalho como matriz.

O sistema de *Shearography* utilizado no presente trabalho está esquematizado na Fig. 2. No sistema de *Shearography*, tal como no sistema de ESPI utilizado, um único feixe ilumina o objecto. No entanto, na montagem de *Shearography* a imagem da superfície é dividida em amplitude em duas imagens de igual intensidade, sendo uma desviada (“*sheared*”) lateralmente da outra. Ambas as imagens são focadas no sensor de imagem, funcionando cada uma delas como referência para a outra.

As imagens atingem o alvo percorrendo dois caminhos diferentes após o divisor de feixe: um incide no espelho com o PZT e outro é encaminhado pelo espelho que, para gerar o shear em duas direcções, pode rodar em dois eixos no seu plano. Assim, duas imagens do objecto espacialmente deslocadas são obtidas e encaminhadas até ao detector de CCD.

A técnica de *Shearography* é vocacionada para a detecção de gradientes de deslocamentos [8,9] pois é praticamente insensível a deslocamentos de corpo rígido ou deformações globais, que afectam de igual modo ambos os braços do interferómetro. Os padrões de interferência obtidos desta forma permitem detectar mais facilmente a presença de defeitos que provoquem alterações localizadas no campo de deslocamentos. O facto de utilizar um interferómetro em que o trajecto dos feixes é comum na maior parte do seu caminho diminui também a sua sensibilidade a perturbações exteriores [10, 11]. Deve referir-se que os campos de deslocamento obtidos por ESPI podem ser diferenciados numericamente por métodos de processamento de imagem conduzindo a mapas de gradientes semelhantes aos obtidos directamente por *Shearography*. Este processo é mais trabalhoso e sensível a ruído [12].

Ambas as montagens permitem a utilização de um modulador de fase num dos braços do interferómetro. Este dispositivo consiste num espelho montado num transdutor piezoelectrónico (PZT) e permite registrar um conjunto de imagens em que ao mesmo padrão de franjas é adicionado uma fase constante e conhecida. Este conjunto de imagens permite calcular os mapas de fase dos interferogramas utilizando algoritmos de processamento de imagem. Os mapas obtidos aumentam a resolução da medida de aproximadamente uma ordem de grandeza.



Fig. 3. Máquina de impacto utilizada (Universidade Carlos III).

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para este trabalho foram elaboradas placas de carbono/epóxido com duas sequências de empilhamento:  $[0,90,0,90]_{2s}$  e  $[0,90]_8$ . Estas placas foram submetidas a impactos de baixa velocidade, com diferentes energias. A máquina utilizada nos ensaios é uma máquina universal de impacto por gravidade, da marca CEAEST, modelo FRACTOVIS, conforme se ilustra na Fig. 3. Nesta máquina uma massa cai por gravidade sobre a superfície da placa a ensaiar. As características principais da máquina são permitir a obtenção de velocidades variáveis entre os 1,5 e os  $21,5 \text{ ms}^{-1}$ , energias a partir dos 1,5 Joules, e uma altura máxima de queda de 1 m, sendo que os valores máximos de energia e velocidade são obtidos através de um sistema de corda elástica. Este dispositivo dispõe de um sistema pneumático que impede impactos por repique e de um fotodetector que mede com precisão a velocidade com que o impactor atinge a placa.

Foram utilizados provetes de forma quadrada com dimensões de 78x78 mm. Estes foram encastrados segundo um círculo de 55 mm de diâmetro com centro no ponto de impacto. Foi utilizado um impactor em aço de forma circular com diâmetro de 20 mm. A máquina possui um programa que permite seleccionar o parâmetro de ensaio como: a energia de impacto, a velocidade de impacto ou altura de queda, uma vez escolhida a massa. No caso dos ensaios efectuados foi utilizada uma massa de 3,62 kg e imposto ao sistema um valor para a energia de impacto. Assim, foram ensaiadas placas impondo energias de impacto de 1,5 J; 2 J; 2,5 J e 3 J, a que correspondem as velocidades de  $0,91 \text{ ms}^{-1}$ ;  $1,05 \text{ ms}^{-1}$ ;  $1,18 \text{ ms}^{-1}$  e  $1,29 \text{ ms}^{-1}$ , respectivamente.

