



VALIDAÇÃO DA MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES POR CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM EM COMPÓSITOS LAMINADOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

J.A.G. CHOUSAL, M.F.S.F DE MOURA

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
R. Dr. Roberto Frias 4200-PORTO

(Recibido 19 de noviembre de 2004, para publicación 30 de mayo de 2006)

Resumen – Neste artigo é apresentado um procedimento de simples implementação que pode ser usado para medir deslocamentos no plano de imagem de um objecto. Esta medida pode ter uma precisão de medição variável, dependente da textura e do sistema óptico formador de imagem. O método é baseado na correlação espacial realizada sobre duas imagens, uma antes e outra após carregamento. O recurso à transformada de Fourier permite reduzir o tempo de processamento e representa a etapa principal do processamento digital de imagem necessário à determinação do deslocamento sofrido pela área da imagem. Para verificar a capacidade de medição do procedimento foram efectuadas medições simultâneas com um ensaio de tracção de placas de um material compósito de matriz polimérica. Posteriormente fez-se a comparação para algumas das propriedades do material usando o procedimento habitual do ensaio de tracção e a medição da deformação por correlação de imagem, tendo-se obtido uma boa concordância entre os dois procedimentos.

Palabras clave – Processamento de imagem, correlação espacial, compósitos, metrologia, deformações.

1. INTRODUÇÃO

Os compósitos tornaram-se numa importante classe de materiais que permite conceber estruturas de elevada resistência mecânica e assinalável leveza. Estes materiais possuem geralmente uma estrutura laminada, isto é, são constituídos por várias camadas nas quais as fibras estão todas alinhadas na mesma direcção. A camada, que pode ser considerada um compósito unidireccional, é portanto um bloco elementar cujo comportamento mecânico é fundamental caracterizar. Para isso recorre-se a uma série de ensaios mecânicos de provetes que permitem a obtenção das propriedades pretendidas. Além dos métodos convencionais de medida de deslocamentos, como é o caso da extensometria eléctrica, adquirem cada vez mais importância os métodos ópticos pela sua flexibilidade e adaptabilidade às mais diversas situações de medição. A natural ligação entre os métodos ópticos e o processamento de imagem permite processar grandes quantidades de dados com rapidez e precisão. Neste artigo mostra-se a validade da medição efectuada por métodos ópticos e análise de imagem por comparação com a habitual leitura do deslocamento entre marcas no provete usando a extensometria. Na medição efectuada compararam-se os valores obtidos usando um extensómetro de pinças e a correlação digital de imagem.

A correlação digital de imagem é, de certo modo, o equivalente digital da fotografia speckle e tem poucos anos de existência. A fotografia speckle é, por sua vez, uma técnica óptica com uma longa existência. Basicamente consiste na comparação de dois padrões de speckle obtidos antes e após a deformação de um objecto, o que permite determinar o deslocamento ocorrido entre os dois estados. Esta técnica usa o registo em filme fotográfico e é por conseguinte um procedimento demorado. O surgimento das técnicas de registo em vídeo, e mais recentemente em vídeo digital, vieram dar maior flexibilidade aos métodos ópticos, permitindo simplificar, acelerar e tornar mais acessíveis estas técnicas ópticas. Existe contudo uma desvantagem: a menor resolução do registo em vídeo. O desenvolvimento das câmaras CCD com o consequente aumento de resolução veio diminuir este problema e permitiu que as

técnicas speckle digitais se tornassem competitivas face às convencionais. Peters et al. [1] e Takai et al. [2] fizeram as primeiras abordagens desta técnica executando a correlação, tal qual ela é definida matematicamente, resultando num procedimento bastante demorado. Este procedimento ainda é usado hoje em dia mas não é o mais eficiente. O recurso ao processamento baseado na FFT (Fast Fourier Transform) fez surgir técnicas com nomes como correlação digital de imagem [3], correlação speckle digital [4] e fotografia speckle electrónica [5]. Todas estas técnicas são baseadas nas propriedades estatísticas de campos de speckle, cuja análise feita numa base ponto-a-ponto permite calcular o campo vectorial de deslocamentos no plano de um objecto. O procedimento comum é maximizar a correlação entre sub-imagens dos padrões não deformado e deformado usando algoritmos que diferem entre si em cada uma das abordagens.

Os laminados compósitos apresentam deformações normalmente pequenas no plano, sendo por isso difícil a sua medição usando a correlação de imagem. É este o motivo pelo qual poucas publicações nesta área se fizeram até agora. Icardi [6] usou a correlação de imagem para medir o deslocamento ao longo da espessura em materiais compósitos, e constatou que a técnica é adequada para medir com a precisão pretendida para as suas experiências. Ge et al. [7] usaram a correlação speckle em conjunto com uma análise MEF (Método dos Elementos Finitos) para estudar o comportamento de painéis laminados contendo defeitos elípticos pré-fabricados. Desta análise concluíram que a fractura em modo III existe e deve, por isso, ser tida em conta na modelização do crescimento da fenda. Como estes exemplos evidenciam, a correlação digital de imagem ainda agora começou a sua aplicação aos compósitos laminados sendo contudo uma técnica com potencial para este tipo de materiais à medida que as tecnologias de registo CCD e CMOS vão evoluindo.

2. DESCRIÇÃO DO MÉTODO

A correlação espacial de imagem, aqui apresentada, representa a evolução natural da fotografia speckle quando se faz uso das técnicas de processamento de imagem. Desta forma a automatização dos métodos ópticos clássicos pode ser conseguida com a versatilidade normalmente associada ao processamento digital de imagem. A fotografia speckle e suas derivações são métodos complementares à interferometria coerente, como a interferometria speckle, já que permitem resolver os problemas que envolvem grandes deslocamentos, que naqueles métodos originam descorrelação, ou seja perda total da medida.

