



# CIBEM10

**X Congresso Ibero-Americano  
em Engenharia Mecânica**

4 a 7 de Setembro de 2011

Porto - Portugal

# CIBIM10

**X Congreso Iberoamericano  
de Ingeniería Mecánica**

4 a 7 de Septiembre de 2011

Oporto - Portugal

---

**Editores**

*Renato Natal Jorge*

*José Luis Alexandre*

*João Manuel R. S. Tavares*

*António Ferreira*

*Mário Vaz*

# Resumos

Actas do  
X Congresso Ibero-americano em  
Engenharia Mecânica - CIBEM10

Porto, Portugal  
4-7 de Setembro de 2011

## ÍNDICE

Prefácio .....	XIII
<b>A. Ciências Aplicadas</b>	
1. Métodos numéricos - Mecânica Computacional e Simulação .....	1
2. Mecânica geral - Mecânica Experimental .....	45
3. Vibrações mecânicas e acústica .....	63
5. Mecânica de fluidos .....	81
6. Termotecnia - termodinâmica .....	121
7. Energia - Energia Eólica - Energia Solar .....	151
8. Sistemas de Representação - CAD - Interfaces e Visualização - Processamento e Análise de Imagem .....	197
9. Estruturas .....	203
10. Mecatrônica - Electromecânica - Robótica .....	209
11. Instrumentação .....	221
12. Materiais e Metalurgia .....	225
13. Tribologia .....	289
14. Biomecânica - Mecanobiologia - Bioengenharia .....	303
<b>B. Desenho e Concepção de Máquinas e Componentes</b>	
15. Sínteses e análises de mecanismos - Desenvolvimento do Produto .....	345
16. Veículos automóvel .....	357
17. Maquinário de transporte .....	387
18. Máquinas ferramenta .....	393
19. Desenho de elementos de máquina .....	401
20. Outras máquinas .....	413
<b>C. Fabricação de Componentes e Máquinas</b>	
21. Processos de fabricação .....	421
22. Planejamento e controle da fabricação .....	467
23. Produção industrial - Gestão de Produção .....	471

24. <i>Fabricação automatizada (CAM)</i> .....	479
25. <i>Controle de Qualidade</i> .....	483
26. <i>Ensaio e verificações</i> .....	491
27. <i>Metrologia</i> .....	507
<b>D. Exploração de Máquina</b>	
28. <i>Manutenção</i> .....	519
29. <i>Aspectos ambientais</i> .....	527
30. <i>Reacondicionamento</i> .....	535
<b>E. Métodos e Técnicas para a Formação em Engenharia</b>	
31. <i>Formação</i> .....	539

Ficha Técnica

*Título:* **Actas do X Congresso Ibero-americano em Engenharia Mecânica - CIBEM10**

*Editado por:* R.M. Natal Jorge; João Manuel R.S. Tavares; José Luis Alexandre; António JM Ferreira; Mário Vaz  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

*Data:* Agosto 2011

*Execução gráfica:* Tipografia Nunes Lda - Maia

*Depósito Legal:* 332096/11

*ISBN:* 978-989-96276-2-8

## **Agradecimentos**

Os organizadores do CIBEM 10 agradecem às seguintes Instituições o apoio recebido:

- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)
- Universidade do Porto (UP)
- Instituto de Engenharia Mecânica – Pólo FEUP (IDMEC-Polo FEUP)
- Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI)
- Federação Ibero-americana de Engenharia Mecânica (FeIbEM)

## PREFÁCIO

A presente publicação contém os resumos dos artigos seleccionados para apresentação pelo Comité Científico do X Congresso Ibero-americano em Engenharia Mecânica (CIBEM 10), que teve lugar na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto, Portugal, entre os dias 4 e 7 de Setembro de 2011.

O CIBEM 10 foi uma organização conjunta entre a FEUP, o Instituto de Engenharia Mecânica, o Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial e a Federação Ibero-americana de Engenharia Mecânica. O evento contou com mais de 700 resumos submetidos, dos quais, cerca de 500 foram seleccionados para submissão de artigo completo e apresentação de comunicação, 350 segundo apresentação oral e 150 segundo apresentação na forma de poster.

Por áreas científicas, verificou-se a apresentação de 41 comunicações na área dos métodos numéricos e mecânica computacional, 27 na mecânica geral e experimental, 26 na área das vibrações, 52 na área da mecânica de fluidos e 34 em termotecnica e termodinâmica, 65 na área da energia, 7 comunicações relativas à modelação CAD, visualização processamento e análise de imagem, 6 na área das estruturas, 22 na mecatrónica, 4 na área da instrumentação, 77 relativos à área dos materiais, 17 na tribologia, 48 na biomecânica, 8 na área do desenvolvimento de produto, 33 na área automóvel, 3 em sistema mecânicos de transporte, 18 em máquina ferramentas e desenho de máquinas, 72 na área do fabrico e produção, 24 em ensaios e verificações, 13 em metrologia, 10 em aspectos relacionados com o ambiente e 27 em ensino e formação. As contribuições foram provenientes de autores de 17 países: Argentina, Brasil, Chile, Colômbia, Cuba, Equador, Espanha, França, Guatemala, Itália, México, Nicarágua, Noruega, Perú, Portugal, Estados Unidos da América e Venezuela.

A Comissão Organizadora agradece à Federação Ibero-americana a oportunidade para organizar o CIBEM 10, a todos os palestrantes convidados e a moderadores de sessões, bem como a todos os membros do Comité Científico. Por fim, um especial agradecimento a todos os autores por partilharem os seus desenvolvimentos e experiências e aos participantes que fizeram do CIBEM 10 um fórum privilegiado em temas centrados na Engenharia Mecânica.

