

VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional

Universidade de Évora

14 a 16 de Abril de 2003

MEDIÇÃO DE CAMPOS DE TENSÕES RESIDUAIS – ESTUDO PRELIMINAR

J. Ribeiro¹, M. Vaz², P. Piloto³

RESUMO

Este trabalho tem em vista o desenvolvimento de uma técnica experimental para medição de tensões residuais que possa ser uma alternativa ao clássico método do furo. Para caracterizar os campos de deformação nas proximidades do furo prevê-se a utilização do método de Moiré. Trata-se de uma técnica de campo que permite medir sem contacto, deslocamentos no plano, com uma resolução que é condicionada pela frequência espacial das redes. As técnicas para a gravação das redes nas superfícies dos objectos são descritas e caracterizadas. É também apresentada a montagem de interferometria laser utilizada para gerar, de forma controlada, a rede necessária à interrogação. Técnicas experimentais e numéricas são utilizadas para determinar as constantes de calibração (\bar{A} e \bar{B}) usadas no método do furo. Para isso é analisado, com detalhe, o campo de tensões na vizinhança de um furo cilíndrico resultante da tracção uniaxial no plano, aplicada a uma placa fina.

1. INTRODUÇÃO

As tensões residuais podem ser definidas como aquelas que se mantêm no material ou objecto depois do processo de fabrico e na ausência de forças externas ou gradientes térmicos, James, Lu (1996). Os processos de fabrico são as causas mais comuns de tensões residuais. Virtualmente, todos os processos de fabrico (fundição, soldadura, maquinagem, tratamentos térmicos, etc.) introduzem tensões residuais no objecto fabricado. Outras causas comuns do surgimento de tensões residuais são as reparações de manutenção ou reparação. Por vezes, as tensões podem também ser induzidas em serviço durante o processo de instalação, por sobrecargas ocasionais, pelos efeitos dos seus apoios ou por cargas permanentes que podem tornar-se uma parte integrante da carga da estrutura.

As tensões residuais podem classificar-se em macro ou micro tensões, e podem estar ambas ou individualmente presentes num componente. As macro tensões residuais,

¹ Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Bragança, Tecnologia Mecânica, Bragança, jecastro@fe.up.pt.

² Professor Associado, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Engenharia Mecânica, Porto.

³ Professor Coordenador Instituto, Politécnico de Bragança, Mecânica Aplicada, Bragança.

frequentemente designadas por tensões residuais do Tipo I, variam ao longo do componente numa escala muito superior à do tamanho do grão. As micro tensões, que resultam de diferenças no interior da micro estrutura do material, podem ser classificadas em Tipo II ou III. As tensões residuais do Tipo II são micro tensões que operam ao nível do tamanho do grão. As tensões do Tipo III são geradas a um nível atômico, James, Lu (1996).

Os efeitos das tensões residuais podem ser tanto benéficos como prejudiciais, dependendo da sua magnitude, sinal, e sua distribuição. Normalmente, as tensões residuais são prejudiciais, pois somam-se às tensões de serviço. Existe muita documentação relativa a casos nos quais estas tensões foram o factor predominante nas falhas estruturais. Contudo, podem também ser benéficas, especialmente por permitirem o aumento da tensão limite de fadiga. Nestes casos provocam-se propositadamente tensões residuais de compressão à superfície, como é o caso do “shot peening”, Nobre (2000), aplicado em superfícies e do “cold work”, Papanikos (1997), aplicado em furos para rebites, muito utilizados na aeronáutica. O aspecto particularmente incidente das tensões residuais é que a sua presença geralmente passa despercebida até que o mau funcionamento ou falhas ocorram.

2. MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

Ao longo dos últimos cem anos têm sido desenvolvidas várias técnicas de medição de tensões residuais. Sendo as mais divulgadas as seguintes: método do furo, difracção de raios X, difracção de neutrões, remoção de camada e curvatura, entre outras (incluem-se técnicas magnéticas, de ultra sons, Raman, etc.).

2.1 Vantagens e Desvantagens de Diferentes Técnicas de Medição de Tensões Residuais

As técnicas de medição de tensões residuais podem classificar-se em três grupos: destrutivas (remoção de camada e curvatura), semi-destrutivas (método do furo) e as não destrutivas (difracção de raios X e de neutrões, técnicas magnéticas e de ultrasons). Na tabela 1 apresentam-se, de um forma sucinta, as principais vantagens e desvantagens das técnicas de medição de tensões residuais mais utilizadas.

