

IDENTIFICAÇÃO POR ULTRA-SOM DAS REGIÕES DE TENSÕES TRATIVAS E COMPRESSIVAS NUMA BARRA FLETIDA

Daniel Chauviere do Carmo ¹

Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt ²

Orlando João Agostinho Gonçalves Filho ³

Carlos Alfredo Lamy ⁴

João da Cruz Payão Filho ⁵

Resumo

Há um grande interesse na área de integridade estrutural na utilização de uma técnica não destrutiva capaz de determinar, de forma rápida e eficaz, se um componente estrutural encontra-se em condições de tensão trativa ou compressiva. Sabe-se que as tensões trativas são responsáveis pela propagação de trincas. O objetivo deste trabalho foi avaliar o estado de tensões em uma barra submetida à flexão, utilizando a técnica da birrefringência acústica. Os resultados evidenciaram que a técnica é efetiva, permitindo determinar de forma clara as regiões compressivas das trativas durante o carregamento na barra.

Palavras-chave: Tensões; Ultra-som; Birrefringência acústica; Flexão.

IDENTIFICATION OF TENSILE AND COMPRESSIVE STRESS REGIONS IN A BAR UNDER BENDING

Abstract

The structural integrity area has a great interest in applying nondestructive techniques to identify the tensile and compressive stress regions in a loaded structural component. It is well known that tensile stresses are responsible for cracks propagation. The objective of this work was to evaluate the in-plane bending stresses in a steel bar using the ultrasonic birefringence technique. The results showed that the birefringence technique is able to identify the tensile and the compressive stresses regions in the bending bar.

Key words: Stresses; Bending; Ultrasonics; Acoustic birefringence.

I INTRODUÇÃO

Materiais estruturais são empregados na indústria em geral, podendo muitas vezes alcançar condições de solitação crítica. A resistência mecânica depende, entre outros fatores, do estado de tensão interna do material. O conhecimento do comportamento destas tensões nas estruturas e componentes tem grande importância, devido ao efeito conjunto das tensões residuais com as tensões aplicadas, podendo ocasionar a fratura dos mesmos.

Embora existam diversas técnicas de medição de tensões instaladas em componentes estruturais, tais como a técnica do furo, a neutrografia, e difração de raios X, elas possuem limitações que dificultam sua utilização, despertando o interesse da comunidade científica no desenvolvimento de outros métodos.

Há décadas atrás, foi observado que a velocidade das ondas ultra-sônicas ao passar no interior de um sólido elástico tensionado, não era constante como seria em um sólido isotrópico livre de tensões. Notou-se, também, que esta variação da velocidade da onda-ultrasônica dependia do estado de tensão do material, da direção de propagação da onda em relação aos planos cristalinos, e da direção da movimentação das partículas do meio. Este fenômeno, da variação da velocidade da onda ultra-sônica ao passar através de um material elástico sob tensão, passou a ser chamado de efeito acustoelástico, pela semelhança com o já conhecido efeito fotoelástico da luz.⁽¹⁻²⁾

¹ Engenheiro Mecânico M. Sc., Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia (COPPE/UFRJ), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Enga Metalúrgica e de Materiais, Centro de Tecnologia, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, 21945-970 Rio de Janeiro (RJ), Brasil, (dchauviere@hotmail.com)

² Engenheiro Metalúrgico D.Sc., Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN), Rua Hélio de Almeida 75, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, 21941-906, Rio de Janeiro (RJ), Brasil (bittenc@ien.gov.br)

³ Engenheiro Civil, Ph.D., Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN) (orlando@ien.gov.br)

⁴ Engenheiro Mecânico D.Sc., Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN) (lamy@ien.gov.br)

⁵ Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia (COPPE/UFRJ) (jpayao@metalmat.ufrj.edu.br)

A maior analogia entre a fotoelasticidade e a acustoelasticidade ocorre quando uma onda-ultrasônica cisalhante incide perpendicularmente à superfície de um sólido isotrópico submetido a um estado plano de tensões. Sob tensão o sólido torna-se acusticamente anisotrópico, e a onda incidente é refratada em duas direções, com diferentes ângulos de polarização. Foi observado, também, que na fotoelasticidade, quando a luz incidida é polarizada nas direções de simetria ortotrópica do material, as componentes de onda refratadas caminham juntas apresentando o mesmo ângulo de polarização, e que o mesmo ocorre com as ondas ultra-sônicas.⁽³⁾ Caso contrário, a luz torna-se elípticamente polarizada provocando uma diferença de fase entre as componentes de ondas.