Os defeitos resultantes destes impactos foram posteriormente inspeccionados com recurso às técnicas de análise não destrutiva anteriormente descritas. A fonte de luz coerente utilizada no sistema de ESPI foi um laser de He-Ne, com uma potência de 32 mW e com comprimento de onda de 632,8 nm, enquanto que, para o sistema de *Shearography* foi utilizado um laser do estado sólido (modelo Verdi da empresa Coherent) que emite no verde, com comprimento de onda de 532 nm e 2 W de potência máxima. Os padrões de interferência obtidos foram processados num sistema de análise de imagem disponível no LOME.

Apesar de não ser o único laser a poder ser utilizado nos sistemas de *Shearography*, o laser de estado sólido foi também usado por van den Bos [13], na realização de ensaios em materiais sandwich de alumínio – carbono. Este autor recorre a um método de projecto estatístico dos provetes em análise, para optimizar os resultados obtidos por *Shearography*. De referir que no presente estudo o carbono foi usado como material de reforço da matriz epoxy.

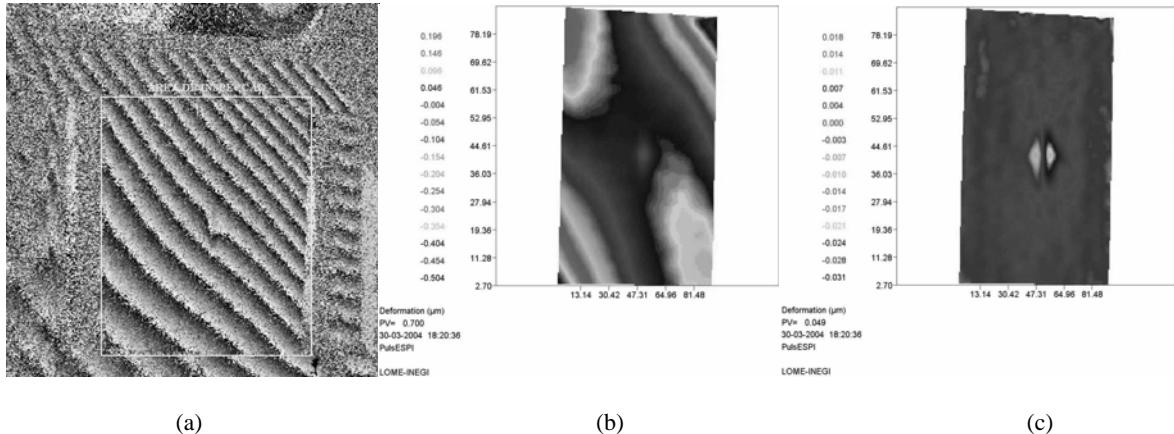


Fig. 4. Resultados obtidos por ESPI. (a) - Mapa de fase; (b) - Mapa de fase com remoção de rotação de corpo rígido; (c) - Derivada horizontal do deslocamento.

#### 4. RESULTADOS OBTIDOS

Todas as placas inspeccionadas com as técnicas ópticas foram previamente montadas numa estrutura de suporte e ligeiramente aquecidas com uma lâmpada de halogéneo para evidenciar as regiões com defeito. Na Fig. 4 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de uma das placas com o sistema de ESPI. Na primeira imagem está representado o mapa de fase onde um padrão de franjas paralelas corresponde a uma rotação de corpo rígido segundo uma das diagonais da placa. Este movimento foi propositadamente induzido para mostrar a sua influência nos resultados da medição. Na segunda imagem pode ver-se o mesmo mapa de fase após remover parte da rotação utilizando um programa numérico que ajusta uma superfície aos resultados da medição. Como se pode ver após esta operação o defeito no centro da placa torna-se mais evidente. A última imagem corresponde à derivada horizontal dos deslocamentos com grande realce da região defeituosa.

Nas figuras 5 e 6 apresentam-se alguns dos resultados obtidos para as placas com sequência de empilhamento simétrica,  $[0,90,0,90]_{2s}$ , e antissimétrica  $[0,90]_8$ , respectivamente, sendo visível em qualquer uma das figuras a presença de defeitos. Nestas figuras e para todas as imagens são apresentadas sequências com o padrão de franjas de ESPI, mapa de fase e o mapa de fase filtrado com um detalhe em falsa cor indicando a região defeituosa, obtidos a partir de um padrão de *Shearography* gravado na mesma região. Nestas figuras são apresentados os resultados obtidos para os valores extremos da gama de energia de impacto considerada. Como seria de esperar constata-se que a grandeza dos defeitos obtidos para o mesmo tipo de placa depende da energia de impacto, observando-se um acréscimo nas dimensões do defeito com o aumento da energia aplicada.