2.2 Método do Furo

De todas as técnicas referidas a mais utilizada para a medição de tensões residuais é o método do furo com extensómetros. Esta técnica baseia-se na utilização de uma roseta de extensómetros especial, colada na região em que se pretende medir as tensões residuais, onde é realizado um pequeno furo (com diâmetro 0.8 a 4.8 mm). Os extensómetros medem a relaxação das deformações devidas à realização do furo. O procedimento precedente é relativamente simples, e está normalizado na ASTM E837. Usando equipamento comercialmente disponível, e seguindo as recomendações previstas na norma, o método do furo pode ser aplicado de forma rotineira por qualquer técnico de análise de tensões.

2.2.1 Princípios e Teoria

A realização de um furo (ainda que de pequeno diâmetro) num corpo com tensões residuais irá provocar uma relaxação das tensões nesse local. A eliminação destas tensões na superfície do furo, estado plano de tensão, modifica as tensões na região imediatamente circundante, o que implica que também as deformações correspondentes na mesma zona se

modifiquem. Este princípio é a base do método do furo, inicialmente proposto por Mathar (1934).

Tabela 1. Vantagens e desvantagens de diferentes técnicas de medição de tensões residuais, Kandil (2001).

Técnicas	Vantagens	Desvantagens
Método do furo	<ul style="list-style-type: none"> - Rápido e simples; - Extensamente disponível; - Portátil; - Grande gama de materiais; - Possibilidade de furos profundos para aplicação em componentes com secção espessa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Interpretação dos dados; - Semi-destrutivo; - Limitada sensibilidade e resolução.
Difracção de raios X	<ul style="list-style-type: none"> - Versátil, extensamente disponível; - Grande gama de materiais (materiais cristalinos); - Sistemas portáteis; - Possibilidade de medição de micro e macro tensões residuais. 	<ul style="list-style-type: none"> - Medições básicas; - Sistemas baseados em laboratório; - Medição de pequenos componentes
Synchrotron	<ul style="list-style-type: none"> - Melhoria da penetração e resolução relativamente à difracção de raios X; - Possibilidade de perfis de tensão em profundidade; - Rápido; - Possibilidade de medição de micro e macro tensões residuais. 	<ul style="list-style-type: none"> - Apenas em laboratórios especializados; - Baseado em laboratório.
Difracção de Neutrões	<ul style="list-style-type: none"> - Excelente penetração e resolução; - Mapas de tensão 3D; - Possibilidade de medição de micro e macro tensões residuais. 	<ul style="list-style-type: none"> - Apenas em laboratórios especializados; - Baseado em laboratório.
Remoção de camada e curvatura	<ul style="list-style-type: none"> - Relativamente simples; - Grande gama de materiais; - Pode ser combinado com outras técnicas para se obter o perfil das tensões. 	<ul style="list-style-type: none"> - Limitado a formas simples; - Destrutivo; - Baseado em laboratório.
Técnicas Magnéticas	<ul style="list-style-type: none"> - Muito rápido; - Grande variedade de técnicas magnéticas; - Portátil. 	<ul style="list-style-type: none"> - Só pode ser aplicado a materiais ferromagnéticos; - Necessidade de separar o sinal devido à micro-estrutura do provocado pelas tensões.
Ultrasons	<ul style="list-style-type: none"> - Geralmente disponível; - Muito rápido; - Baixo custo; - Portátil. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resolução limitada;
Raman/Fluorescente	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada resolução; - Disponibilidade de sistemas portáteis. 	<ul style="list-style-type: none"> - Medições superficiais; - Interpretação; - Calibração; - Gama de materiais limitada.