A descrição teórica do efeito acustoelástico, que relaciona a influência do estado de tensão do material à velocidade da onda ultra-sônica, somente foi possível considerando a teoria não linear (deformações finitas) da elasticidade. A literatura⁽⁴⁾ apresenta uma descrição detalhada, mostrando todas as elaborações matemáticas necessárias, para que as equações mostradas fossem estabelecidas.

Na aplicação do ultra-som para medida de tensão utiliza-se o termo da birrefringência ao se empregar ondas cisalhantes e denomina-se birrefringência acústica à diferença fracional da velocidade ou tempo de transito da onda ultra-sônica, em relação a duas direções perpendiculares, como pode ser visto na equação abaixo:

$$B = \frac{V_t - V_l}{\frac{V_l + V_t}{2}} = \frac{t_l - t_t}{\frac{t_l + t_t}{2}} \quad (1)$$

onde V_l e V_t são as velocidades das ondas ultra-sônicas polarizadas em duas direções perpendiculares no material. Como a onda percorre o mesmo espaço no material, nessas duas direções, pode-se trabalhar diretamente com os tempos de percurso das ondas ultra-sônicas (t_l e t_t).

No caso em que a onda ultra-sônica é polarizada nas direções de simetria do material, e as direções das tensões principais coincidem com estas direções de simetria a equação para medida de tensão pela técnica da birrefringência fica:

$$B = B_0 + m(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2)$$

Onde, B é a birrefringência induzida pela textura e pelo estado de tensão do material, B_0 a birrefringência induzida pela textura e m a constante acustoelástica do material.

Nas considerações dos cálculos da mecânica de fratura, existe um grande interesse em saber se um componente estrutural encontra-se sob tensão trativa, pois ela pode ser responsável pelo colapso prematuro do material. Quando um material é submetido à flexão são geradas tensões trativas e compressivas. Este trabalho visa identificar as regiões de tensões trativas e compressivas em uma barra de aço estrutural fletida, utilizando a técnica da birrefringência acústica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foi utilizada a técnica ultra-sônica da birrefringência de ondas cisalhantes de incidência normal no modo

pulso-eco. Ela consiste na medida do tempo de percurso da onda ultra-sônica. Para a obtenção das variações de tempo ao longo da espessura da barra, um único transdutor é usado como emissor/receptor e o sinal aquisitado corresponde a uma sucessão de ecos provenientes da face, oposta a que o transdutor está acoplado.

Foi montado um sistema de aquisição de dados, conforme fluxograma na Figura 1, capaz de gerar e receber as ondas cisalhantes. Estes sinais foram submetidos a um processamento matemático⁽⁵⁾ (correlação cruzada com interpolação), para permitir a exatidão e resolução necessária às medidas do tempo de percurso da onda ultra-sônica.

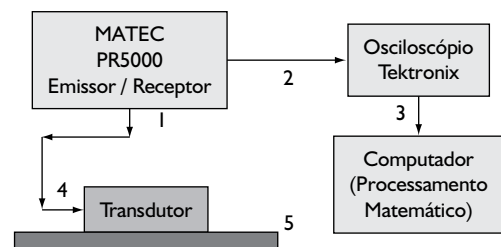


Figura 1. Fluxograma esquemático do sistema ultra-sônico: (1) gerador de pulso (MATEC PR 5000); (2) osciloscópio; (3) computador; (4) transdutor; e (5) corpo-de-prova.

Uma chapa de aço SAE 1045 foi cortada, e o corpo-de-prova utilizado possui o formato de uma barra retangular, que foi usinada de forma que suas faces ficassem paralelas e com acabamento superficial adequado, resultando nas dimensões 900 mm x 93 mm x 45 mm (comprimento x altura x espessura). Foram traçadas regiões definidas ao longo do comprimento da barra (uma região no centro e as outras duas equidistantes em 200 mm do centro da barra). Em cada região, foram marcados pontos para indicar os locais de acoplamento do transdutor, como mostrado na Figura 2. Em cada ponto adquiriu-se dez sinais ultra-sônicos, cinco pares, sendo cada par o conjunto de dois sinais com a polarização do transdutor alinhada na direção longitudinal (x_1) e ortogonal (x_2) da barra (direções de simetria do material).

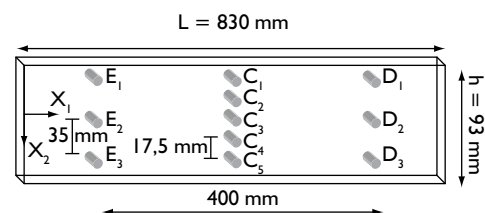


Figura 2. Diagrama do corpo-de-prova.