Na Fig. 6 verifica-se ainda que a resposta da placa antissimétrica à solicitação de 3 J de energia é diferente do observado para a mesma placa com energias inferiores. Ensaios realizados posteriormente com outras placas com idênticas sequências de empilhamento, e com as mesmas solicitações, quer em energias, quer em velocidades, permitiram concluir que este tipo de resposta pode ser justificado pelo facto das placas com sequência de empilhamento antissimétrico estudadas poderem apresentar o seu limite de rotura para energias de impacto entre os 2,5 J e os 3 J. Os autores pensam que tal pode-se dever ao facto das placas antissimétricas apresentarem uma menor resistência à flexão do que as placas simétricas. Na realidade, ensaios realizados posteriormente [14], para caracterizar a resistência à flexão deste tipo de placas, demonstrou que as placas simétricas apresentam uma melhor performance, neste tipo de ensaios, do que as placas antissimétricas.

De referir que se existirem duas camadas contíguas com a mesma orientação, a interface entre as mesmas deixa de ser propensa à ocorrência de dano, podendo ser as duas camadas tratadas como se de apenas uma se tratasse com o dobro da espessura.

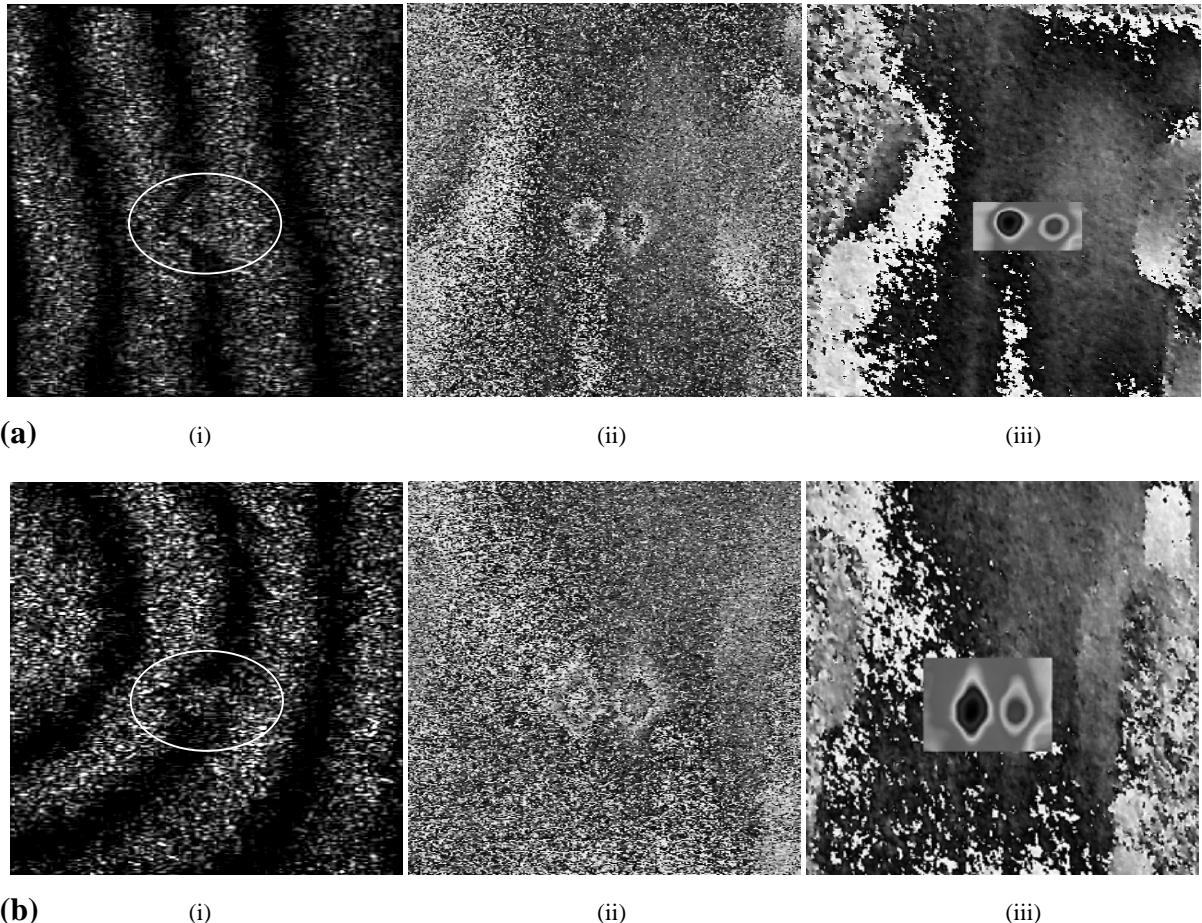


Fig. 5. Defeitos visualizados para as placas simétricas – Energia de impacto. a)  $E = 1,5\text{ J}$ ; b) –  $E = 3\text{ J}$ . i) Padrão de franjas de ESPI; ii) – Mapa de fase de um padrão de Shearography iii) – Mapa de fase de um padrão de Shearography com representação em falsa cor.