Na maioria das aplicações práticas do método, o furo é cego, com uma profundidade que é: igual ao seu diâmetro, e pequena quando comparada com a espessura da parte a testar. Infelizmente, a geometria do furo cego é de tal forma complexa, que não existe nenhuma solução directa da teoria da elasticidade para o cálculo das tensões residuais a partir das deformações (excepto a partir da introdução de coeficientes empíricos). Uma solução pode, no entanto, ser obtida para o caso simples de um furo passante numa placa fina, na qual as tensões residuais se encontram uniformemente distribuídas ao longo da espessura da placa. Neste caso, se as propriedades mecânicas do material da placa correspondem às de um material homogéneo e isotrópico, com comportamento linear, pode recorrer-se à lei de Hooke para obter as tensões normais relaxadas em torno do furo. As expressões resultantes são:

$$\varepsilon_r = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha + \frac{4}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] \quad (1a)$$

$$\varepsilon_{\theta} = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha - \frac{4\nu}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] \quad (1b)$$

em que ε_r e ε_{θ} são, respectivamente, as deformações radial e tangencial, σ_x é uma tensão residual uniforme, E é o módulo de elasticidade, ν é o coeficiente de Poisson, $r = R/R_0$ ($R \geq R_0$), R é o raio do furo, R_0 é um raio arbitrário que se encontra em torno do centro do furo e onde se pretendem determinar as deformações.

As equações precedentes podem ser escritas de uma forma mais simples, demonstrando que ao longo de um círculo de qualquer raio as deformações tangenciais e radiais aliviadas variam de uma maneira sinusoidal:

$$\varepsilon_r = \sigma_x (A + B \cos 2\alpha) \quad (2a)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \sigma_x (-A + C \cos 2\alpha) \quad (2b)$$

A comparação das equações 1 com as equações 2 demonstra que os coeficientes A , B , e C podem ser descritos da seguinte forma.

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{1}{r^2} \right) \quad (3a)$$

$$B = -\frac{1+\nu}{2E} \left[\left(\frac{4}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right] \quad (3b)$$

$$C = -\frac{1+\nu}{2E} \left[-\left(\frac{4\nu}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \right] \quad (3c)$$

Os parâmetros, A , B e C , são as constantes de calibração do método do furo para deformações num ponto.

Contudo, estas expressões só podem ser utilizadas quando as condições impostas pela solução de Kirsch poderem ser aplicadas. Esta solução dá a distribuição de tensão em pontos de coordenadas (r, α) em torno dum furo circular passante numa placa fina sujeita a um estado plano de tensão uniforme. No entanto, como estes coeficientes irão ser utilizados com os valores lidos nos extensómetros equidistantes do furo feito no centro da roseta e como a tensão varia com a distância ao centro do furo, obtêm-se resultados mais precisos recorrendo à análise da área correspondente ao extensómetro.

Assim, integrando A e B ao longo duma área finita, área do extensómetro, obtêm-se os parâmetros \bar{A} e \bar{B} , de acordo com as expressões:

$$\bar{A} = -\frac{(1+\nu)r_a^2}{E(R_2 - R_1)W} (\Psi_1 - \Psi_2) \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} \bar{B} = & -\frac{(1+\nu)r_a^2}{E(R_2 - R_1)W} \left[\frac{2(1-\nu)}{1+\nu} (\Psi_1 - \Psi_2) + \sin 2\Psi_1 - \sin 2\Psi_2 - \frac{1}{8} \left(\frac{r_a}{R_1} \right)^2 (2 \sin 2\Psi_1 + \sin 4\Psi_1) \right. \\ & \left. + \frac{1}{8} \left(\frac{r_a}{R_2} \right)^2 (2 \sin 2\Psi_2 + \sin 4\Psi_2) \right] \quad (4b) \end{aligned}$$

\bar{A} e \bar{B} passam a ser as constantes de calibração do método do furo para deformações numa área finita, R_1 , R_2 correspondem aos extremos da grelha do extensómetro, r_a é raio do furo,

W é a largura da grelha do extensómetro e, por último, ψ_1 , ψ_2 representam os ângulos dos cantos da grelha do extensómetro. Na figura 1 estão indicadas os parâmetros geométricos da grelha de cada um dos extensómetros que integram a roseta.