Porto, 5 de Setembro de 2011

A Comissão Organizadora

ISBN: 978-989-96716-2-8

**U. PORTO**  
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO



**CIBEM10**

X Congresso Ibero-Americano  
em Engenharia Mecânica  
4 a 7 de Setembro de 2011  
Porto - Portugal

**CIBIM10**

X Congreso Iberoamericano  
de Ingeniería Mecánica  
4 a 7 de Septiembre de 2011  
Oporto - Portugal

## MEDIÇÃO DO CAMPO DE DEFORMAÇÕES POR SHEAROGRAFIA SPECKLE

**H. Lopes<sup>1\*</sup>, J. E. Ribeiro<sup>1†</sup>, J. Monteiro<sup>2\*</sup>, D. Gonçalves<sup>2†</sup>, M.A.P. Vaz<sup>3</sup>**

1-Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia, Bragança, Portugal, email: {<sup>†</sup>hlopes, <sup>†</sup>jribeiro}@ipb.pt

2-Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Rua Dr. Roberto Frias, Porto, Portugal, email: {<sup>†</sup>jmont, <sup>†</sup>dgoncalves}@inegi.up.pt

3-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, Porto, Portugal, email: gmavaz@fe.up.pt

**Palavras chave:** Campo de deformação, Shearografia Speckle, Ruído de Speckle, Simulação numérica

### Resumo

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de um sistema interferométrico para medição do campo de deformações no plano a partir da técnica de Shearografia Speckle com dupla iluminação. No sentido de definir o procedimento e otimizar todo o processo de medição, foi desenvolvido um modelo matemático representativo da interferência das frentes de onda proveniente do objecto, sendo analisados os parâmetros que influenciam a qualidade dos resultados, tais como: o ângulo de iluminação, o passo da derivada, a amplitude de deformação e o ruído de Speckle. A partir dos dados recolhidos foi construído um sistema de Shearografia Speckle baseado no interferómetro de Michelson e que utiliza a técnica de modulação temporal de fase, criado pela translação de um dos espelhos por actuação de um piezoeléctrico. O sistema foi utilizado na medição das deformações no plano de um provete submetido à tracção. A sensibilidade do sistema e a qualidade das medições são analisadas, tendo como referência as soluções numéricas obtidas por elementos finitos.

## 1. Introdução

A medição dos campos de deformações em estruturas é um problema clássico e de grande interesse para mecânica experimental. A partir destes campos é possível analisar a distribuição de tensões ao longo da superfície e, assim, identificar as regiões mais solicitadas. Ao nível do dano estrutural, a análise da concentração de deformações serve para identificar debilidades em estruturas e prevenir falhas de componentes mecânicos. A Sherografia Speckle é uma técnica interferométrica de medição de campo, sem contacto, de elevada resolução e que permite medir directamente o gradiente dos deslocamentos numa direcção pré-definida [1]. A elevada sensibilidade e robustez a perturbações exteriores torna esta técnica ideal na detecção de danos internos em laminados compósitos [2-3].

A técnica de Sherografia Speckle também pode ser usada para medir indirectamente o campo de deformações no plano [4-7]. Neste caso, é necessário realizar dupla medição do gradiente do campo para dois vectores sensibilidade, com a mesma direcção mas de sentido oposto, entre diferentes estados de carregamento. Estes são posteriormente combinados numericamente para se obter o gradiente do campo de deslocamentos no plano. Contudo, a qualidade dos resultados obtidos através deste sistema depende fortemente do grau de alinhamento do interferómetro óptico e do nível de ruído de Speckle presente nas medições [1]. O ruído resulta da des correlação do Speckle que ocorre para grandes movimentos de corpo rígido e para ângulos de iluminação elevados em relação à perpendicular ao plano de medição. Neste trabalho apresenta-se a medição do campo de deformações com a técnica de Shearografia Speckle, tendo por base a configuração do interferómetro de Michelson e utilizando a técnica de modulação temporal de fase. Um modelo numérico representativo deste sistema foi desenvolvido com o intuito de estudar a influência dos parâmetros mais importante na qualidade dos resultados obtidos. Com base neste modelo foi desenvolvido o sistema de Shearografia Speckle e definido o procedimento de medição.

Finalmente, o campo de deformações de um provete à tracção é medido utilizando o sistema de medição e seguindo metodologia proposta, realizando-se uma análise comparativa entre as medições experimentais e os resultados obtidos pelo métodos dos elementos finitos.

## 2. Medição do gradiente do campo de deslocamentos

A técnica de Shearografia Speckle permite a medição directa do gradiente do campo de deslocamentos de uma superfície entre dois estados de carregamento. Este pode ser aproximado à primeira derivada do campo de deslocamento para intervalos suficientemente pequenos de diferenciação. Nas medições de fenómenos estáticos, quase estáticos ou periódicos é usado o interferómetro Shearografia do tipo Michelson e a técnica de modulação temporal de fase, através da translação de um dos espelhos por actuação de um piezoeléctrico, o qual permite o aumento da resolução espacial da fase do interferograma, Figura 1.

A partir da difracção da luz Laser numa superfície rugosa e difusa resultam padrões de Speckle com a forma de grão, contendo informação de fase. A frente de onda reflectida pela superfície do objecto é dividida pelo divisor de feixe em duas frentes de onda e, por ligeira rotação de um dos espelhos, estas são espacialmente desviadas do intervalo de  $\delta x$  para criar o fenómeno de interferência, Figura 1. O vector sensibilidade  $VS$  é definido como ângulo médio  $\frac{\theta}{2}$  entre os vectores de iluminação e o de observação, podendo ser controlado por através da orientação da iluminação Laser. Pelo facto dos braços do interferómetro apresentarem comprimentos muito próximos, permite usar Laser com baixo comprimento de coerência.