A fotografia speckle usa um specklegrama como meio de registo, o qual representa a sobreposição de duas imagens do mesmo objecto antes e após deformação, Fig. 1. A análise deste specklegrama através de um feixe LASER, como mostrado na Fig. 2, permite determinar o deslocamento sofrido pelo ponto alvejado pelo feixe de LASER. A colocação do alvo a seguir ao specklegrama dá lugar à formação de franjas paralelas, designadas de Young, cuja medição permite avaliar o deslocamento tendo em conta a sua orientação e espaçamento. O deslocamento sofrido pelo ponto é na perpendicular à direcção das franjas e a sua intensidade inversamente proporcional ao espaçamento das franjas p , Fig. 2, sendo dado por:

$$d = \frac{\lambda L}{p} \quad (1)$$

onde λ é o comprimento de onda do LASER utilizado para iluminação do specklegrama e L a distância entre o specklegrama e o alvo. Este método tem contudo uma indeterminação que é o sentido do deslocamento, e por isso algumas medidas devem ser tomadas para evitar esse problema. Convém ainda referir que a superfície do objecto deve ter uma textura aleatória para que o método funcione.

A formação das franjas de Young é na prática uma transformada de Fourier óptica, onde o alvo é o plano das frequências. Assim sendo, esta experiência pode ser reproduzida usando o processamento de imagem. Na Fig. 3 pode ver-se um specklegrama no qual foi feita uma FFT revelando as referidas franjas de Young. Uma nova FFT permite obter a chamada função de auto-correlação que exhibe pontos cujas coordenadas no plano representam o deslocamento médio sofrido pelos pontos da área processada. O

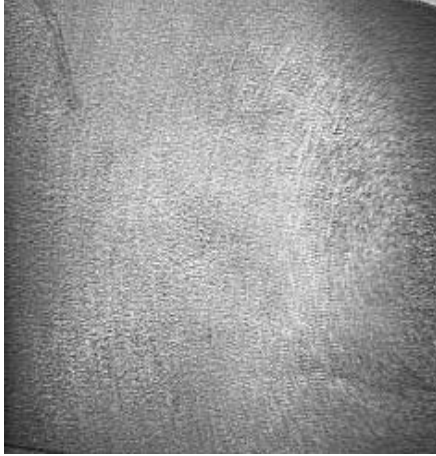


Fig. 1. Imagem de um specklegrama correspondente à rotação de um objecto.

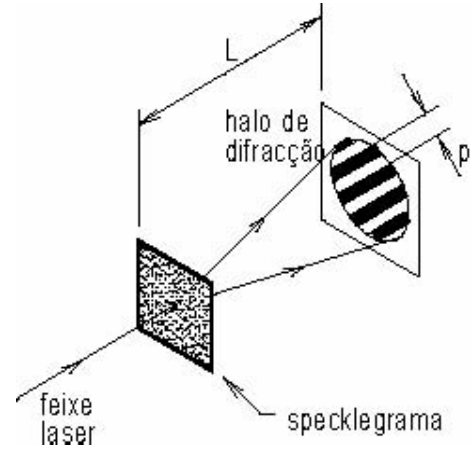
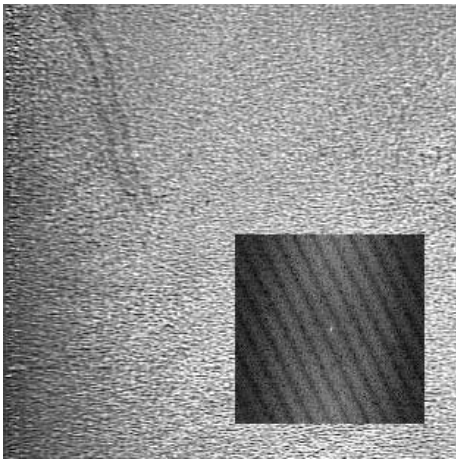
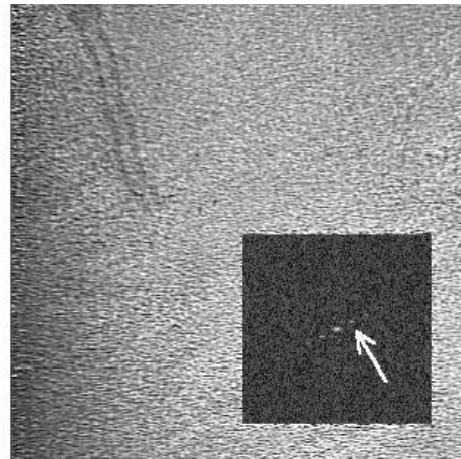


Fig. 2. Formação das franjas de Young na fotografia *speckle*.



(a)



(b)

Fig. 3. Reprodução da fotografia *speckle* usando processamento de imagem. (a) Formação das franjas de Young e (b) autocorrelação mostrando os pontos que permitem determinar a amplitude e direcção de deslocamento.

deslocamento real é dado pelo primeiro harmónico, mas, como foi dito anteriormente, nota-se a ambiguidade no sentido, já que temos precisamente os mesmos pontos no terceiro quadrante.