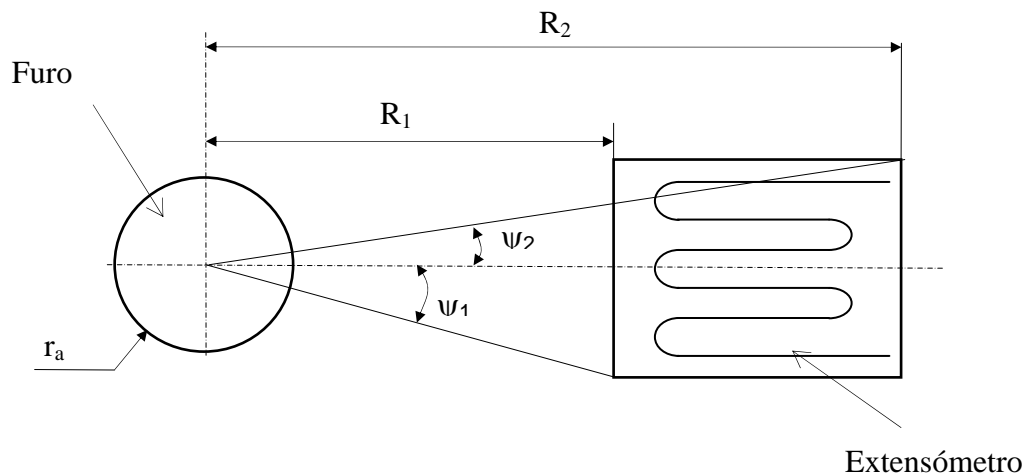


Fig.1 - Parâmetros geométricos da grelha de um extensómetro, Schajer e al (1997).

2.2.2 Calibração Experimental

A determinação analítica dos coeficientes de calibração só é feita para placas finas sujeitas a um estado plano de tensão com o furo passante. Para outros casos mais complexos e com furo cego não existem soluções analíticas. Desta forma é necessário recorrer à calibração experimental ou determinação numérica dos parâmetros \bar{A} e \bar{B} .

Os coeficientes necessários para ambas as análises, furo cego ou passante, podem sempre ser determinados por calibração experimental. Este procedimento é particularmente atractivo uma vez que assim são automaticamente tidas em consideração as propriedades mecânicas do material de teste, a geometria da roseta de extensómetros, a profundidade e diâmetro do furo. Quando executado correctamente, com suficiente atenção ao detalhe, é provavelmente o meio mais exacto para determinar os coeficientes. A sua principal desvantagem é que a calibração deve ser repetida cada vez que se insere um diferente conjunto de parâmetros geométricos. Na figura 2 representa-se esquematicamente uma das rosetas vulgarmente utilizadas para este fim.

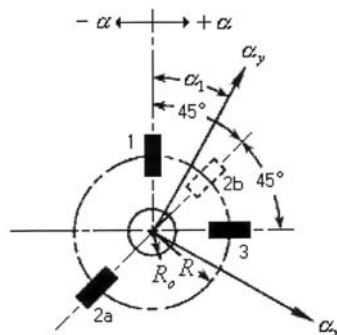


Fig.2 - Direcções dos extensómetros numa roseta para medição de tensões residuais, ASTM E 837 (2001).

A calibração dos coeficientes \bar{A} e \bar{B} é feita através da instalação de uma roseta de extensómetros num provete feito do mesmo material da peça a testar e submetido a um campo

de tensões uniaxiais. Um dos extensómetros é orientado de forma a alinhar a grelha paralelamente à direcção da carga. É frequente realizar o alinhamento pelo extensómetro número 3, colocando a grelha número 1 ao longo do eixo transversal do provete. Dever-se-á ter o cuidado de gerar tensões de tracção uniformes ao longo da secção transversal do provete. De forma a minimizar o efeito dos bordos, a largura do provete deverá ser superior a dez vezes o diâmetro do furo, e o comprimento entre as amarras, pelo menos cinco vezes a largura do provete. Para a determinação de \bar{A} e \bar{B} em aplicações com furo cego, é recomendada a utilização de provetes com espessura superior a cinco vezes o diâmetro do furo. Na calibração de furo passante, a espessura do provete deverá ser preferencialmente a mesma que a da peça a testar. É também importante que as máximas tensões aplicadas durante a calibração não excedam metade da tensão limite de proporcionalidade do material em teste. Em qualquer caso, as tensões aplicadas mais as tensões residuais iniciais, deverão ser suficientemente baixas para evitar o risco de cedência localizada, provocada pela concentração de tensões do furo, ASTM E 837 (2001).

