

TÉCNICAS DE INTERFEROMETRIA HOLOGRÁFICA DOS PADRÕES DE INTERFERÊNCIA APLICADAS À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

Chousal, J. A.¹; Monteiro, J. M.²; Santos, F. M.²; Vaz, M. A.³

¹ Assistente do DEMEGI - FEUP

² Investigador do Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental do INEGI

³ Professor Auxiliar do DEMEGI - FEUP



RESUMO

Neste trabalho são descritos métodos de análise estrutural baseados em técnicas de interferometria holográfica que utilizam registo electrónico dos interferogramas. A miniaturização dos sistemas obtida pela adopção de novas montagens ópticas e as vantagens da utilização de técnicas de processamento de imagem na análise dos padrões de interferência são também descritas com apresentação de alguns resultados experimentais. Por último descreve-se a utilização destas técnicas na análise não destrutiva de materiais compósitos para detecção de descolamentos internos provocados por impactos na superfície.

1 - INTRODUÇÃO

A palavra Holografia (do grego "holos", o todo) foi proposta por Gabor em 1948 para designar uma técnica que permite gravar e reconstruir toda a informação presente numa frente de onda. Nesta técnica são utilizados fenómenos de interferência entre frentes de onda coerentes para converter a distribuição espacial de fase numa frente de onda em variações de amplitude e assim poder efectuar o seu registo em detectores quadráticos. Tendo sido desenvolvida para aumentar a resolução do microscópio electrónico, à custa da gravação e reconstrução com diferentes radiações, esta técnica não despertou inicialmente grande curiosidade entre a comunidade científica. O reduzido comprimento de coerência das fontes de luz e a baixa resolução dos meios de registo então utilizados apenas permitia realizar hologramas em linha e com baixo contraste de objectos transparentes. Com a descoberta das fontes de emissão estimulada de luz, vulgarmente designada por *laser*, com comprimentos de coerência que podem

ir desde alguns centímetros até várias centenas de metros, foi possível retomar a investigação nesta técnica tendo Leith e Upatnieks obtido no início da década de sessenta o primeiro holograma de um objecto opaco. O elevado contraste das imagens obtidas a partir dos hologramas gravados por estes investigadores produziu grande impacto na comunidade científica que, apercebendo-se das potencialidades da Holografia, agraciou Gabor com o prémio Nobel da Física em 1971.

As características de tridimensionalidade das imagens reconstruídas com os hologramas, paralaxe e profundidade de campo em tudo idênticas às da cena gravada, permitem obter imagens espectaculares, que muito contribuíram para o grande interesse manifestado em torno desta técnica. Contudo, são as suas aplicações à Metrologia aquelas que serão abordadas ao longo deste artigo. Embora a utilização da interferometria óptica em Metrologia seja anterior à descoberta de Gabor, a possibilidade de com a Holografia

reconstruir pelo menos um dos braços do interferómetro, o que constitui a técnica designada por interferometria holográfica, veio alargar a sua gama de aplicação. Na interferometria holográfica, alterações verificadas num objecto são medidas comparando-o com ele próprio numa situação diferente sem necessitar de superfícies de referência que, dada a resolução da medida, teriam necessariamente um rigoroso controlo dimensional. Desta forma podem ser analisadas superfícies difusas sem qualquer preparação prévia. O ruído óptico introduzido por difracção da luz coerente em poeiras ou riscos nos componentes ópticos, desde que permaneça constante, tem pouca influência no resultado da medição. A elevada resolução das medidas, da ordem do comprimento de onda da radiação *laser* utilizada, a ausência de contacto com as superfícies a medir e o carácter global da medida são outras características destas técnicas que se revelam de grande utilidade em Metrologia.

Após as primeiras aplicações das técnicas de interferometria holográfica na análise de vibrações (Powell *et al*, 1965) e na determinação da deformação de objectos (Haines *et al*, 1966) seguiu-se um período de investigação intensa e fértil de que resultou um grande número de publicações descrevendo a aplicação destas técnicas aos mais variados tipos de problemas. Contudo, a sua divulgação entre a comunidade científica não foi acompanhada pela construção de sistemas compactos de fácil utilização que permitissem a aplicação destas técnicas por operadores menos qualificados fora dos ambientes laboratoriais. Sendo o registo dos hologramas normalmente efectuado em emulsões fotográficas a sua gravação implicava processos químicos de revelação algo morosos e pouco ajustados à sua automatização.