A correlação numérica representou a primeira aproximação ao método da fotografia *speckle* recorrendo às técnicas de processamento digital de imagem [1]. Há uma diferença fundamental nesta nova aproximação: neste caso as duas imagens são agora gravadas em separado, ou seja o specklegrama é agora constituído por duas imagens. Peters et al. [1], Takai et al. [2] começaram por efectuar a correlação no plano da imagem recorrendo à definição de correlação entre duas funções h_1 e h_2 :

$$h_1 \circ h_2 = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N h_1(x, y) h_2(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (2)$$

Esta expressão representa uma abordagem matricial que envolve uma quantidade de cálculos enorme, apesar da redução reclamada através da adopção de um algoritmo simplificado [2]. Este algoritmo simplificado é baseado na binarização da imagem, isto é a conversão dos 256 níveis de intensidade em

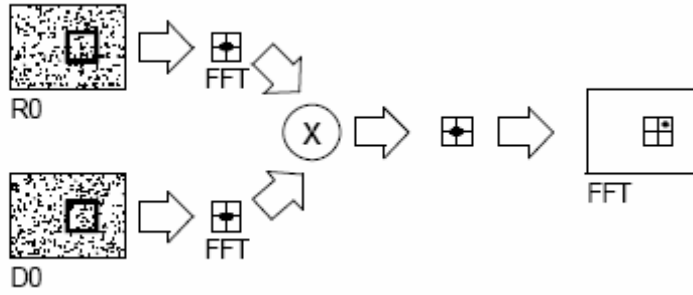


Fig. 4. Organograma do processamento efectuado na correlação digital de imagem.

apenas 2. Dificuldades na detecção do deslocamento correspondente ao máximo valor de correlação levaram Sriram et al. [8] a usar como função de correlação o quadrado da diferença, em vez do produto dentro do duplo somatório na expressão anterior.

Se em vez do processamento ser feito no domínio espacial, o for no domínio espectral, a correlação espacial reduz-se a um produto [9]. Com o recurso à FFT, e uma vez que se trata de um algoritmo otimizado, o número de operações é substancialmente reduzido relativamente ao cálculo efectuado usando a correlação espacial, com a equação (2). Tendo em conta estas considerações Chen et al. [4] propuseram o uso da correlação digital no domínio espectral. A sua implementação encontra analogia no método das franjas de Young, Fig. 3, apesar de que neste caso o processamento de cada imagem ser feito em separado. Como naquele, é necessário ter dois padrões correspondentes a duas situações distintas do objecto, antes e após deslocamento. A correlação numérica exige a segmentação da imagem, isto é, a divisão da imagem total em sub-imagens que contenham informação suficiente para permitir quantificar o deslocamento médio sofrido pelos seus pontos entre os dois estados do objecto.

Consideremos então o processamento de uma pequena região da imagem de referência (R0) e deformada (D0) como mostrado esquematicamente na Fig. 4. Sendo a região seleccionada pequena, pode admitir-se que o deslocamento de todos os seus pontos é uniforme, representando portanto o deslocamento médio nessa região. Esta aproximação pode ou não ser considerada aceitável, dependendo do campo de deslocamentos e da dimensão da área considerada. As duas sub-imagens podem ser representadas por:

$$\begin{aligned} h_1(x, y) &= h(x, y) \\ h_2(x, y) &= h(x - u, y - v) + r(x, y) \end{aligned} \quad (3)$$

sendo a segunda sub-imagem uma translação da primeira, degradada por ruído r de origem óptica e electrónica. O deslocamento sofrido pelos speckles da sub-imagem é dado pelo vector (u, v) . Aplicando a FFT a ambas as sub-imagens obtemos a matriz complexa espectral de cada uma delas:

$$\begin{aligned} H_1(\omega_x, \omega_y) &= \iint_{\Delta} h(x, y) \exp[j2\pi(x\omega_x + y\omega_y)] dx dy = |H(\omega_x, \omega_y)| \exp[j\phi(\omega_x, \omega_y)] \\ H_2(\omega_x, \omega_y) &= \iint_{\Delta} [h(x - u, y - v) + r(x, y)] \exp[j2\pi(x\omega_x + y\omega_y)] dx dy = \\ &= |H(\omega_x, \omega_y)| \exp[j[\phi(\omega_x, \omega_y) - 2\pi(u\omega_x + v\omega_y)]] + R(\omega_x, \omega_y) \end{aligned} \quad (4)$$

onde Δ representa a região analisada, ω_x, ω_y são as coordenadas espectrais, H e ϕ representam a amplitude e fase espectrais, e R é o espectro do ruído. O resultado obtido nesta operação é equivalente ao halo de difracção de cada uma das imagens, por paralelismo com a fotografia speckle, e são na Fig. 4 as primeiras FFTs representadas na sequência de processamento. O aspecto típico deste halo de difracção pode ver-se na Fig. 5(a).



Fig. 5. Aspecto das FFT realizadas durante o processamento. (a) halo de difracção de uma das sub-imagens e (b) correlação cruzada, mostrando o pico correspondente ao deslocamento médio dos pontos da sub-imagem.