2.2.3 Determinação Numérica das Constantes de Calibração

Os primeiros trabalhos desenvolvidos para a determinação das constantes de calibração, usando um método numérico (elementos finitos), surgem referenciados por Schajer, (1981). Este autor desenvolveu um método utilizando um modelo com elementos axissimétricos e simulou as tensões residuais, com um carregamento também axissimétrico. Desta forma podem-se calcular os deslocamentos na superfície radial do furo. Com base neste princípio, são realizados dois cálculos, um para cada uma das constantes \bar{A} e \bar{B} .

Para o caso de placas finas, sujeitas a tensões unidireccionais uniformes, pode utilizar-se um processo mais simples e com resultados bastante próximos dos obtidos por calibração experimental. Neste caso simula-se um ensaio de tracção com uma placa fina cujas dimensões respeitem a norma ASTM E837 (2001). São utilizados elementos isoparamétricos quadráticos para determinar o campo de deslocamentos em duas direcções ortogonais. Uma delas corresponde à direcção da carga aplicada, relativamente à qual os deslocamentos são integrados ao longo de toda a área do extensómetro. Do resultado obtido podem obter-se parâmetros de calibração recorrendo às expressões:

$$\bar{A} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2\sigma} \quad (5)$$

$$\bar{B} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2\sigma} \quad (6)$$

Cada uma das expressões de cima corresponde a um dos extensómetros que integram a roseta a 90°, usada na calibração.

3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA E VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

3.1 Simulação Numérica

No sentido de obter um método que permita realizar uma calibração dos parâmetros \bar{A} e \bar{B} foi feita uma análise numérica do efeito provocado por um orifício circular numa placa fina, submetida a uma tracção uniforme. Foi modelada uma placa de aço ($E=210$ GPa, $\nu = 0,29$) com as dimensões 200x70x1 [mm]. Foi aplicada uma tensão nominal de 40 MPa e simulado um furo 7 mm de diâmetro. Foi utilizado o código de elementos finitos ANSYS 5.7

com uma malha 655 elementos isoparamétricos quadráticos com 8 nós. Tendo em conta a simetria da placa optou-se por analisar apenas um quarto da mesma. Na figura 3 mostra-se o campo de tensões $\sigma_1-\sigma_2$, e na figura 4 o gráfico da distribuição de tensões longo do eixo do X.

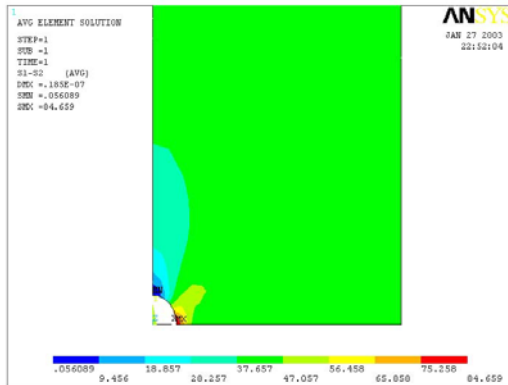


Fig.3 - Diferenças das tensões principais no plano.

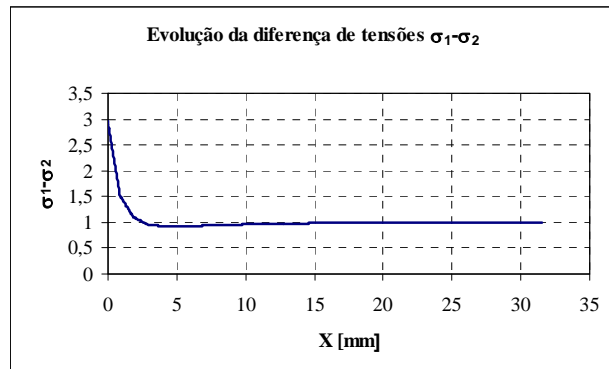


Fig.4 - Evolução da tensão $\sigma_1-\sigma_2$ adimensionalizada ao longo do eixo X para a=7 mm.

Calculando o factor de concentração de tensões (K_t) a partir dos resultados numéricos, obteve-se o valor de 3.01, muito próximo do valor de 3.04 indicado na bibliografia para este tipo de geometria, Peterson (1974).