No início da década de setenta Butters e Leendertz apresentaram uma montagem holográfica com registo electrónico dos

padrões de interferência. Ao substituir um meio de registo de elevada resolução (as emulsões podem registar até 5000 linhas/mm) pelo alvo de uma câmara vídeo (resolução de aproximadamente 50 linhas/mm), técnica que designaram por ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*), estes investigadores aumentaram grandemente as potencialidades das técnicas de interferometria holográfica. Evitando o processo de revelação e a necessidade de reposicionamento dos hologramas facilitou-se a utilização destas técnicas ao mesmo tempo que se tornou possível registar 25 hologramas em cada segundo (frequência de *video*). O desenvolvimento subsequente dos computadores e do *hardware* dedicado ao processamento de imagem veio permitir construir sistemas interferométricos compactos, com possibilidade de controlo automático por computador.

Trabalhos recentes provam também que é possível registar e reconstruir hologramas de Fresnel em suporte electrónico (Schnars, 1994), (Chousal, 1995) sem recorrer à montagem proposta por Butters e Leendertz, onde o controlo da abertura do sistema formador de imagem e o alinhamento dos dois feixes permite ajustar o padrão de *speckle* à resolução do detector fotossensível. Montagens holográficas em tudo idênticas às propostas por Leith e Upatnieks, em que a emulsão fotográfica é substituída pela superfície do detector *video*, podem ser utilizadas na gravação de hologramas, sendo a sua reconstrução efectuada numericamente por cálculo da transformada de Fourier do padrão de interferência. A descrição desta técnica não será feita neste artigo já que é apresentada num outro trabalho publicado também neste jornal.

A construção de sistemas compactos baseados nas técnicas de interferometria holográfica tem permitido alargar o domínio de aplicação destas técnicas, como é por exemplo o caso da análise não destrutiva de materiais compósitos. Uma destas técnicas

consiste na utilização de um interferómetro, baseado na montagem proposta por Michelson, que é vulgarmente designada por *Shearography*. Esta montagem óptica tem vindo a ser adoptada para detecção de descolamentos internos verificados em materiais compósitos laminados por acção de impactos na sua superfície.

2 - REGISTO ELECTRÓNICO DOS PADRÕES DE INTERFERÊNCIA

Ao iluminar uma superfície difusa por uma radiação luminosa coerente obtém-se um campo de luz de aspecto granular e amplitude aleatória normalmente designado por *speckle* objectivo. Formando a imagem deste padrão luminoso através de um sistema óptico obtém-se outro padrão, *speckle* subjectivo, cujo tamanho médio dos grãos depende da abertura do sistema óptico utilizado de acordo com a seguinte relação (Goodman, 1984):

$$\sigma = 1,22 \frac{\lambda}{AN_{lente}} \quad (1)$$

onde AN_{lente} é a abertura numérica da lente e λ representa o comprimento de onda da radiação coerente utilizada.

Se um padrão de *speckle* proveniente de uma superfície difusa, feixe objecto, for sobreposto numa frente de onda coerente, feixe de referência, verificar-se-ão fenómenos de interferência, franjas primárias, que, por um processo em tudo idêntico ao verificado na Holografia, permitem registar a sua distribuição espacial de fase. Utilizando um sistema formador de imagem com abertura devidamente ajustada e uma montagem em que o ângulo entre ambos os feixes, objecto e de referência, não exceda 1° (Løkberg, 1987) é possível obter padrões de interferência cuja frequência espacial pode ser completamente resolvida por detectores ópticos de resolução inferior à das emulsões fotográficas. Desta forma é possível utilizar o alvo de uma câmara *video*, cuja resolução

não ultrapassa as 50 linhas/mm, para registar um holograma, com a vantagem adicional de poder registar um em cada 40 ms. Os padrões de interferência, franjas secundárias, resultam da correlação de padrões de *speckle* provenientes da superfície do objecto e obtidos para diferentes situações de carregamento. A correlação por adição, primeira a ser utilizada, necessita de tratamento electrónico do sinal para remoção dos termos de baixa frequência que não contribuem para o padrão de interferência. O sinal é ainda rectificado para que toda a modulação possa ser representada em *video*. Contudo, o aparecimento das placas de aquisição e processamento efectuando subtracções de imagem com rectificação permitem efectuar a correlação por subtracção evitando a filtragem electrónica do sinal *video*. Os padrões de interferência obtidos apresentam franjas que caracterizam pontos de igual deslocamento. A resolução da medida é de $\lambda/2$, sendo λ o comprimento de onda da luz.