Um novo espectro pode ser obtido pelo produto dos dois espectros anteriormente referidos, representando a correlação cruzada entre os dois padrões:

$$\begin{aligned}
 F(\omega_x, \omega_y) &= \frac{H_1(\omega_x, \omega_y) H_2^*(\omega_x, \omega_y)}{|H_1(\omega_x, \omega_y) H_2(\omega_x, \omega_y)|^{1-\alpha}} = \\
 &= |H_1(\omega_x, \omega_y) H_2^*(\omega_x, \omega_y)|^\alpha \exp\left[j\left[\phi_1(\omega_x, \omega_y) - \phi_2(\omega_x, \omega_y)\right]\right]
 \end{aligned} \quad (5)$$

onde ϕ_1 e ϕ_2 são as fases dos dois espectros e α é uma constante ($0 \leq \alpha \leq 1$). O ruído, sendo descorrelacionado, dilui-se ao longo de todo o espectro, podendo, por isso, ser ignorado. Substituindo (4) em (5) obtém-se:

$$F(\omega_x, \omega_y) = |H(\omega_x, \omega_y)|^{2\alpha} \exp\left[j2\pi(u\omega_x + v\omega_y)\right] \quad (6)$$

o que mostra que o espectro resultante é uma onda plana com a direcção de propagação caracterizada apenas pelo vector deslocamento (u, v) local [4]. Efectuando uma nova transformada obteremos num novo domínio espectral (ξ, η) :

$$\begin{aligned}
 G(\xi, \eta) &= \iint_{\Delta\omega} F(\omega_x, \omega_y) \exp\left[j2\pi(\omega_x\xi + \omega_y\eta)\right] d\omega_x d\omega_y = \\
 &= \iint_{\Delta\omega} |H(\omega_x, \omega_y)|^{2\alpha} \exp\left[-j2\pi[\omega_x(\xi - u) + \omega_y(\eta - v)]\right] d\omega_x d\omega_y = \\
 &= \bar{G}_\alpha(\xi - u, \eta - v)
 \end{aligned} \quad (7)$$

onde $\Delta\omega$ representa o primeiro domínio espectral e $\bar{G}_\alpha$ é o espectro modulado pelo halo de difracção. Este espectro é um sinal com um pico localizado em (u, v) no segundo domínio espectral (última FFT no esquema da Fig. 4) e apresenta o aspecto mostrado na Fig. 5(b). A detecção deste pico permite, por isso, quantificar o deslocamento sofrido, entre as duas imagens, pelos speckles da região considerada. O valor de α permite controlar a dominância do pico obtido, sendo o seu ajuste bastante importante. Quando $\alpha=0$ o sinal dado por (7) é constituído unicamente pelo sinal de fase, o que resulta, teoricamente, numa resposta que é a função delta de Dirac, ou seja um impulso localizado no ponto de coordenadas (u, v) . A existência de ruído torna contudo esta situação ideal difícil de ser utilizada na prática pois o pico pode ficar camuflado, sendo por isso difícil de detectar. Para $\alpha=0.5$ o sinal obtido por (6) representa a

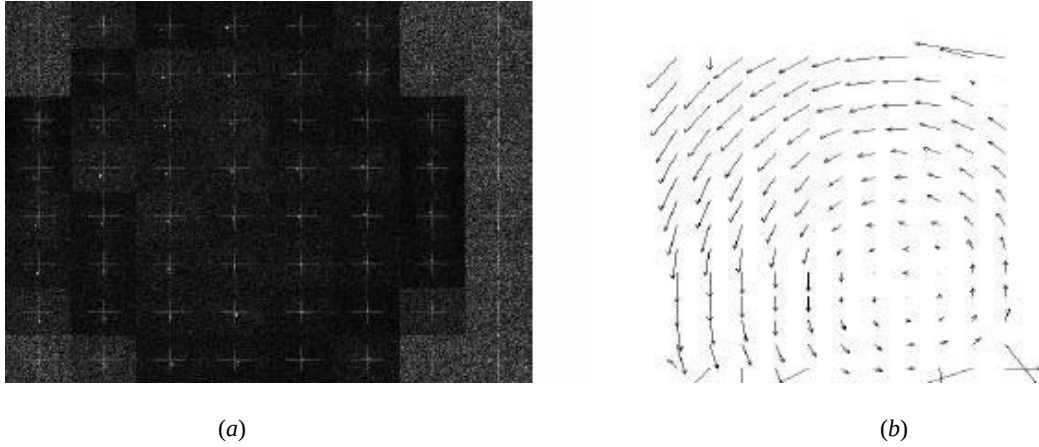


Fig. 6. Processamento da área completa da imagem de um objecto submetido a uma rotação. (a) Amostragem das correlações obtidas e (b) respectivo campo de deslocamentos no plano.

amplitude do halo de difracção e o impulso obtido em (7) é dado então pelo espectro da amplitude do halo de difracção deslocado de (u,v) relativamente à origem. No caso em que $\alpha=1$, em vez da amplitude teremos a intensidade do halo de difracção e este é o resultado que seria obtido correlacionando as duas imagens através da expressão (2). Para esta situação o pico atenua-se bastante podendo originar erros na sua detecção. Em conclusão, o melhor valor de α a utilizar será o menor possível evitando a influência nefasta do ruído.

Das equações anteriores conclui-se que, efectuada no domínio das frequências, a correlação espacial fica reduzida ao produto de duas funções (imagens), o que torna o procedimento computacionalmente mais simples e rápido [9]. A correlação espacial pode então ser traduzida pela seguinte expressão [10]:

$$h_1 \circ h_2 = FFT \left[H_1(\omega_x, \omega_y) H_2^*(\omega_x, \omega_y) \right] \quad (8)$$

onde H_1 e H_2 representam as FFT das funções imagem h_1 e h_2 , respectivamente e o $*$ representa o complexo conjugado. Este procedimento encontra-se esquematizado na Fig. 4, tendo como resultado final um sinal com um pico localizado na posição (u,v) do segundo domínio espectral, Fig. 5(b). A detecção e localização deste pico permite determinar o deslocamento médio sofrido pelos pontos da área de imagem considerada entre o estado inicial e final.