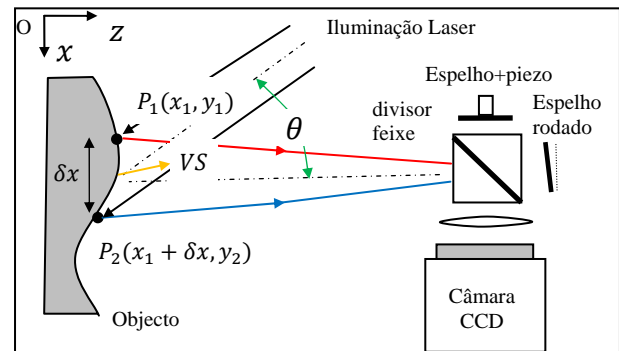


Figura 1-: Interferómetro Michelson com aplicação da técnica de modulação temporal de fase usado na medição do gradiente dos deslocamentos.

A fase da interferência é determinada por aplicação da técnica de modulação temporal de fase, sendo a fase entre as duas frentes de onda desfasadas de certa quantidade por translação de um dos espelhos e controlada por actuação de um piezoeléctrico. O método de registo de quatro imagens com salto constante de fase de  $\pi/2$  é normalmente o mais utilizado no cálculo da fase, por este requerer apenas quatro registos em cada estado de carregamento e pela robustez aos erros de linearidade do salto de fase. A partir da correlação dos mapas de fase entre diferentes estados de carregamento é extraído o mapa de fase correspondente ao gradiente dos deslocamentos ocorrido na superfície do objecto. Por fim, o campo contínuo do gradiente dos deslocamentos é calculado através da filtragem do ruído de fase e depois de removidas as descontinuidades no mapa de fase, sendo utilizadas neste processo técnicas dedicadas de processamento de imagem [8-11]. Em geral, o campo de deslocamentos de uma superfície pode ser representado num sistema de coordenadas cartesianas pelos vectores  $\vec{u}(x,y)$ ,  $\vec{v}(x,y)$  e  $\vec{w}(x,y)$ , os quais representam o campo de deslocamentos nas direcções  $Ox$ ,  $Oy$  e  $Oz$ , respectivamente. Assim, a variação relativa da fase  $\Delta_{xx}$  correspondente ao gradiente do campo dos deslocamentos ocorrido na superfície na direcção do vector sensibilidade  $VS$  e para um intervalo de diferenciação  $\delta x$  na direcção  $Ox$ , pode ser determinado através expressão seguinte [7]:

$$\Delta_{xx} = \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[ \sin(\theta) \frac{\partial u(x,y)}{\partial x} + (1 + \cos(\theta)) \frac{\partial w(x,y)}{\partial x} \right] \quad (1)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento da luz Laser usada na iluminação,  $\frac{du}{dx}$  e  $\frac{dw}{dx}$  representam, respectivamente, o gradiente dos deslocamento na direcção  $x$  e  $z$ .

### 3. Medição do campo de deformações no plano

A deformação de um corpo material ocorre quando é submetido a solicitações externas. Esta representa a variação relativa do comprimento de um segmento do corpo numa direcção. Para o conjunto das três direcções cartesianas obtêm-se seis componentes cartesianas da deformação que são agrupadas numa matriz, designada das deformações:

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \varepsilon_{yy} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xz} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Os três termos na diagonal da matriz representam as deformações lineares, enquanto os três termos fora da diagonal são designados de distorções. As deformações e distorções podem ser definidas com base no gradiente do campo de deslocamentos.

A técnica de Shearografia Speckle permite medir directamente os gradientes do campo deslocamentos fora do plano nas direcções paralelas à superfície do objecto,  $\frac{\partial w}{\partial x}$  e  $\frac{\partial w}{\partial y}$ , utilizando um vector sensibilidade normal à superfície e desfasando lateralmente as frentes de onda nas direcções  $Ox$  ou  $Oy$ . Em relação às deformações no plano  $\varepsilon_{xx}$  e  $\varepsilon_{yy}$ , definidas respectivamente pelo gradiente dos campos de deslocamentos  $\frac{\partial u}{\partial x}$  e  $\frac{\partial v}{\partial y}$ , são medidas directamente utilizando a técnica de Shearografia Speckle com dupla iluminação Laser [7]. O método da dupla iluminação Laser com vectores sensibilidade opostos em relação à superfície ao objecto é criado para isolar a componente do gradiente no plano, Figura 2. Assim, para um vector sensibilidade no plano  $Oxz$  e desfasamento lateral nas direcções  $Ox$  ou  $Oy$ , obtêm-se os campos de deformações no plano  $\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}$  e  $\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}$ . A Figura 2 representa a montagem experimental para a medição do campo de deformações  $\varepsilon_{xx}$ , sendo que o vector iluminação e observação pertencem ao plano  $Oxy$ .

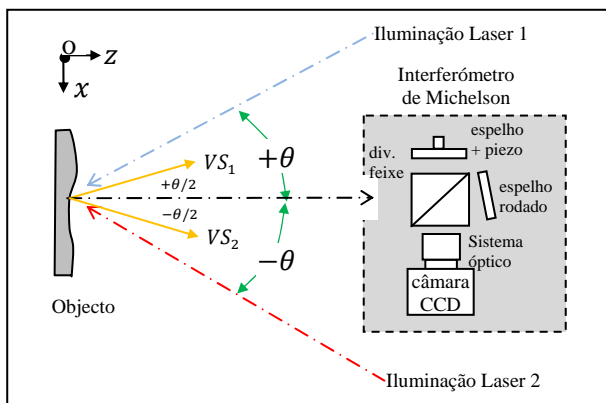


Figura 2-: Montagem experimental para medição do campo de deformações no plano  $\varepsilon_{xx}$ , utilizando o método da dupla iluminação.