A Fig. 7, apenas com os resultados obtidos por *Shearography* e com representação em falsa cor, mostra que, para o mesmo valor de energia de impacto, na placa simétrica os defeitos detectados são de dimensões superiores aos correspondentes para as placas antissimétricas. Nesta figura é apenas apresentado um caso, no entanto, o referido observou-se para todos os valores de energia ensaiados, exceção feita para o valor de 3 J, conforme já mencionado. Na mesma pode ainda observar-se que a sequência de empilhamento interfere com a definição das franjas de interferência obtida, e com a forma do defeito originado. Por isso a detecção de defeitos em placas com camadas dispostas de forma antissimétrica revelou-se mais difícil.

## 5. CONCLUSÕES

As técnicas de interferometria holográfica apresentadas revelam-se extremamente úteis na inspecção de laminados de materiais compósitos. Estas são utilizadas sem preparação prévia das superfícies e sem contacto, permitindo identificar facilmente gradientes de deslocamentos. Consta-se que estes gradientes estão normalmente associados a regiões com defeitos. Estas técnicas têm a capacidade de efectuar medições com uma resolução submicrométrica, detectando defeitos internos desde que se manifestem no campo de deslocamentos à superfície. A utilização de técnicas de processamento de imagem na análise dos padrões de interferência permite tratar a informação recolhida em cada medição realçando as regiões com interesse.