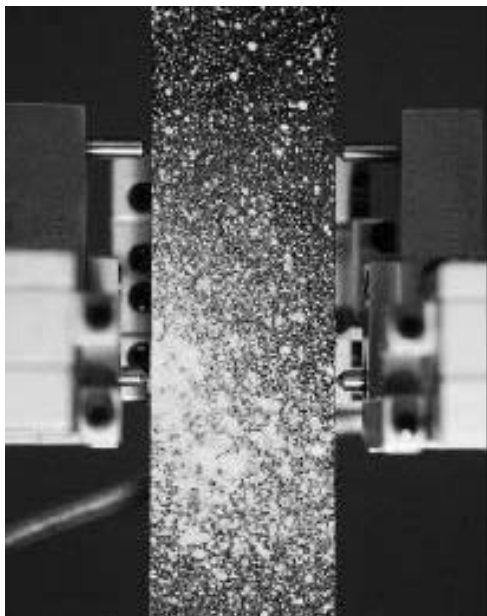
A aplicação do método à determinação do campo de deslocamentos ao longo da imagem total exige uma segmentação prévia. Esta segmentação consiste em dividir a imagem total em sub-imagens que contenham informação suficiente para quantificar o deslocamento sofrido pelos pontos que as constituem. Repetindo o processo de dupla FFT com detecção do pico de correlação obtém-se o campo de deslocamentos no plano para toda a imagem, Fig. 6(a) e (b).

3. EXPERIMENTAÇÃO

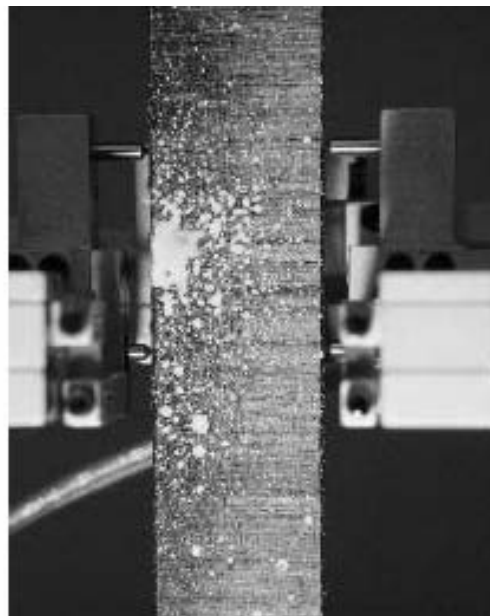
As placas foram fabricadas a partir de um rolo de pré-impregnado unidireccional de carbono-epóxico (Texipreg HS 160 REM) e seguindo os procedimentos aconselhados pelos fabricantes. Empilharam-se oito camadas, o que originou uma espessura média de 1.2 mm. Os provetes de dimensões 150 mm x 20 mm foram ensaiados à tracção com o objectivo de se proceder à obtenção de algumas propriedades mecânicas do material: os módulos de elasticidade na direcção longitudinal (E_{11}) e transversal (E_{22}). Os provetes apresentam sempre a mesma geometria, variando apenas a orientação das camadas. Assim, para a determinação do E_{11} as oito camadas estão orientadas a zero graus relativamente à direcção da solicitação. Na obtenção do E_{22} a orientação das camadas é de noventa graus relativamente à solicitação. Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 1. Os ensaios experimentais foram realizados através

Tabela 1. Propriedades elásticas obtidas por extensometria.

E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)
100.4	7.67



(a)

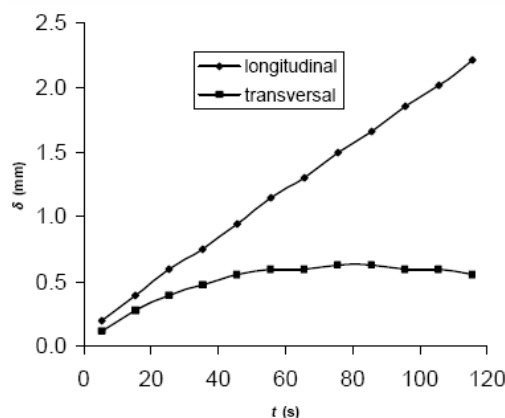


(b)

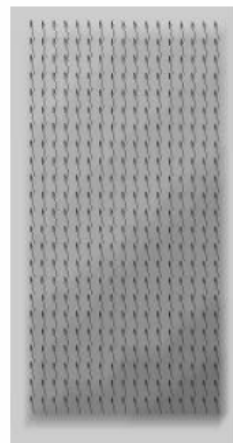
Fig. 7. Imagens dos provetes utilizados para medição, onde se pode ver a pintura da superfície e o extensómetro de pinças utilizado. (a) Provette $(0^\circ)_8$ e (b) provete $(90^\circ)_8$ onde se pode ver que sob determinadas condições de iluminação a superfície do material apresenta uma textura que não necessita pintura.

de uma máquina INSTRON modelo 4208 com uma velocidade de sollicitação de 1 mm/min no caso dos provetes $(0^\circ)_8$ e 2 mm/min no caso dos provetes $(90^\circ)_8$. A medição dos deslocamentos foi executada através de um extensómetro de pinças da marca INSTRON modelo 2630-036.