3.2 Verificação Experimental

A partir da distribuição de tensões obtida no modelo numérico foi realizado uma representação gráfica listando os isovalores $\sigma_1-\sigma_2$. Esta representação permite uma comparação com os padrões de isocromáticas obtidos em fotoelasticidade. Um modelo fotoelástico representativo da geometria estudada numericamente foi maquinado num material birrefringente designado por PSM-4, com uma constante de franja $f_\sigma = 1$ PSI/FR/in.

Com o provete carregado com 40 N foi adquirido um conjunto de imagens que permitiram calcular a distribuição de fase do padrão de franjas, utilizando o programa PROCIM, Chousal (1991). Na figura 5 representa-se uma das imagens obtidas após o cálculo de fase. Na figura 6 representa-se a evolução da fase ao longo de uma linha correspondente ao eixo X utilizado no gráfico da figura 4. Neste caso foi medido um $K_t = 3.02$.



Fig.5 - Imagem obtida em fotoelasticidade com tratamento de imagem.

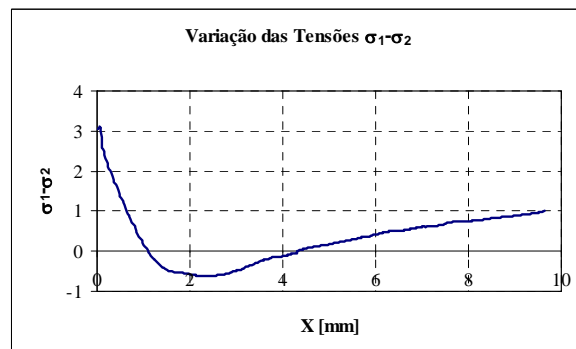


Fig.6 - Variação da tensão $\sigma_1-\sigma_2$ ao longo do eixo do X, valores adimensionalizados.

Dos resultados obtidos experimentalmente pode verificar-se existir uma boa concordância entre os campos de tensões calculados e medidos e os valores obtidos para o factor de concentração de tensões.

4. DETERMINAÇÃO NUMÉRICA DOS COEFICIENTES \bar{A} E \bar{B}

Utilizando o procedimento numérico estudado no ponto anterior determinaram-se os coeficientes \bar{A} e \bar{B} , validando estes valores com resultados conhecidos na bibliografia especializada. Fez-se a análise dum caso particular que se encontra apresentado num artigo publicado por um fabricante de extensómetros, Vishay (1984). Neste trabalho, os valores de referência dos coeficientes foram obtidos por calibração experimental. Foi utilizado o método do furo passante, numa placa fina de aço inoxidável 304. Foi considerada uma geometria $D_0/D=0.35$ (D_0 = diâmetro do furo, D = distância radial ao centro da grelha de cada extensómetro da roseta) e uma tensão aplicada de cerca de 69 MPa, sendo apresentados os valores: $\bar{A} = -0.36 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ e $\bar{B} = -0.94 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$.

Tomando como referência os valores apresentados anteriormente foram calculados os mesmos parâmetros utilizando as expressões analíticas apresentadas e os valores obtidos com o cálculo numérico descrito. Em todos os cálculos (analíticos e numéricos), foi considerada uma roseta de extensómetros comercializada pela Vishay, com a designação EA-06-062RE-120. No cálculo analítico foram utilizadas as expressões (4a) e (4b), considerando as propriedades elásticas $E = 193 \text{ GPa}$ e $\nu = 0.3$.

Foram obtidos os valores que se apresentam na tabela 2 juntamente com os erros considerando como referência os valores apresentados no artigo referido.

Tabela 2. Comparação entre os parâmetros calculados analiticamente e os valores disponíveis em Vishay (1984).

	Coeficientes [Pa^{-1}]	Erro [%]
\bar{A}	-0.411×10^{-12}	14.2
\bar{B}	-1.16×10^{-12}	23.9

Para a determinação numérica dos coeficientes de calibração \bar{A} e \bar{B} , recorreu-se ao cálculo numérico já descrito com uma alteração da geometria da malha de acordo com a recomendação da norma ASTM E 837, isto é, foi utilizado um modelo com as seguintes dimensões: $100 \times 500 \times 1$ [mm]. Os deslocamentos obtidos no cálculo foram integrados ao longo da área dos extensómetros nas direcções paralela e perpendicular à carga. Finalmente, recorrendo às expressões (5) e (6) foram determinados os parâmetros de calibração, conforme está indicado na tabela 3.