O procedimento experimental consiste em medir dois mapas de fase para a posição referência, utilizando separadamente as duas iluminações Laser e recorrendo à técnica modelação temporal de fase, com salto constante de  $\frac{\pi}{2}$ . Após a solicitação do objecto, é repetido o mesmo procedimento para se extrair os mapas de fase para a posição de deformada. A partir da correlação dos dois

Para um vector sensibilidade pertencente ao plano  $Oxz$  e desfasamento lateral com intervalo  $\delta x$  definido na direcção  $Ox$ , a variação da fase observada nas duas de iluminações Laser é calculado com base na expressão [7]:

$$\Delta_{xx}^{\pm\theta} = \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[ \text{sen}(\pm\theta) \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos(\pm\theta)) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (3)$$

A subtracção numérica dos mapas de fase medidos nas direcções  $+\theta$  e  $-\theta$  e pertencentes ao plano  $Oxz$ , permite isolar as componentes da deformação no plano:

$$\Delta_{xx}^{//} = \Delta_{xx}^{+\theta} - \Delta_{xx}^{-\theta} = \frac{4\pi\delta x \text{sen}(\theta)}{\lambda} \varepsilon_{xx} \quad (4)$$

Refira-se que a sensibilidade da medição é proporcional ao ângulo de iluminação  $\theta$  e ao intervalo de diferenciação  $\delta x$ . Contudo, observa-se o aumento da descorrelação do Speckle com o ângulo de iluminação, resultando numa diminuição da razão sinal/ruído na medição. Por sua vez, o aumento do intervalo da diferenciação produz uma suavização do gradiente do campo de deslocamentos, conduzindo atenuação ou remoção de perturbações localizadas.

### 4. Simulação da interferometria Speckle

Pelo princípio de Huygens, cada ponto da superfície rugosa e difusa quando iluminada por uma luz coerente pode ser tratado com uma fonte esférica de uma onda secundária, cujo campo eléctrico é descrito por [1]:

$$E(x, y) = A e^{j\phi(x, y)} \quad (5)$$

sendo  $A$  é a amplitude,  $\phi(x, y)$  o campo de fase e  $j$  é a constante complexa de  $\sqrt{-1}$ . O padrão de Speckle obtido por difracção da luz na superfície apresenta fisicamente uma distribuição aleatória [1]. Assim, a intensidade e a fase do padrão de Speckle podem ser considerados como estatisticamente independentes, onde a fase do padrão de Speckle  $\phi(x, y)$  segue uma distribuição normal do tipo:

$$\phi(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & \text{se } -\pi \leq \phi < \pi \\ 0 & \text{se } \phi \geq \pi \text{ ou } \phi < -\pi \end{cases} \quad (6)$$

A intensidade do padrão de Speckle é definida em função do tipo de elemento óptico usado para abrir o feixe e iluminar toda a superfície do objecto.

Na interferometria Speckle, a interferência de duas ou mais frentes de onda dá origem a um padrão de interferência do Speckle correlativo e não correlativo. Na interferência correlativa resultam padrões contendo informação de fase. A interferência não correlativa introduz uma componente aleatória na fase que se manifesta pelo aparecimento de ruído no mapa de fase. Por sua vez, durante a deformação do objecto ocorre a descorrelação parcial ou total do Speckle. Este é influenciado pela abertura numérica do sistema óptico, amplitude do movimento de translação, rotação do objecto e pelo ângulo de iluminação Laser. Também, a aplicação das técnicas de modelação temporal e espacial de fase, usadas para aumentar a resolução da fase, conduzem à amplificação e propagação do ruído de

Speckle. Por último, a combinação numérica dos mapas de fase leva à multiplicação do ruído de Speckle e, conseqüentemente, à degradação da qualidade dos resultados na medição.

#### 4.1. Técnica de shearografia Speckle

Na técnica de Shearografia Speckle, a descorrelação do Speckle ocorre simultaneamente nas duas frentes de onda, criadas a partir da reflexão da Luz Laser no objecto, a qual resulta na destruição do contraste das franjas no plano de imagem. Nesta técnica, prova-se que o contraste máximo das franjas é obtido para igual intensidade das frentes de onda e que sensibilidade da descorrelação por rotação é maior em relação à descorrelação por translação no plano [13].

No que se refere às frentes de onda criadas pela técnica de Shearografia Speckle estas podem ser descritas por:

$$E_1(x, y) = A_0 e^{j\phi(x, y)} \quad E_2(x, y) = A_0 e^{j\phi(x + \delta x, y)} \quad (7)$$

onde  $A_0$  é a amplitude do campo,  $\phi(x, y)$  a fase da onda directa e  $\phi(x + \delta x, y)$  a fase da onda desviada do intervalo de  $\delta x$  na direcção do eixo  $Ox$ . Pelo facto das duas frentes de onda resultam do mesmo padrão de Speckle, as suas fases podem ser correlacionadas. O mapa de fase do interferograma produzido pela interferência destrutiva e construtiva da fase das duas frentes de onda é gravado na forma de padrão de intensidades ou imagem por uma câmara de vídeo, podendo ser determinado pela expressão [1]:

$$I(x, y) = |E_1(x, y) + E_2(x, y)|^2 \quad (8)$$

A reconstrução do mapa de fase do interferograma  $\varphi(x, y)$  envolve a resolução de um sistema não linear de um sistema de equações com o mínimo de três incógnitas. Este pode ser realizado de modo eficiente através da aplicação da técnica de modelação temporal com registo de quatro padrões de intensidade e salto de fase constante de valor  $\frac{\pi}{2}$ , sendo o mapa de fase determinado pela expressão [1]:

$$\varphi(x, y) = \arctg \frac{I_{3\pi/2}(x, y) - I_{\pi/2}(x, y)}{I_0(x, y) - I_{\pi}(x, y)} \quad (9)$$