O equipamento necessário ao registo das imagens para medição é extremamente simples. Foram utilizados uma máquina fotográfica digital Olympus C-2500L e um tripé para sua fixação e imobilização. A C-2500L é uma câmara de 2.5 Mpixel possuindo uma resolução máxima de 1712x1368 pixel, com uma distância focal no modo “macro” compreendida entre 2 e 30 cm. Não se pode dizer ser a máquina ideal para este tipo de trabalho, pois existem já máquinas com 8, 11 e 13 Mpixel, que permitiriam fazer uma medição mais rigorosa. Possui ainda a limitação de apenas permitir gravar imagens de 10 em 10 segundos, o que reduziu significativamente a amostragem possível e desejável. Para efectuar o seu disparo foi utilizado o comando de infravermelhos, indispensável para este tipo de registo já que qualquer toque na máquina dá um desvio significativo na imagem registada. Colocando a câmara o mais próximo possível dos provetes, cerca de 5 cm, e usando a máxima resolução da câmara conseguiu-se uma precisão de medição máxima de 39,5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, sendo no entanto possível com outro equipamento chegar até aos 10 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. A precisão de medição depende essencialmente da resolução da máquina fotográfica e do campo de visão utilizado. De facto, para um mesmo equipamento, a precisão de medição aumenta com a diminuição do campo de visão, ou seja, quanto maior for o pormenor da imagem obtida maior será a precisão de medição. Os provetes foram previamente pulverizados com tinta branca para apresentarem uma textura aleatória típica de um padrão de *speckle* permitindo assim o adequado funcionamento do método, Fig. 7(a). Posteriormente constatou-se que sob determinadas condições de iluminação do



(a)



(b)

Fig. 8 - (a) Deslocamentos longitudinal e transversal de um ponto próximo à garra superior esquerda e (b) campo de deslocamentos global.

material a luz reflectida pela superfície tem a característica aleatória adequada ao funcionamento do método, Fig. 7(b). Este efeito pode ser obtido iluminando o provete de forma localizada e com uma determinada inclinação, o que pode ser complicado realizar em algumas situações.

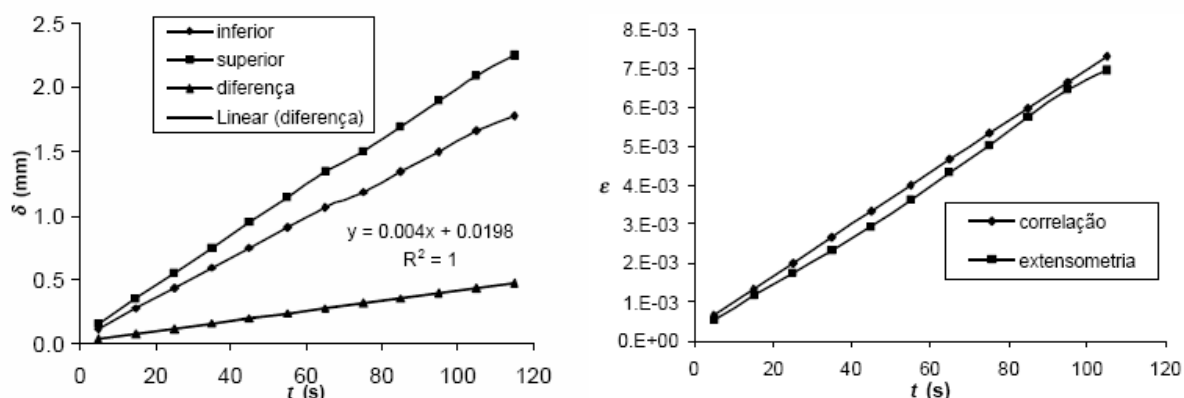
4. RESULTADOS

As imagens foram registadas com intervalos de 10 segundos devido à velocidade de escrita da máquina digital utilizada. A data dos ficheiros gravados na memória “flash” serviu de registo temporal para a criação dos pares carga/deslocamento. Foram registadas imagens da tracção uniaxial de provetes $(0^\circ)_8$ e $(90^\circ)_8$ nas quais foi possível medir a deformação longitudinal. A máquina utilizada não permitiu contudo medir as deformações na direcção transversal, sobretudo devido ao facto de esta ser de dimensão diminuta. Esta situação poderia ser ultrapassada usando uma máquina com maior resolução ou então provetes mais largos. A Fig. 8 mostra algumas medições efectuadas antes da rotura do provete, permitindo constatar a boa adaptabilidade do método para medir deslocamentos no plano. Em (a) pode ver-se o deslocamento medido por correlação de imagem de um ponto próximo da pinça superior esquerda do extensómetro. Neste gráfico pode observar-se um deslocamento linear na direcção longitudinal e uma ligeira acomodação lateral do provete traduzida pelo deslocamento transversal inicial seguido de uma estabilização. A imagem (b) mostra o campo de deslocamentos global da área visível do provete. As setas representam o deslocamento no plano e a tonalidade de fundo é uma medida da amplitude do deslocamento total. Zonas mais claras correspondem a maiores deslocamentos. Nesta imagem pode ver-se o deslocamento transversal inicial (inclinação das setas) e a existência de uma solicitação não uniforme que conduziu a maiores deslocamentos do lado direito, devido provavelmente ao escorregamento do provete nas amarras da máquina de tracção.