Tabela 3. Comparação dos valores obtidos a partir do cálculo numérico e os valores disponíveis em Vishay.

	Coeficientes [Pa^{-1}]	Erro [%]
\bar{A}	-0.381×10^{-12}	5.92
\bar{B}	-0.834×10^{-12}	11.3

5. MÉTODOS ÓPTICOS PARA MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS

No método do furo é normalmente utilizada uma roseta de extensómetros para medir as deformações relaxadas após furacão. Trata-se de um método discreto que obtém os valores das extensões a uma dada distância do bordo do furo. Estes factos implicam grandes cuidados na medição efectuada sob pena de obter resultados pouco precisos. Neste trabalho propõe-se a utilização de técnicas ópticas para caracterizar o campo de deslocamentos na periferia do furo. As técnicas de interferometria holográfica com dupla iluminação, permitem aceder ao campo

de deslocamentos na superfície do objecto com uma resolução sub micrométrica. Estas medições, são sensíveis a deslocamentos de corpo rígido devido à descorrelação dos padrões de Speckle.

As técnicas de Moiré, puramente geométricas, permitem também medir campos de deslocamentos no plano. A sua resolução depende do passo da rede e pode ser ajustada de acordo com os valores a medir. Contudo, esta técnica exige que a superfície do objecto seja previamente codificada através da gravação de uma rede. Esta acompanhará a deformação do objecto e permite caracterizar o campo de deslocamentos a partir da análise das suas variações de frequência. Esta análise é facilmente realizada por comparação com uma rede indeformável (rede mãe).

Na montagem que se apresenta será utilizada uma rede de frequência elevada (está em teste uma rede com 1200 l/mm). Para frequências tão elevadas, será necessário utilizar iluminação monocromática para evitar a difracção e a técnica passa a ser designada por interferometria de Moiré. A rede mãe será gerada por interferometria através da sobreposição de duas frentes de onda planas e coerentes. O controlo do ângulo entre elas permitirá ajustar a frequência de acordo com a expressão, Cloud (1998):

$$F = \frac{2 \left(\sin \frac{\Psi}{2} \right)}{\lambda} \quad (7)$$

Nesta expressão F é a frequência espacial do padrão de interferência gerado por uma radiação com comprimento de onda λ , quando a propagação das duas frentes de onda ocorre segundo um ângulo Ψ . Na figura 7 representa-se, esquematicamente e em fotografia, a montagem de interferometria Moiré realizada. No detalhe colocado na parte superior direita da fotografia pode ver-se uma rede objecto e o espelho utilizado para gerar a rede mãe. A montagem testada permite caracterizar campos de deslocamentos com uma resolução de 1/1200 do mm, sendo pouco sensível a movimentos de corpo rígido.