Por fim, o mapa de fase do gradiente dos deslocamentos na superfície do objecto  $\Delta\varphi(x, y)$  é calculado correlacionando a fase medida entre dois instantes de carregamento. Assim, tomando a fase na posição de referência  $\varphi_r(x, y)$  e a fase na posição de deformada  $\varphi_d(x, y)$ , o mapa da variação relativa da fase é definido por:

$$\Delta\varphi(x, y) = \arctg \frac{\sin(\varphi_d(x, y)) - \sin(\varphi_r(x, y))}{\cos(\varphi_d(x, y)) - \cos(\varphi_r(x, y))} \quad (10)$$

#### 4.2. Estudo do ruído de Speckle nas medições

No estudo que se segue pretende analisar a perturbação do ruído de Speckle na qualidade das medições. Com

efeito, este é introduzido nas expressões 7 na forma de uma componente aleatória da fase que segue uma distribuição normal definida por:

$$\Phi_r(x, y) = A \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\phi^2}{2}}, \text{ para } -\pi \leq \phi \leq \pi \quad (11)$$

onde  $A$  representa o factor de participação do ruído e pode tomar valores entre 0 e 1. O modelo da variação linear do nível de ruído na medição é aqui adoptado para simular a descorrelação progressiva do Speckle em função do ângulo de iluminação e rotação da superfície, sendo fixados valores máximos para cada caso.

O modelo físico da flexão de uma viga fina em alumínio na condição encastrada-livre com carga pontual na extremidade livre é usado para simular a influência do ruído de Speckle na medição do campo de deformações no plano. Com efeito, considere-se a viga na condição encastrada-livre e as respectivas características geométricas e propriedades do material.

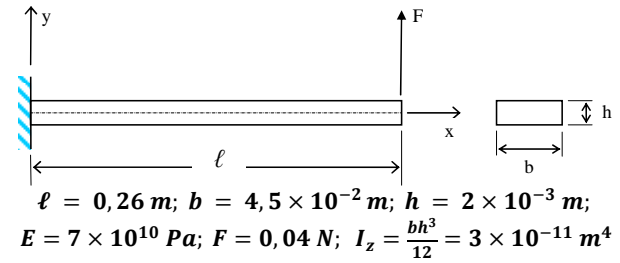


Figura 3- Modelo de uma viga encastrada-livre. Características geométricas e propriedades do material.

Adoptando um modelo unidimensional de estrutura e admitindo a flexão pura da viga, os campos de deslocamentos longitudinal à superfície  $X(x)$  e transversal  $Y(x)$  definidos ao longo do seu comprimento serão dados respectivamente pelas expressões:

$$X(x) = \int \epsilon_{xx} dx = \frac{-Fh(\ell-x)^2}{4EI}; \quad Y(x) = \frac{F\left(\frac{\ell x^2}{2} - \frac{x^3}{6}\right)}{EI} \quad (16)$$

Na interferometria Speckle, a fase do padrão de Speckle é modelada pelo campo de deslocamentos na superfície do objecto, sendo a contribuição das componentes no plano e fora do plano definidas em função do vector sensibilidade  $VS$ . Assim, a variação do mapa de fase no plano de imagem produzido pelo campo de deslocamentos na superfície pode ser calculado com base na seguinte expressão:

$$\varphi(x, y) = \arctg \left[ \frac{\sin\left(\frac{X(x)}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{Y(x)}{\lambda} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)}{\cos\left(\frac{X(x)}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{Y(x)}{\lambda} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)} \right] \quad (16)$$

em que  $\frac{\theta}{2}$  é o ângulo do vector sensibilidade medido em relação à normal superfície, Figura 2, e  $\lambda$  o comprimento de onda da luz Laser usada na iluminação da superfície. Adoptando como domínio de discretização da superfície da viga definida por uma imagem de dimensão  $1280 \times 380$  píxeis, um vector sensibilidade com um ângulo de  $\frac{\pi}{3}$  e um comprimento de onda da luz Laser  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , obtém-se o campo de deslocamento e respectivo mapa de fase representado na Figura 4.

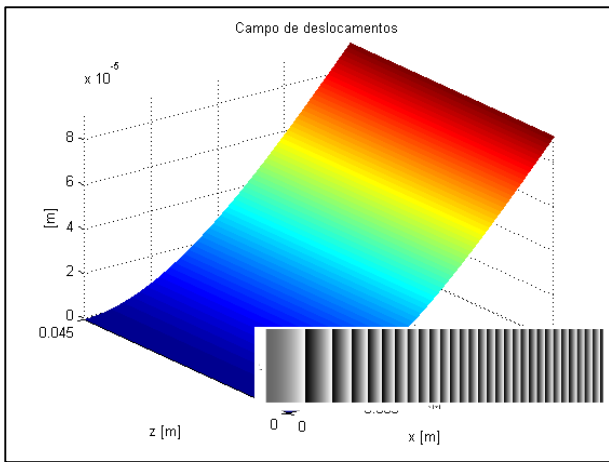


Figura 4- Campo de deslocamentos e respectivo mapa de fase (escala de cinzentos) de uma viga medido na direcção do vector sensibilidade  $\frac{\pi}{3}$ .