Com os provetes $(0^\circ)_8$, Fig. 7(a), obtiveram-se os valores que se encontram listados na Tabela 2. Nas colunas denominadas por “inferior” e “superior” estão os valores dos deslocamentos medidos por correlação de dois pontos na mesma vertical. A quarta coluna apresenta a diferença entre estes dois valores que, divididos pelo comprimento de referência, permitem calcular a deformação ε_{11} , representada na coluna seguinte. O comprimento de referência usado, isto é o afastamento entre os dois pontos, foi de 59.329 mm. Embora na extensometria o valor usado tenha sido de 25 mm, o valor aqui considerado corresponde ao máximo possível (área visível) de modo a melhorar a precisão de medida. As duas últimas colunas são os valores retirados do equipamento de medida da máquina de ensaios, nomeadamente a tensão normal e a deformação registada através do extensómetro de pinças, para comparação com os

Tabela 2. Valores dos deslocamentos, deformações e tensões no provete (0°)₈

Tempo (s)	Inferior (mm)	Superior (mm)	Diferença (mm)	ε correlação	σ (MPa)	ε extensometria
5	0.11850	0.15800	0.0395	0.00067	52.4970	0.00055
15	0.27650	0.35550	0.0790	0.00133	113.6498	0.00118
25	0.43450	0.55300	0.1185	0.00200	167.2578	0.00174
35	0.59250	0.75050	0.1580	0.00266	224.1651	0.00232
45	0.75050	0.94800	0.1975	0.00333	287.3446	0.00294
55	0.90850	1.14550	0.2370	0.00399	356.0638	0.00362
65	1.06650	1.34300	0.2765	0.00466	429.3612	0.00432
75	1.18500	1.50100	0.3160	0.00533	504.8866	0.00503
85	1.34300	1.69850	0.3555	0.00599	582.4417	0.00575
95	1.50100	1.89600	0.3950	0.00666	660.8209	0.00646
105	1.65900	2.09350	0.4345	0.00732	739.0933	0.00695

Fig. 9. (a) Deslocamentos obtidos em dois pontos nas extremidades visíveis do provete (0°)₈ e respectiva diferença. (b) Comparação da deformação obtida pelos dois métodos utilizados.Tabela 3. Valores dos deslocamentos, deformações e tensões no provete (90°)₈.

Tempo (s)	Inferior (mm)	Superior (mm)	Diferença (mm)	ε correlação	σ (MPa)	ε extensometria
6	0.04540	0.09080	0.04540	0.00056	6.81	0.00052
16	0.09080	0.18160	0.09080	0.00111	13.82	0.00141
26	0.13620	0.31780	0.18160	0.00222	20.73	0.00233
36	0.18160	0.45400	0.27240	0.00333	27.54	0.00322
46	0.22700	0.54480	0.31780	0.00389	33.97	0.00410

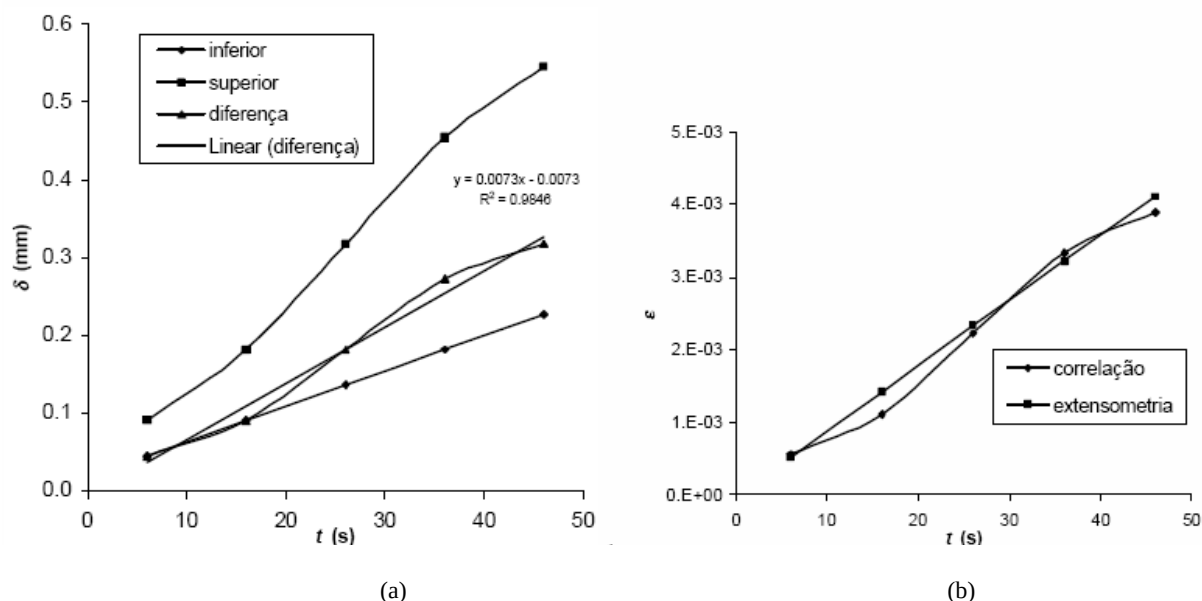


Fig. 10. (a) Deslocamentos obtidos em dois pontos nas extremidades visíveis do provete $(90^\circ)_8$ e respectiva diferença. (b) Comparação da deformação obtida pelos dois métodos utilizados.

Tabela 4. Comparação das propriedades elásticas obtidas por extensometria e por correlação de imagem.

Método	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)
Extensometria	100.4	7.67
Correlação Imagem	103.4	7.54

valores calculados. As imagens recolhidas apresentavam uma precisão de medição calculada de 0.0395 mm/pixel.

A Fig. 9 mostra em (a) os deslocamentos e sua diferença que constam da Tabela 2. Nela se pode ver que, apesar de os deslocamentos serem elevados permitindo uma medição com precisão, a sua diferença, sendo mais pequena, origina dificuldades de resolução e impossibilita, por isso, a medição de deformações transversais. Em (b) são comparadas as deformações calculadas com a correlação de imagem e as registadas pela extensometria, verificando-se uma boa concordância.