Uma outra forma de correlação de grande utilidade é obtida quando se regista o padrão de *speckle* de um objecto vibrando sinusoidalmente numa das suas frequências naturais. Designada por correlação em *time average*, esta técnica permite, se o objecto vibrar a uma frequência superior à frequência *video*, obter a média temporal dos registos de *speckle* das várias posições ocupadas pelo objecto durante o seu movimento. O padrão de interferência obtido descreve a distribuição espacial da amplitude de vibração do objecto modulada pela função de Bessel de ordem 0 (Løkberg, 1987)

Os detectores de imagem *video* podem ainda ser utilizados para registar hologramas de Fresnel (Chousal, 1996). Neste caso as dimensões do objecto e a orientação dos feixes deverão ser controlados no sentido de obter um padrão de interferência com uma frequência espacial compatível com a resolução do detector. Sendo o holograma registado sem recorrer a qualquer lente

formadora de imagem a sua reconstrução é obtida por cálculo numérico.

3 - ESPI

O primeiro sistema holográfico com registo electrónico dos padrões de interferência foi apresentado por Butters e Leendertz com a designação de ESPI. Esta técnica é hoje apresentada sob diversas designações tais como: Holografia-TV, Holografia electro-

modulação de fase permite calcular numericamente a distribuição espacial de fase dos interferogramas. Com estas técnicas, designadas por quasi-heterodinas, é facilitado o tratamento da informação resultante das medições e aumentada a resolução da medida de aproximadamente uma ordem de grandeza (Dändliker, *et al* 1985)).

Actualmente, com o aparecimento dos detectores de CCD de reduzidas dimensões

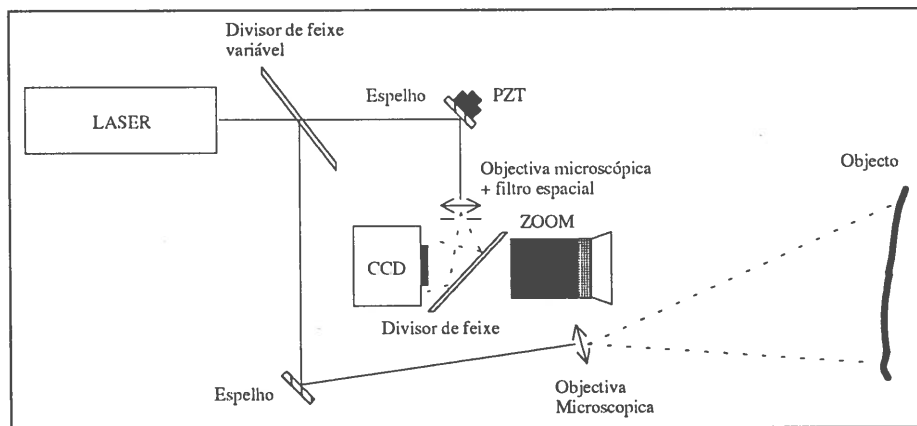


Figura 1 Diagrama esquemático de uma montagem de ESPI convencional.

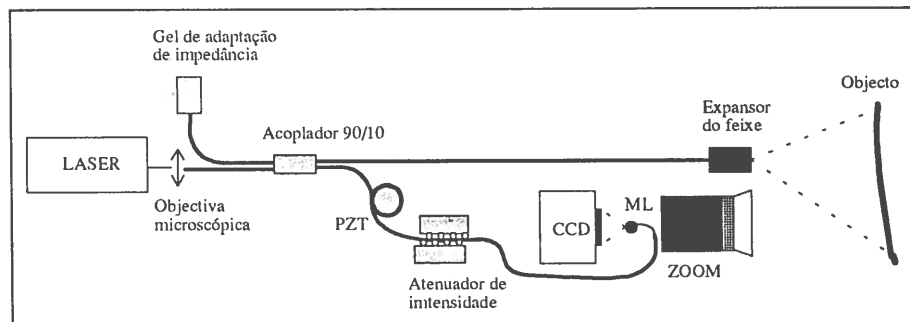


Figura 2 Diagrama esquemático de um sistema de ESPI realizado com fibras ópticas.