A barra foi posicionada no equipamento para ensaio de flexão (Figura 3) de modo que ficasse apoiada em dois pontos, distando 830 mm entre si, e foi submetida a um carregamento de 8.000 kg (80% do limite de escoamento da barra) em seu ponto central, por uma célula de carga com diâmetro de 62 mm. Com um transdutor de ondas cisalhantes e incidência normal, com frequência de 5,00 MHz, acoplado nas marcações feitas na barra, foram gerados e adquiridos os sinais ultra-sônicos (que digitalizados fornecem o tempo de percurso da onda-ultrasônica) estando à barra sem carregamento e com carregamento.



Figura 3. Fotografia do sistema ultra-sônico e da barra sendo submetida à flexão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O gráfico da Figura 4 apresenta os valores da birrefringência, na barra antes de ser submetida à flexão, calculados (Equação 1) a partir da medida de tempo realizada em todos os pontos da barra (Figura 2).

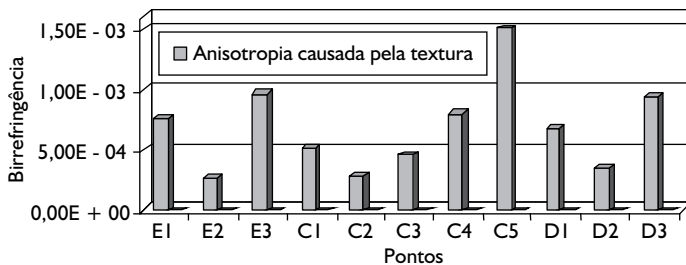


Figura 4. Variação dos valores da birrefringência nos pontos da barra.

Sabe-se que o material como recebido sofreu um processo de conformação mecânica de laminação, e que os laminadores passaram na superfície inferior e superior do material. De acordo com o gráfico da Figura 4, percebe-se que o material é anisotrópico ($B_0 \neq 0$) confirmando que sofreu um processo de conformação mecânica e que esta anisotropia está distribuída de forma heterogênea. Quando o material é conformado às regiões da barra mais próximas dos laminadores sofrem maiores deformações

que as regiões mais afastadas. A técnica da birrefringência acústica foi capaz de identificar essas deformações por “camadas”, onde os pontos mais próximos dos laminadores (E_1, C_1, D_1 e E_3, C_3, D_3) possuem maiores valores de B_0 indicando haver nessas regiões um maior grau de anisotropia

As Figuras dos gráficos 5, 6 e 7 são referentes aos valores da diferença entre a birrefringência acústica antes e durante o carregamento. As barras apresentam essa diferença entre as birrefringências do material nos respectivos pontos da barra.

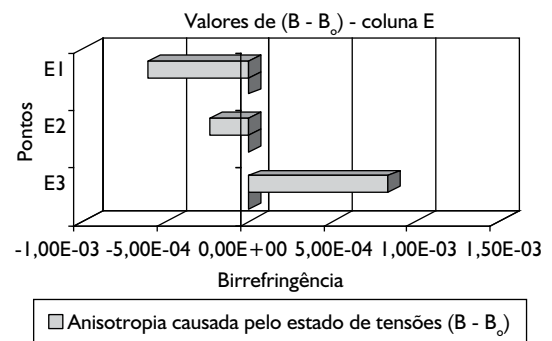


Figura 5. Diferença entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento.

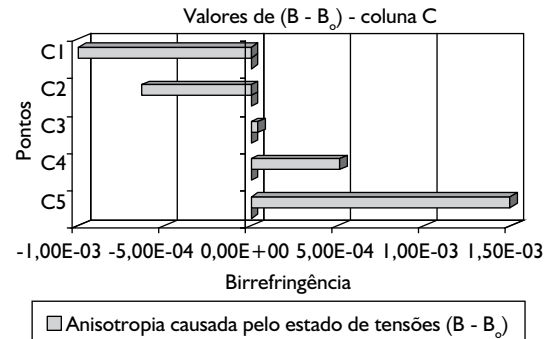


Figura 6. Diferença entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento.

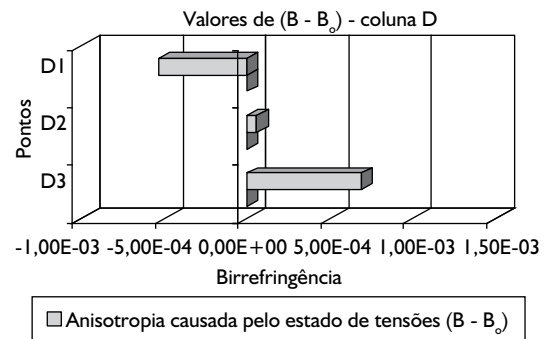


Figura 7. Diferença entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento.