Os provetes $(90^\circ)_8$, Fig. 7(b), forneceram os valores apresentados na Tabela 3. Note-se que a amostragem foi menor no caso deste tipo de provete devido à sua menor resistência à tracção na direcção perpendicular às fibras. O comprimento de referência foi neste caso de 81.72 mm. As imagens recolhidas apresentavam uma precisão de medição calculada de 0.0454 mm/pixel.

A Fig. 10 mostra em (a) os deslocamentos e sua diferença que constam da Tabela 3. Nota-se agora a menor precisão de medida quer por perda de resolução quer pela menor amostragem. Em (b) são comparadas as deformações calculadas com a correlação de imagem e os valores registados pela extensometria, registando-se mesmo assim uma boa concordância.

Das Tabelas 2 e 3 podem agora calcular-se os módulos ajustando uma recta aos pares de valores σ - ϵ e obtendo o seu declive. Os valores calculados são apresentados na Tabela 4 juntamente com os obtidos por extensometria.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho é apresentada uma técnica de metrologia de imagem para medir deslocamentos no plano de imagem de um objecto com uma precisão de medição ajustável, controlada pela textura e/ou pelo sistema óptico formador de imagem. O método é baseado na correlação espacial realizada sobre duas imagens, obtidas antes e após a solicitação. O recurso à transformada de Fourier permite reduzir o tempo de computação, quando comparado com a formulação de base, e representa a etapa principal do processamento digital de imagem necessário à determinação do deslocamento médio ocorrido na área da imagem.

O procedimento foi usado para a obtenção dos módulos de elasticidade (E_{11} e E_{22}) de um compósito de carbono epóxico durante a realização de ensaios de tracção. Foi ainda tentada a determinação do coeficiente de Poisson maior (ν_{12}), mas o nível de deslocamentos obtido na direcção transversal à solicitação não permitiu, através da correlação de imagem e tendo em conta as limitações do equipamento ao nível da sua resolução, a obtenção de resultados. Com o decorrer da experimentação constatou-se que sob determinadas condições de iluminação a luz reflectida pela superfície do material tem uma textura aleatória adequada ao funcionamento do método sem a necessidade de pulverização com tinta. Este efeito pode ser conseguido iluminando o provete de forma localizada e com uma determinada inclinação de modo a reflectir a textura das fibras.

Os resultados obtidos apresentaram boa concordância com as medições realizadas por extensometria relativamente às deformações longitudinais em ensaios de tracção de provetes (0°)₈ e (90°)₈. Pode-se assim concluir da aplicabilidade do método à realização de medições de deslocamentos e deformações nas mais variadas situações, nomeadamente em peças de compósitos de matriz polimérica em serviço.

REFERÊNCIAS

- [1] Peters W.H., Ranson W.F., "Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis", *Optical Engineering*, **21**, 427-431 (1982)
- [2] Takai N., Asakura T., "Vectorial Measurements of Speckle Displacement by the 2-D Electronic Correlation Method", *Applied Optics*, **24**(5), 660-665 (1985)
- [3] Sutton M.A., Wolters W.J., Peters W.H., Ranson W.F., McNeill S.R., "Determination of displacements using an improved digital correlation method", *Image Vision Computing*, **1**, 133-139 (1983)
- [4] Chen D.J., Chiang F.P., Tan Y.S., Don H.S., "Digital Speckle-displacement Measurement Using a Complex Spectrum Method", *Applied Optics*, **32**(11), 1839-1849 (1993)
- [5] Sjudahl M., Benckert L.R., "Electronic speckle photography: analysis of an algorithm giving the displacement with subpixel accuracy", *Applied Optics*, **32**, 2278-2284 (1993)
- [6] Icardi U., "Through-the-thickness displacements measurement in laminated composites using electronic speckle photography", *Mechanics of Materials*, **35**, 35-51 (2003)
- [7] Ge, D., Liu, F., Lu, M., "Effect of mode III fracture on composite laminates", *Composite structures*, **63**, 469-480 (2004)
- [8] Sriram P., Hanagud S., "Projection-speckle Digital-correlation Method for Surface-displacement Measurement", *Experimental Mechanics*, **28**(4), 340-345 (1988)
- [9] Chousal J.A.G., "Técnicas de Processamento de Imagens Obtidas por Métodos Ópticos em Análise Experimental de Tensões", Tese de Doutoramento, FEUP (1999)
- [10] Chousal J.A., Gomes J.F., "Measuring Large Displacements by Image Processing Correlation", M²D, 3rd International Conference on Mechanics & Materials in Design, Orlando - Florida, USA, May 29-31, 269-270 (2000)

STRAIN MEASUREMENT VALIDATION BY DIGITAL IMAGE CORRELATION ON POLIMERIC MATRIX LAMINATE COMPOSITES

Abstract – In this work a simple procedure for measuring displacements at the plane image of an object is presented. The measurement accuracy depends on the optical system and image pattern. The method is based on the spatial correlation of two images, one before and other after loading. The use of Fourier transform allows reducing the computing time and is the main step of the digital image processing necessary to displacement determination. In order to verify the measurement capacity of the procedure, the measurements were performed simultaneously with the tensile test of composite plates for comparison. The results of the tensile test were used to obtain several material properties and subsequently compared to the image correlation procedure in order to validate the presented method. A good agreement was achieved between both procedures.

Keywords – Image processing, Spatial correlation, Digital speckle photography, Composites, Metrology, Strain measurement.