ótica ou ainda DSPI (Digital Speckle Pattern Interferometry). Na figura 1 representa-se uma montagem convencional de ESPI. A inclusão de um modulador de fase no feixe de referência, materializado por um espelho que pode ser deslocado variando a tensão aplicada a um cristal piezoeléctrico, permite variar a fase entre ambos os feixes independentemente da deformação do objecto. A utilização de técnicas de processamento de imagem com

e a vulgarização das fibras ópticas com preservação de polarização é possível miniaturizar as montagens e construir sistemas compactos com controlo por computador. Na figura 2 apresenta-se esquematicamente o protótipo de um sistema de ESPI que tem vindo a ser desenvolvido no Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME) do INEGI (Monteiro, 1996).

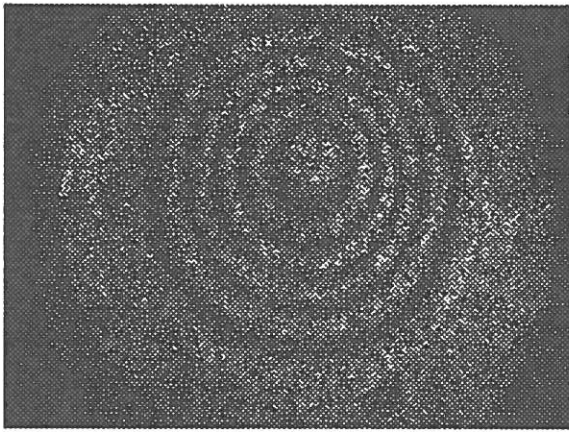


Figura 3 Padrão de interferência obtido por ESPI com correlação por subtração.

A utilização de fibras ópticas no encaminhamento dos feixes permite obter um modulador de fase enrolando a fibra em torno de um cristal piezoelétrico cilíndrico. O controlo de intensidade do feixe de referência é obtido através da indução de microcurvaturas ao longo de um troço da fibra. As figuras 3 e 4 representam padrões de interferência obtidos com este sistema. A figura 3 corresponde à deformada de uma placa circular encastrada em todo o seu perímetro e submetida a uma carga concentrada no seu centro. A figura 4 foi obtida em *time average* quando a mesma placa vibrava harmonicamente com uma frequência de 2 kHz.

Uma característica importante das montagens ópticas utilizadas em interferometria é o seu vector sensibilidade que normalmente está orientado segundo uma direcção que é a bissetriz do ângulo formado entre a direcção de iluminação e a direcção do eixo óptico do sistema. Sendo o feixe de iluminação proveniente de um ponto próximo da lente formadora de imagem obtém-se um sistema cuja máxima sensibilidade se situa na direcção perpendicular ao plano. Variando a geometria da montagem óptica é possível variar a sua direcção de máxima sensibilidade. Contudo, quando se pretendem efectuar medições de deslocamentos no plano é aconselhável recorrer a outro tipo de montagens ópticas envolvendo dupla direcção de iluminação ou

dupla direcção de observação. Estas montagens foram propostas por (Ennos, 1968) e utilizam a interferência entre dois padrões de *speckle* para registar a fase em vez da interferência com um feixe de referência especular. Por esta razão alguns autores designam os sistemas de ESPI convencionais por interferómetros de referência especular enquanto estes últimos são designados por interferómetros com referência de *speckle*. Uma das montagens mais utilizadas na medição de deslocamentos no plano consiste na iluminação da superfície com dois feixes provenientes do mesmo *laser* que fazem igual ângulo com a sua normal. A interferência entre ambos os padrões de *speckle* obtidos dispensa a utilização de um feixe de referência especular. No caso de ambos os feixes serem colimados esta montagem é apenas sensível a deslocamentos no plano.