A simulação das frentes de onda criadas pela técnica de Shearografia Speckle é realizada recorrendo às expressões em 7. Por razões de simplificação da análise, considera-se aqui uma distribuição de amplitude uniforme e igual nas duas frentes de onda com distribuição de fase aleatória, sendo adicionado diferentes níveis de ruído de Speckle  $\phi_r(x, y)$ . Para o estado de deformação do objecto é acrescentada a fase correspondente ao deslocamento do objecto  $\phi(x, y)$ . Nesta é ainda introduzido ruído na fase, proporcional ao campo de rotações ocorrida na superfície e ao ângulo de iluminação Laser, pretende-se deste modo simular a descorrelação progressiva do Speckle no plano de imagem. Na Figura 4 estão representados quatro mapas de fase obtidos pela interferência de duas frentes desfasadas na direcção  $Ox$  de 20 mm com adição de níveis crescentes de ruído  $A = \{0; 0,2; 0,4; 0,6\}$ .

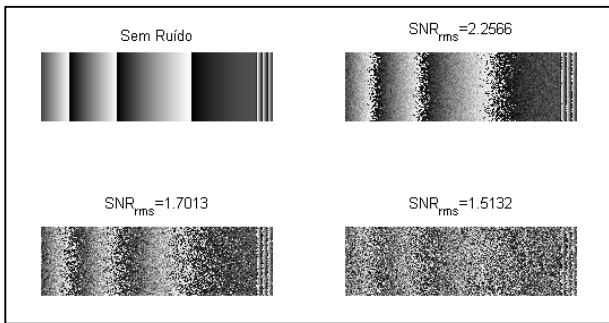


Figura 4- Mapas de fase gerados por interferência de duas frentes de onda com adição de diferentes níveis de ruído.

Como já esperado, comparando os mapas com e sem ruído de fase verifica-se que há uma degradação no contraste das franjas e uma diminuição da razão sinal ruído. Ao nível do número de franjas, observa-se uma diminuição relativamente ao campo de deslocamentos, em consequência deste mapa de fase representar a diferença de fase entre duas frentes de onda desfasadas lateralmente. O desfaseamento lateral das frentes de onda cria numa das extremidades da viga uma região em que não há informação de fase de uma das frentes de onda, produzindo-se assim franjas de deslocamento, tal como se pode observar no lado direito dos mapas de fase. A contabilização da descorrelação progressiva do Speckle com a deformação do objecto é realizada através da introdução do ruído na frente de onda deformada, seguindo uma distribuição proporcional ao campo de

rotações da superfície. Assim, impondo como limite superior uma amplitude do ruído de  $A = 0,5$ , são agora calculados os três mapas de fase e que se representam na Figura 5.

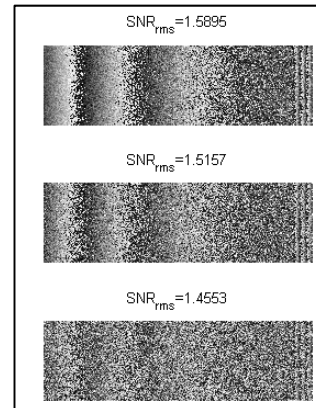


Figura 5- Mapas de fase com adição de diferentes níveis de ruído, para simular a descorrelação rotação da superfície

A partir da observação destes mapas e tendo como referência os mapas apresentados na Figura 4, podemos concluir que globalmente há uma diminuição da razão sinal ruído e uma degradação das franjas junto à extremidade livre, onde o perfil de rotações tem amplitude máxima.

Como referido, a medição do gradiente dos deslocamentos no plano através da técnica Shearografia Speckle requer a combinação de duas medições realizadas com o mesmo ângulo, mas simétricas relativamente ao eixo de observação. Assim, a partir do campo de deslocamentos da viga e seguindo o procedimento anterior são gerados dois mapas de fase  $\Delta_{xx}^{-\theta/2}$  e  $\Delta_{xx}^{+\theta/2}$ . O mapa de fase da deformação no plano  $\Delta_{xx}^{//}$  é determinado por subtracção da fase destes dois mapas, sendo este cálculo realizado através da expressão 10. Na Figura 6 apresentam-se os mapas de fase obtidos a partir do campo de deslocamentos da viga para duas direcções simétricas do vector sensibilidade e o mapa da variação relativa da fase, correspondente ao gradiente dos deslocamentos no plano.

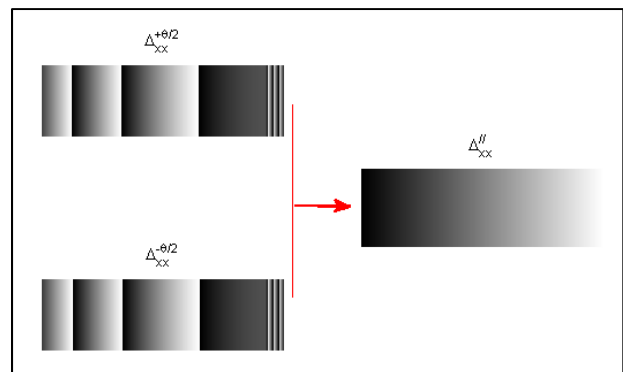


Figura 6- Procedimento para a determinação do mapa de fase do gradiente dos deslocamentos no plano.

O mapa de fase do gradiente no plano representado por uma única franja cuja fase varia linearmente ao longo do comprimento da viga, sendo mínima junto ao encastamento. Desde já este resultado revela que o sistema apresenta baixa sensibilidade na medição do

gradiente dos deslocamentos no plano. De modo análogo ao estudo anterior, é aqui simulado o ruído de Speckle e a decorrelação do Speckle através da adição de ruído à fase das frentes de onda. No sentido de facilitar a análise dos resultados são usados nesta simulação os níveis menos severos de ruído adoptados no estudo anterior, um nível de ruído global  $A = 0,2$  e uma distribuição de ruído proporcional ao perfil de rotação da viga com limite máximo de  $A = 0,5$ . Assim, a partir da combinação de dois mapas com ruído é determinado o mapa de fase representado na Figura 7.