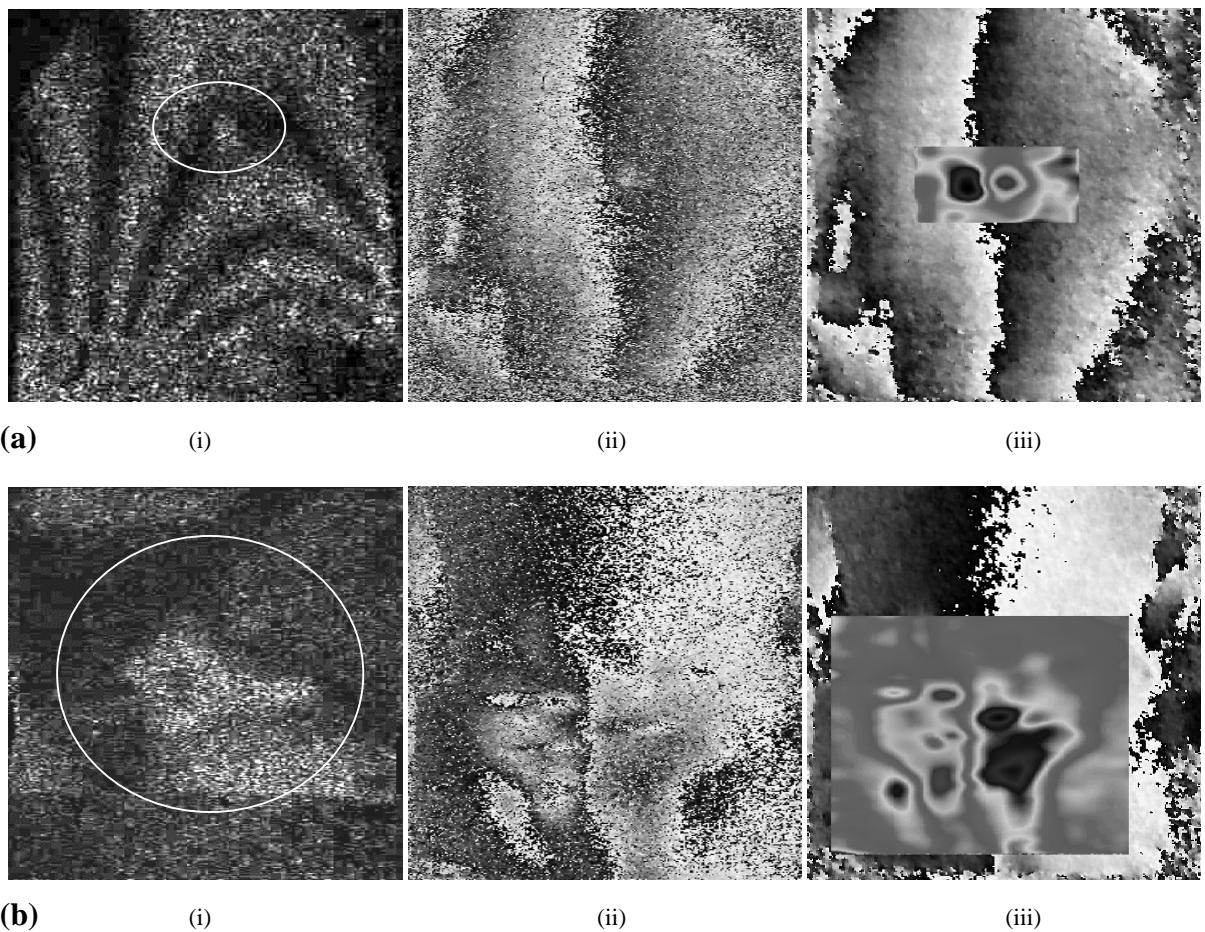


Fig. 6. Defeitos visualizados para as placas antissimétricas. – Energia de impacto a).  $E = 1,5\text{ J}$ ; b)  $E = 3\text{ J}$ . i) – Padrão de franjas de ESPI; ii) – Mapa de fase de um padrão de Shearography; iii) – Mapa de fase de um padrão de Shearography com representação em falsa cor.

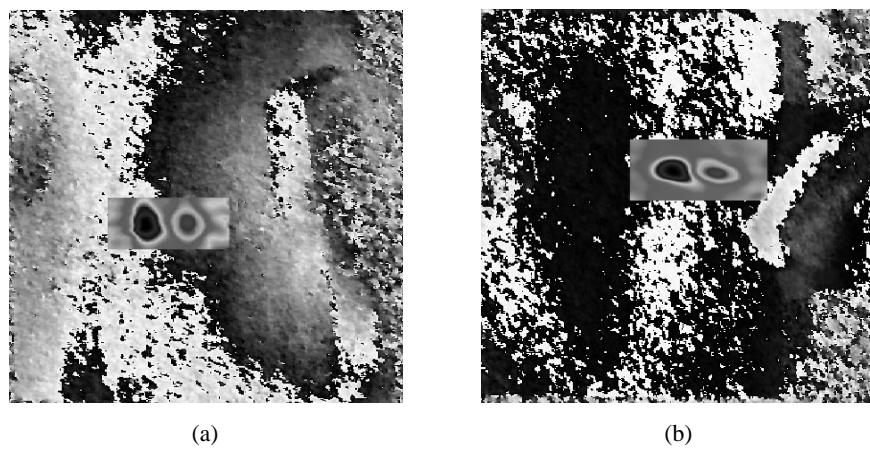


Fig. 7. Energia de impacto de 2 J. a) – Placa simétrica; b) – Placa antissimétrica.

Todas as placas foram também inspeccionadas por técnicas baseadas em propagação de ultra-sons, nomeadamente por C-Scan, tendo-se verificado o mesmo tipo de defeitos, e a mesma discrepância na di-

imensão dos defeitos verificada para as placas antissimétricas quando solicitadas com energias de 3 J.

A utilização de técnicas baseadas nos ultra-sons tem a vantagem de permitir identificar a posição dos defeitos ao longo da espessura das placas. Para que os defeitos possam ser detectados, têm que apresentar dimensões superiores ao comprimento de onda da radiação, o que inibe o uso destes métodos na detecção de defeitos de pequenas dimensões. De referir que quanto mais pequeno for o defeito, menor deverá ser o comprimento de onda da radiação emitida, a que corresponde uma frequência mais alta, e uma maior dificuldade na detecção de defeitos.

Para a detecção de defeitos as técnicas baseadas na interferometria holográfica, apresentadas neste trabalho, são bastante eficazes, tendo a Shearography a vantagem de, como é um sistema compacto, poder ser utilizado fora do laboratório. Por outro lado, se além da detecção de defeitos se pretender localizá-lo ao longo da espessura, ou mesmo quantificá-lo, deve-se recorrer a outros métodos de análise não destrutiva, como por exemplo ao C-Scan por ultra-sons.