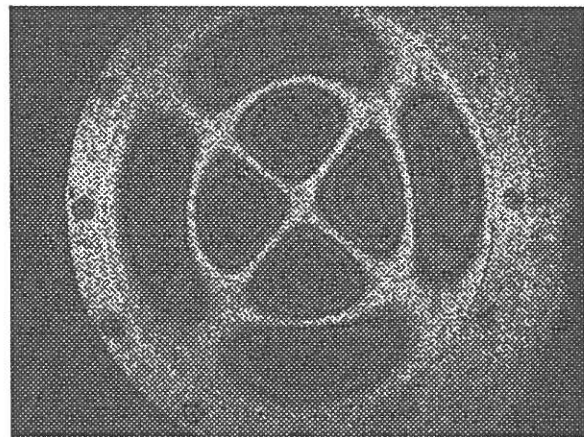


Figura 4 Padrão de interferência obtido por ESPI com correlação por *time average*

4 - SHEAROGRAPHY

A crescente utilização de materiais compósitos, principalmente em indústrias como a aeroespacial e de aeronautica onde são necessárias elevadas relações resistência mecânica/peso, aumentou a necessidade de dispôr de técnicas de análise não destrutiva que permitam avaliar integridade das estruturas construídas nestes materiais. As técnicas de interferometria holográfica encontram-se bem adaptadas a esta função desde que o defeito, embora sendo interior,

se manifeste na deformação da superfície. Tratando-se de técnicas de campo permitem detectar com facilidade os gradientes de deslocamento normalmente associados a alterações estruturais devidas à presença de defeitos. Contudo, a grande resolução destas técnicas implica também uma grande sensibilidade a perturbações exteriores que alterem diferentemente os braços do interferómetro.

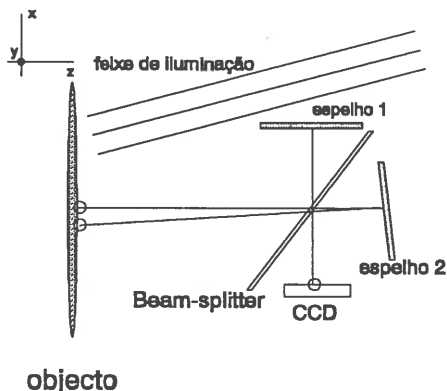


Figura 5. Representação esquemática do interferómetro usado em *Shearography*

Um dos interferómetros que melhor se adapta à análise não destrutiva de materiais compósitos é o interferómetro com referência de *speckle* proposto por Leendertz (Leendertz *et al*, 1973). Baseado na configuração de Michelson, este interferómetro possui algumas particularidades que o recomendam para esta aplicação. Utilizando uma montagem simples em que ambos os feixes percorrem aproximadamente o mesmo caminho, este interferómetro é menos sensível a perturbações. Como os braços do interferómetro são constituídos pelo mesmo padrão de *speckle* desfazado lateralmente, esta montagem é apenas sensível a gradientes de deslocamento na direcção normal ao plano. Esta última característica revela-se de grande utilidade pois uma grande parte dos defeitos em materiais compósitos é revelada pelo aparecimento de gradientes localizados na superfície externa. Na figura 5 está representada esquematicamente a montagem básica utilizada em *Shearography*.

Nesta montagem, a rotação de um dos espelhos em torno de dois eixos perpendiculares permite orientar a direcção do desfazamento (*Shear*) e variar o seu valor. A montagem do outro espelho sobre um cristal piezoeléctrico permite utilizar as técnicas de modulação de fase para o cálculo numérico da distribuição espacial de fase do padrão de interferência. Sendo esta técnica vocacionada para a detecção de gradientes é fundamental que as placas a ensaiar sejam carregadas por forma a obter deslocamentos localizados nas zonas onde existam defeitos estruturais. Dos carregamentos utilizados, variação de pressão e variação de temperatura, é o segundo aquele que se revela de mais fácil utilização e conduz a melhores resultados. Um aquecimento superficial induzindo uma variação de temperatura de 1 a 2 graus permite, dada a diferença de conductibilidade introduzida pelo defeito criar gradientes de deslocamento compatíveis com a resolução do método. Na figura 6 representa-se um padrão obtido para um defeito circular com *Shear* na horizontal.