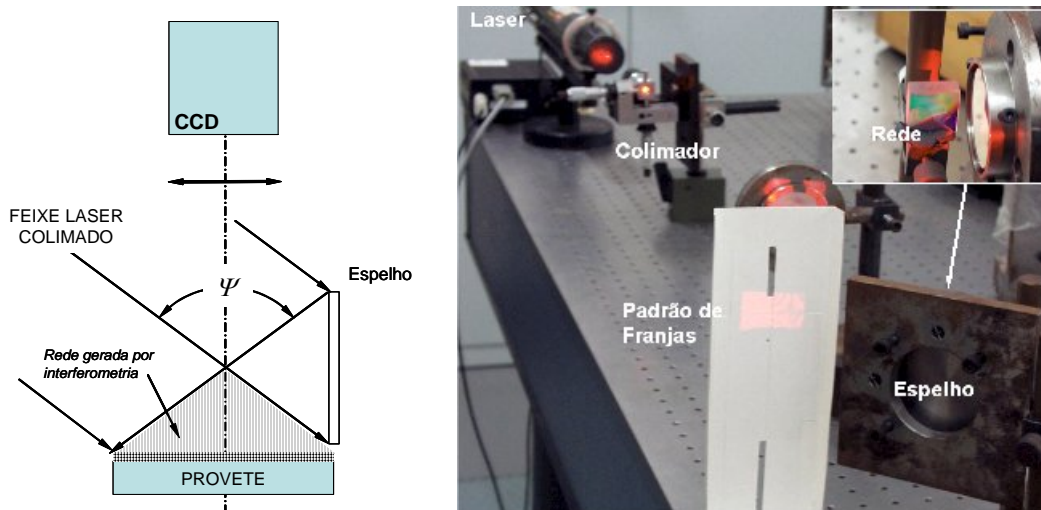


Fig.7 - Esquema e fotografia da montagem utilizada para medir deslocamentos com interferometria de Moiré.

A maior dificuldade encontrada na utilização do método proposto prende-se com a gravação da rede na superfície do objecto. Algumas técnicas de gravação estão em fase de teste, utilizando matrizes em que a rede está gravada em material foto sensível que é copiada para um carimbo em silicone. A rede gravada no silicone é depois recoberta com uma película de alumínio depositado por vaporização, que tem como objectivo aumentar a reflexão da rede.

O carimbo de silicone irá ser utilizado, copiando a rede para a superfície do objecto utilizando uma pequena camada de resina époxada. Pretende-se que ao retirar o carimbo da resina, durante a gravação da rede, a película de alumínio fique a recobrir a rede do objecto, Bulhack (2001). Este processo encontra-se ainda em fase de teste.

6. CONCLUSÕES

Após análise dos resultados obtidos podemos concluir que a abordagem que se fez para a simulação numérica conduz a valores da concentração de tensões aceitáveis e a coeficientes de calibração \bar{A} e \bar{B} muito próximos dos valores referenciados na bibliografia. Os primeiros foram, inclusivamente, confirmados experimentalmente.

As técnicas ópticas poderão ser um método alternativo às técnicas do furo convencionais, com algumas vantagens, são métodos de campo e com maior resolução, uma ordem de grandeza superior à extensometria. A técnica de Moiré apresenta-se como uma solução bastante interessante para a medição das tensões residuais com elevada precisão. A associação de processamento de imagem permitirá quantificar com rigor e de forma expedita os campos de deslocamentos.

REFERÊNCIAS

- ASTM, 2001 “Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method”, ASTM Standard E387-01, American Society for Testing and Materials.
- Bulha kJ. “Interférométrie Différentielle sur réseau: Nouvelle Méthode Optique de Mesure de Déformations avec Grande Résolution Spatiale”, Doctorat, Université Jean Monnet – Saint-Étienne, Saint-Étienne, France, 2001.
- Chousal, J. A., “Processamento de imagem na interpretação de franjas interferométricas em análise experimental de tensões”, Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, 1991.
- Coud, Gary, “Optical Methods of Engineering Analysis”, Cambridge University Press, USA, 1998.
- James, M. R., Lu, J. “Handbook of Measurement of Residual Stresses”, Edit. Jian LU, The Fairmont Press, Inc. United States, 1996.
- Kandil, F. A., Lord, J. D., e outros “Review of Residual Stress Measurements Methods – a Guide to Technique Selection”, NPL Report, UK, 2001.
- Mathar, J., “Determination of Inicial Stresses by Measuring the Deformation around Drilled Holes” Transactions ASME. 56, (4).
- Nobre, J. P., “Sobre o comportamento mecânico de camadas superficiais dos materiais: estudo do contacto no impacto elasto-plástico; determinação do estado de tensões residuais pela técnica do furo incremental”, tese de doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2000.
- Papanikos, P., “Mechanics of Mixed Mode Fatigue Behaviour of Cold Worked Adjacent Holes”, thesis for Doctor of Philosophy, University of Toronto, Toronto, 1997.
- Peterson, R. E., “Stress Concentration Factors”, John Wiley & Sons, New York, USA, 1974.
- Residual Stresses, Vishay, Measurements Group, Inc., USA, 1984.
- Schjer, G. S., Flaman, M.T. e al, “Handbook of Measurement of Residual Stresses”, Edit. Jian LU, The Fairmont Press, Inc. United States, 1996.
- Schjer, G. S., “Aplicação de Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements”, Journal of Engineering Materials and Technology, vol. 103, nº4, 1981, pg. 157-163.