Em relação ao tipo de material utilizado constata-se que para a placa com sequência de empilhamento de  $[0,90]_8$  pode existir um limiar da energia de impacto, entre os 2,5 J e os 3 J, a partir do qual aumenta significativamente a dimensão do dano. Em todos os ensaios foram detectados defeitos de dimensões elevadas nas zonas correspondentes aos impactos de 3 J. Para as placas com sequência de empilhamento  $[0,90,0,90]_{2s}$ , não se observa a presença de defeitos de dimensões elevadas, sendo que, para este tipo de placas, a presença e localização dos defeitos é perfeitamente visível com qualquer uma das técnicas utilizadas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Carlos Navarro da Universidade Carlos III em Madrid pela disponibilidade na utilização da máquina de impacto.

## REFERÊNCIAS

- [1] A. M. Amaro “Determinação de propriedades mecânicas de substratos e filmes finos por interferometria laser”, Tese de mestrado, DEM-FCTUC, Coimbra, (1994).
- [2] G. Udupa, B. K. A. Ngoi, H. C. Freddy Goh, M. N. Yusoff, “Defect detection in unpolished Si wafers by digital shearography”, Meas. Sci. Technol., 15, pp. 35-43, (2004).
- [3] J.-R. Lee, J. Molimard, A. Vautrin, Y. Surrel, “Application of grating shearography and speckle shearography to mechanical analysis of composite material”, Composites: Part A, 35, pp. 965-976, (2004).
- [4] J. M. Monteiro “Desenvolvimento de um sistema de interferometria holográfica (ESPI) para análise de estruturas sob solicitações estáticas e dinâmicas”, Tese de mestrado, DEMEGI-FEUP, Porto, (1998).
- [5] SPIE – Proceedings “Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry” (Editores: Wolfgang Steinchen, Lianxiang Yang) Published by SPIE-The International Society for Optical Engineering, Published January 2003.
- [6] W. Steinchen, L. Yang, G. Kupper, P. Mäckel, “Non – destructive testing of aerospace composite materials using digital Shearography” – Proc. Instr. Mech. Engn., vol. 212, Part G, pp. 21-30, (1998).
- [7] F. Santos, M. Vaz, J. Monteiro, “A new set-up for pulsed digital shearography applied to defect detection in composite structures” – Optics and Lasers in Engineering., vol. 42, pp. 131-140, (2004).
- [8] K. Habib, “Thermally induced deformations measured by Shearography” – SHORT COMMUNICATION, Optics & Laser Technology, (In Press).
- [9] R. Groves, S. James, R. Tatam, “Shape and slope measurement by source displacement in Shearography” – Optics and Lasers in Engineering, vol.41, Issue 4, pp 621-634, (April 2004).
- [10] R. Marini, M. Vaz, et al “Non destructive testing of composite sandwich panels using optical interferometric patterns” – International Conference on “Emerging Techniques in NDT”, Atenas, Maio, (1999).
- [11] J. Silva Gomes, J. Monteiro, M. Vaz, “NDI of interfaces in coating systems using digital interferometry” – Journal of Mechanics of Materials, vol. 32, pp. 837 –843, (2000).

- [12] K. Kim, K. Kang, Y. Kang, S. Cheong, “Analysis of an internal crack of pressure pipeline using ESPI and Shearography” – Optics & Laser Technology, vol. 35, Issue 8, pp 639-643, (November 2003).
- [13] B. van den Bos, J. Andersson, J. Gustafsson, “ Optimization of shearography testing using statistical design of experiments” 16<sup>th</sup> WCNDT 2004 –World Conference on NDT, Aug 30-Sep 3, Montreal, Canada, (2005).
- [14] A. M. Amaro, P. N. B. Reis, M. F. S. F. de Moura, “Residual strength after low velocity impact in carbon-epoxy laminates” – Aceite para publicação nas actas de Materiais 2005, 20 – 23 de Março, Aveiro (2005).

## HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY TECHNIQUES FOR DEFECT DETECTION IN LAMINATED COMPOSITES

**Abstract** – In this work non-destructive techniques, based on holographic interferometry, are used to analyse laminated composites containing defects caused by low velocity and low energy impacts. Two kind of carbon-epoxy laminated structures were tested  $[0,90,0,90]_{2s}$ , symmetrical plates, and  $[0,90]_8$  anti-symmetrical plates. It should be pointed out that anti-symmetrical plates offers higher impact strength than symmetrical ones. The defects are detected by two interferometric techniques; ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) and *Shearography*.

**Keywords** – Composites, damage, holographic interferometry.