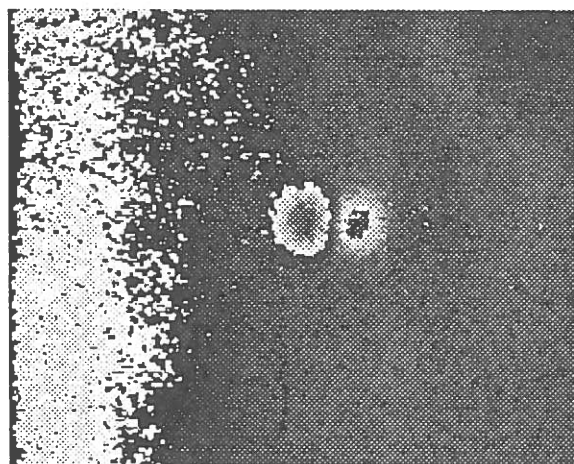


Figura 6 Padrão de interferência obtido com *Shearography* característico de um defeito circular provocado por um impacto.

Esta técnica tem vindo a ser utilizada no LOME para detecção de defeitos em componentes construídos em materiais compósitos provenientes da indústria aeronáutica, como se mostra na figura 7 (Gomes, 1995). Partes estruturais fabricadas

em vários materiais, possuindo defeitos provocados por impactos de projecteis sobre a sua superfície ou introduzidos artificialmente durante o processo de fabrico, foram ensaiadas com sucesso. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados de ensaios por ultrassons (C-Scan) tendo-se verificado que a capacidade de detecção de ambas as técnicas é aproximadamente equivalente quando se trata de componentes do tipo placa ou casca, isto é, de reduzida espessura comparada com as outras dimensões. Das várias placas ensaiadas todos os defeitos com áreas superiores a 5 cm² foram efectivamente detectados enquanto dos defeitos com áreas inferiores só 71 % foram revelados (Santos, 1996).

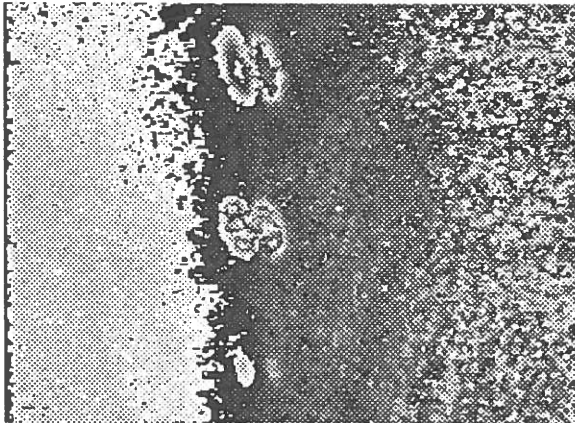


Figura 7 Detecção de três defeitos provocados por impactos na superfície de um componente pertencente à cauda de um helicóptero Super Puma.

5 - TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM

A divulgação dos sistemas de processamento de imagem montados directamente sobre os barramentos dos computadores pessoais permitiu aplicar as técnicas de processamento de imagem à interferometria holográfica. Desta forma, a utilização do processamento de imagem na análise dos padrões de interferência, veio permitir tratar de forma expedita a grande quantidade de informação recolhida em cada medição. Recorrendo à utilização simultânea de sistemas moduladores de fase e do processamento numérico da imagem é

possível obter com estas técnicas medições quantitativas com uma resolução da ordem de $\lambda/100$, em que λ é o comprimento de onda da radiação *laser* utilizada. Os resultados obtidos com estas técnicas apresentam-se sob a forma de ficheiros numéricos que podem ser processados posteriormente. Esta característica é de grande importância quando estas técnicas experimentais são utilizadas em combinação com métodos numéricos com transferência de informação entre ambos, técnicas designadas por híbridas (Vaz, 1995).

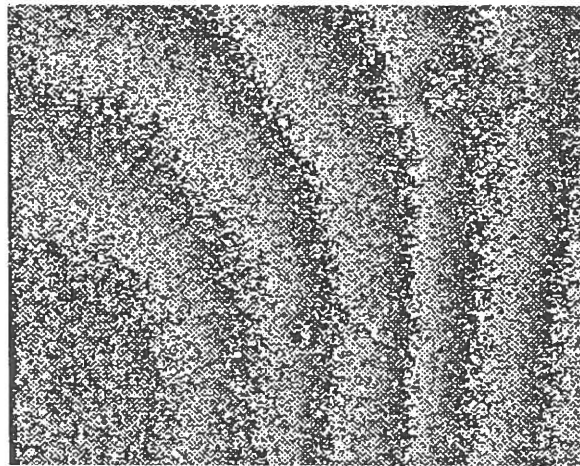


Figura 8 Mapa de fase obtido por Shearography com modulação de fase.