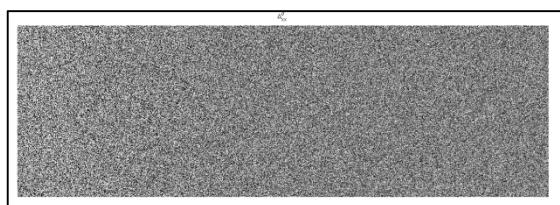


Figura 7- Mapa de fase do gradiente dos deslocamentos no plano com adição de ruído.

A partir da análise do mapa de fase representado na Figura 7 verifica-se que não é possível identificar qualquer evolução na fase coerente com o campo obtido na condição sem ruído. Este resultado é justificado pela pequena amplitude do gradiente do deslocamento no plano e pela propagação do ruído através da combinação numérica dos dois mapas de fase. Resultados semelhantes são obtidos simulando diferentes ângulos de iluminação e/ou intervalos de desfasamento entre frentes de onda.

## 5. Desenvolvimento do sistema de Shearografia Speckle

O desenvolvimento do sistema de Shearografia Speckle teve por base a configuração óptica do interferómetro de Michelson e a aplicação da técnica de modulação temporal de fase para determinação da fase da interferência. A implementação desta técnica é realizada através da translação de um dos espelhos do interferómetro, sendo a posição do espelho controlado pela da tensão aplicada aos terminais de um piezoelétrico. O alinhamento do eixo óptico, o equilíbrio entre os caminhos ópticos do interferómetro, a abertura numérica do sistema óptico, a facilidade de ajuste e calibração do sistema são alguns factores essenciais para se obterem medições de elevada qualidade. Particular atenção foi dedicada fixação e alinhamento dos componentes móveis do sistema, tais como espelho + piezoelétrico. A solução encontrada passou por construir um sistema óptico robusto, que permitisse o fácil ajuste e alinhamento dos elementos ópticos, e que, ao mesmo tempo, fosse suficiente modular para poderem ser utilizados de diferentes sistemas de gravação de imagem. O interior do interferómetro foi revestido a preto opaco de modo a eliminar possíveis reflexões internas, as quais poderiam resultar na destruição do contraste das franjas.

Na Figura 8 apresenta-se uma imagem do sistema Shearografia Speckle construído.

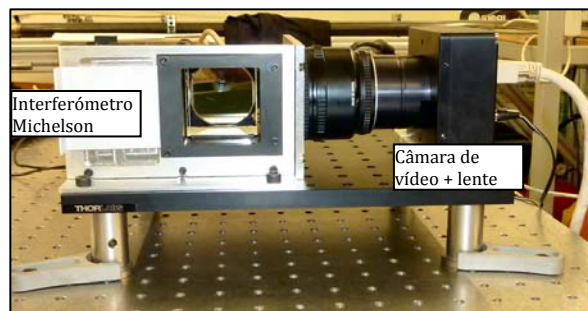


Figura 8- Imagem geral sistema Shearografia Speckle.

## 6. Medição do campo de deformações num provete

O sistema de Shearografia Speckle com o método da dupla iluminação foi usado para medir o campo de deformações de um provete em alumínio de 3 mm de espessura submetido a uma carga axial, Figura 9.

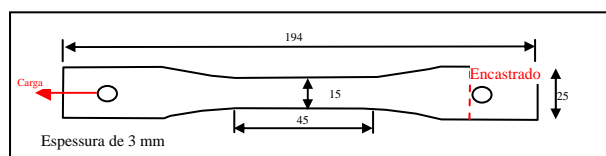


Figura 9- Representação da geometria do provete [mm].

Este provete é encastado numa extremidade a um maciço em Aço e na outra é preso por um cabo que serve para aplicação de carga fixa através da colocação de pesos. A superfície do provete foi previamente pintada com uma fina camada de pó branco para aumentar e uniformizar a reflectividade da iluminação da luz Laser. Um Laser de He-Ne de comprimento de onda  $\lambda = 694nm$  é usado para iluminar a superfície do provete. O procedimento experimental para medição do gradiente dos deslocamentos realiza-se em duas fases. Na primeira, com o Laser orientado na direcção  $+\theta$  são registadas quatro imagens desfasadas entre si de  $\frac{\pi}{2}$ , para as condições sem e com carga. Na segunda fase, o Laser é orientado na direcção  $-\theta$ , sendo repetido o processo de medição. A imagem da montagem experimental usada para medir o campo de deformações no provete está representada na Figura 10.

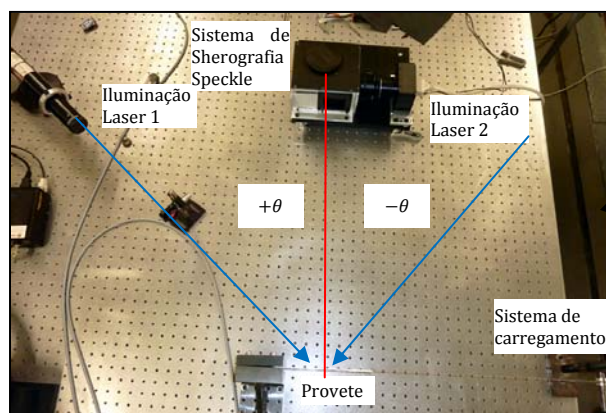


Figura 10- Imagem da montagem experimental.