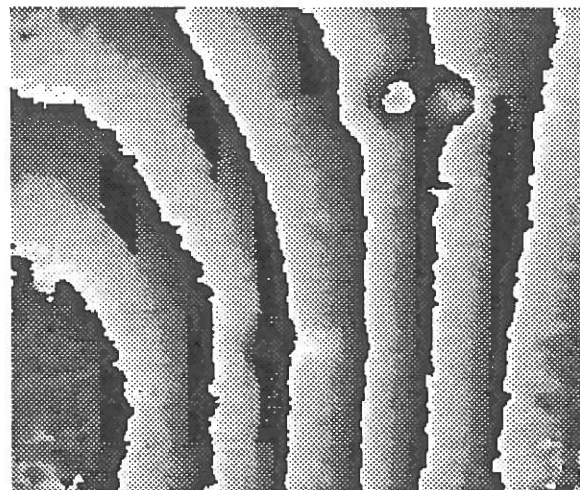


Figura 9 Mapa de fase obtido da figura 8 após filtragem passa-baixo.

Na figura 8 representa-se um mapa de fase obtido com *Shearography* com modulação de fase. O ruído de alta frequência presente na imagem resulta de grãos de *speckle* onde é nula a modulação induzida pelo

carregamento. Na figura 9 representa-se o padrão da figura anterior após ter sido filtrado para remoção do ruído. As descontinuidades do mapa de fase são devidas ao processo de cálculo que envolve a determinação de um arco tangente. Processamento subsequente, designado por desembrulhar da fase, permite eliminar essas descontinuidades e obter uma distribuição espacial de fase de variação contínua, como se encontra representado na figura 10. A partir deste mapa de fase é possível construir representações tridimensionais dos deslocamentos, no caso do ESPI, ou dos gradientes de deslocamento, no caso da *Shearography*, na figura 11 pode observar-se uma destas representações.

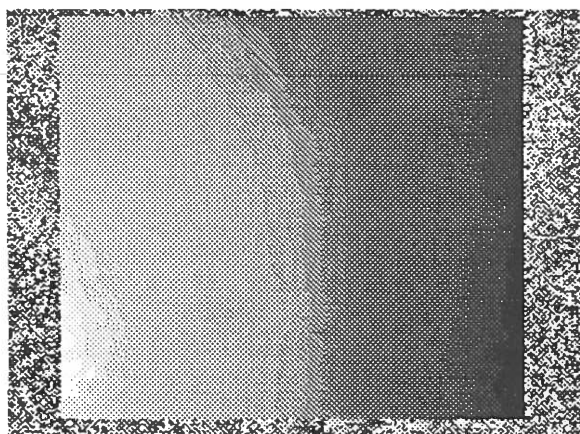


Figura 10 Mapa de fase após eliminação das descontinuidades

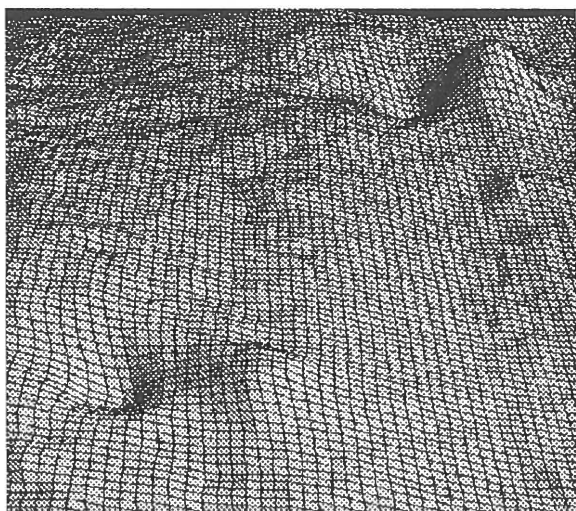


Figura 11 Representação tridimensional da distribuição espacial do gradiente de deslocamentos obtido a partir da figura 10

6 - CONCLUSÕES

As técnicas de interferometria holográfica revelam-se de grande utilidade na análise estrutural. O carácter global da medida, realizada sem preparação prévia das superfícies e sem necessidade de contacto com estas, permite facilmente identificar gradientes localizados de deslocamentos a que correspondem tensões mais elevadas.

A substituição das emulsões fotográficas pelos detectores video no registo dos padrões de interferência evita o moroso processo de revelação pelo que facilita a utilização destas técnicas. O sinal *video* obtido neste tipo de registo pode ser gravado na memória de um computador pessoal e processado numericamente utilizando sistemas de processamento de imagem. A utilização de sistemas de processamento de imagem e técnicas de modulação de fase permite obter, a partir dos padrões de interferência, medições quantitativas cuja resolução pode ir até 0,01 do comprimento de onda da radiação laser utilizada.

As técnicas de interferometria holográfica podem ainda ser utilizadas para construir sistemas compactos, portáteis e controlados por computador que constituem ferramentas úteis para análise estrutural.

Um exemplo da construção de um sistema compacto que permite utilizar estas técnicas em análise não destrutiva de componentes construídos em materiais compósitos é ainda apresentado. A comparação dos resultados obtidos com este sistema com resultados provenientes de medições com ultrassons provaram a sua utilidade na análise de componentes do tipo placa ou casca onde a espessura é muito menor que qualquer das outras dimensões. Níveis de detecção de 100% foram alcançados na detecção de defeitos com áreas superiores a 5 cm².

REFERÊNCIAS

- Gabor, D.; “A New Microscopic Principle”, *Nature*, Vol. 161, nº 4098, pág. 777-778, 1948.
- Leith, E. N.; Upatnieks, J.; “Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects”, *Journal of Optical Society of America*, Vol. 54, nº 11, pág. 1295-1301, 1964.
- Powell, R. L.; Stetson, K. A.; “Interferometric Vibration Analysis by Wavefront Reconstruction”, *Journal of Optical Society of America*, Vol 55, nº 12, pág. 1593-1598, 1965.
- Haines, K. A.; Hildebrand, B. P.; “Surface Deformation Measurement Using the Wavefront Reconstruction Technique”, *Applied Optics*, Vol. 5, nº 4, pág. 595-602, 1966.
- Butters, J. N.; Leendertz, J. A.; “Speckle Pattern and Holographic Techniques in Engineering Metrology”, *Optics and Lasers Technology*, pág. 26-30, 1971.
- Schnars, U.; Jüptner, W.; “Direct Recording of Holograms by a CCD Target and Numerical Reconstruction”, *Applied Optics*, Vol. 33, nº 2, pág. 179-181, 1994.
- Chousal, J. A.; Vaz, M. A. ; Gomes, J. F. ; “ Interferometria holográfica com utilização de registo electrónico em CCD”, *Anais do COBEM-CIDIM*, Belo Horizonte, Brasil, 1995.
- Goodman, J. W.; “Laser Speckle and Related Phenomena”, (ed. Dainty, J. C.), *Topics in Applied Physics*, Vol. 9, pág. 9-75, Springer-Verlag, New York, 1984.
- Løkberg, O. J.; Slettemoen, G. A.; “Basic Electronic Speckle Pattern Interferometry”, *Applied Optics and Optic Engineering*, Vol. X, Academic Press Inc., (Ed. Shannon, R. R. et al), pág. 455-504, 1987.
- Dändliker, R.; Thalmann, R.; “Heterodyne and Quasi-Heterodyne Holographic Interferometry”, *Optical Engineering*, Vol. 24, nº 5, pág. 824-831, 1985.
- Monteiro, J. M.; Chousal, J. A., *et al* , “A miniaturized Electronic Speckle Pattern Interferometer”, Proc. do Congresso “*Mechanics in Design*”, CSME Forum 96, Ontário, Canadá, 1996.
- Hennos, A. E.; “Measurement of in-Plane Surface Strain by Hologram Interferometry”, *Journal of Sci. Instruments*, *Journal of Physics E*, serie 2, Vol. 1, pág. 731-734, 1968.
- Santos, F. M.; LOME/INEGI, Relatório interno, 1996
- Vaz, M. A.; “Interferometria Laser e Métodos Híbridos em Mecânica Experimental”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1995.
- Gomes, J. F. S: *et al*, Relatório EUCLID-CEPA 3-RTP 3.1-EUC-DOC-2332-01-INEGI, 1995.