Neste ensaio foi usado uma iluminação com um ângulo de  $\theta = 50^\circ$  e um desvio horizontal entre as duas frentes de onda de 10 mm, correspondente à direcção longitudinal do provete. A carga aplicada ao provete é de 20 N. Os

mapas de fase medidos nas duas direcções de iluminação são combinados para se obter a distribuição de fase correspondente ao gradiente dos deslocamentos no plano que está representado na Figura 11.

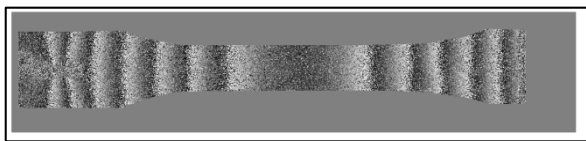


Figura 11- Imagem geral sistema Shearografia Speckle.

O mapa apresenta uma distribuição de fase simétrica em relativamente ao centro do provete. Na extremidade esquerda do mapa observa-se uma distorção da configuração das franjas, a qual tem como origem a concentração de tensões devido à presença do furo no provete e à aplicação da carga. A simulação numérica em Ansys® foi realizada com base no modelo de provete apresentado na Figura 9. Na Figura 12 comparam-se os perfis do campo de deformações medido através do sistema de Shearografia Speckle e o calculado pelo método dos elementos finitos.

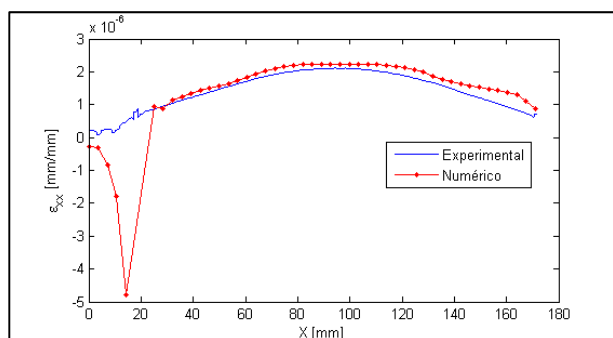


Figura 12- Comparação dos perfis do campo de deformações experimental e numérico.

A análise comparativa dos dois perfis revela que globalmente estes apresentam um comportamento muito idêntico com a excepção de uma perturbação localizada na extremidade esquerda da viga, a qual tem como origem o efeito da aplicação da carga. No campo experimental, esta perturbação é atenuada devido ao intervalo de 10 mm usado na diferenciação.

## 7. Conclusões

Neste trabalho é apresentada a técnica de shearografia Speckle para a medição do gradiente do campo de deslocamentos e campo de deformações no plano através do método da dupla iluminação. Um modelo numérico é apresentado para simular a influência do ruído de Speckle e determinação do campo de deformações. Os resultados obtidos revelam que o sistema apresenta baixa sensibilidade para a medição do gradiente dos deslocamentos no plano. Através da introdução do ruído experimental verificou-se que este é propagado e amplificado pelo processo de cálculo do campo de deformações. Por fim, o sistema de shearografia Speckle desenvolvido demonstrou ser eficaz na medição do campo de deformação num provete sujeito à tração.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da FCT através do Projecto COMPETE FCT PTDC/EME-PME/102095/2008.

## Referências

- [1] Kreis, T., "Handbook of Holographic Interferometry: Optical and Digital Methods", Weinheim, Wiley-VCH, 2005.
- [2] Kalms, M., Osten, W., "Mobile Shearography System For the Inspection of Aircraft and Automotive Components", Opt. Eng. 42(5), 2003, pp. 1188-1196.
- [3] Hung, M.Y.Y., Chen, Y.S., Ng, S.P., Shepard, M.S., Hou, Y., Lhota, J. R., "Review and Comparison of Shearography and Pulsed Thermography for Adhesive Bond Evaluation", Opt. Eng. 46(5), 2007, pp. 051007-1-16.
- [4] Yang, L.X., Steinchen, W., M. and Kupfer, G., "Precision measurement and nondestructive testing by means of digital phase shifting speckle pattern and speckle pattern shearing interferometry" Measurement- J. Intl Measure Confed. Vol. 16, pp. 149-160 (1995)
- [5] Y. Y. Hung, J. Q. Wang, "Dual-beam Phase Shift Shearography for Measurement of In-plane Strains", Opt. Lasers Eng. 24: 403-413, 1996
- [6] Steinchen W, Kupfer G, Mackel P, Vossing F, Determination of strain distribution by means of digital shearography, Measurement, 1999, v 26, 79-90
- [7] Wolfgang Seinchen, Lianxiang Yang, Digital Shearography –Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry, (SPIE PRESS 2003).
- [8] Ghiglia, D.C. and M.D. Pritt, Two-dimensional phase unwrapping : theory, algorithms, and software. 1998, New York: Wiley. xiv, 493 p.
- [9] Aebischer, H.A. and S. Waldner, A simple and effective method for filtering speckle-interferometric phase fringe patterns. Optics Communications, 1999. 162(4-6): p. 205-210.
- [10]. Kemao, Q., Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: addendum. Applied Optics, 2004. 43(17): p. 3472-3473.
- [11] Kemao, Q., Seah Hock Soon, Anand Assundi, A Simple phase unwrapping approach based on filtering by windowed Fourier transform. Optics & Laser Technology, 2005. 37: p. 458-462.
- [12] Murukeshan V M, Keong N C, Krishnakumar V, Seng O L and Asundi A., Double shearography for engineering metrology: optical and digital approach Optics & Laser Technology, 33 (2001), 325–328.
- [13] Owner-Petersen, M., Decorrelation and fringe visibility: on the limiting behavior of various electronic speckle-pattern correlation interferometers. J. Opt. Soc. A., 1991. 8(7): p. 1082-1089