A análise de tensão por ultra-som foi realizada de forma qualitativa por meio da diferença entre B (medidas de tempo tomadas durante o carregamento) e B_0 (medidas de tempo relacionado à textura do material antes do carregamento). Para realizar uma análise quantitativa é necessário levantar a constante acustoeástica (m) do material que não foi objeto de estudo neste trabalho.

Quando a barra é submetida à flexão são geradas tensões trativas e compressivas. As Figuras dos gráficos 5, 6 e 7 mostram que na região de compressão os valores de $B - B_0$ (valores referentes a anisotropia causada somente pelo estado de tensão no material) assumem um valor negativo e na região trativa um valor positivo. Foi observado que na compressão o tempo de percurso da onda ultra-sônica aumenta na direção transversal (t_t) e diminui na direção longitudinal (t_l), resultando em um valor de B negativo. Na região trativa o tempo de percurso da onda ultra-sônica aumenta nas duas direções, porém na direção longitudinal a variação do tempo é bem maior que na direção transversal, fornecendo um valor de B positivo.

A base física desses resultados se encontra a nível microscópico, pois quando uma tensão é aplicada a um sólido causa variações em suas distâncias interatômicas cuja consequência é a alteração na velocidade ou tempo de percurso da onda ultra-sônica. Neste trabalho, na região de compressão os átomos se aproximam facilitando a transmissão da onda, ocasionando em um tempo de percurso menor quando a polarização do transdutor esta alinhada com a direção longitudinal (direção de maior tensão quando a barra é submetida à flexão). Na região de tração os átomos das fibras longitudinais se afastam implicando em um tempo maior de propagação da onda.

Esses comentários parecem concordar com os resultados encontrados por Si-Chaib, Djelouah e Boutkedjirt,⁽⁶⁾ onde foi empregada onda longitudinal ao longo do comprimento (eixo x_1) em uma barra de aço submetida à flexão mostrando que na região compressiva os tempos de percurso da onda chegam adiantados em relação ao material sem carregamento e na região trativo chegam atrasados.

O gráfico da Figura 6 mostra que como o ponto de aplicação da carga ocorreu na coluna C os valores de C_1 e C_5 são os maiores valores de $B - B_0$ (com uma ordem de grandeza a mais que nos outros pontos). Esses resultados estão de acordo com a teoria da resistência dos materiais⁽⁷⁾ para uma barra retangular submetida a esforços de flexão. Além da técnica ultra-sônica identificar as regiões trativa e compressivas, ela também foi capaz de avaliar os pontos de maior tensão.

No caso de uma análise quantitativa é importante observar que quando a barra é submetida a um carregamento transversal, os eixos das direções principais de tensão giram em relação ao sistema de coordenadas originais (escolhidos na direção de simetria do material). Os valores da birrefringência B (e também B_0) foram determinados com os tempos de percurso da onda ultra-sônica obtidos com o transdutor alinhado com as direções x_1 e x_2 (direções de simetria (Figura 2)). Neste caso, devido ao não alinhamento dos eixos das tensões principais com os de simetria do material, é introduzido um erro na avaliação de tensão pela técnica da birrefringência, utilizando a equação 2. Esta situação pode não

ser crítica nos pontos E_1 , E_3 , D_1 e D_3 , em que o ângulo entre as direções principais de tensão e as de polarização das ondas difere de apenas 10° , mas é relevante nos pontos E_2 e D_2 onde este ângulo é de 45° . Os valores dos ângulos, citados acima, podem ser facilmente calculados através da resistência dos materiais, levando em consideração as dimensões da barra, a localização dos pontos e o valor da carga empregada. Um diagrama de momento fletor, também, mostra que na região central (gráfico da Figura 6), as direções principais coincidem com as direções de simetria do material (levando em consideração que o ponto de aplicação da carga pode ser substituído, com boa aproximação, por cargas distribuídas nessa região) e a equação 2 pode ser utilizada.

Na situação em que direções principais não coincidem com as direções de simetria do material, Iwashimizu e Kuobomura⁽⁸⁾ propõe equações da técnica da birrefringência escrita de forma mais geral.

4 CONCLUSÕES

A técnica da birrefringência acústica é um método rápido e não destrutivo de analisar tensões. Neste trabalho ela foi capaz de diferenciar, de forma qualitativa, as regiões das tensões trativas e compressivas, assim como identificar as regiões submetidas às maiores tensões durante o carregamento do corpo-de-prova. Os resultados mostraram que esse método pode auxiliar nos cálculos da mecânica da fratura, mostrando as regiões trativas no material responsáveis pela propagação de trincas. Um estudo na área de tubulações seria interessante, onde dutos instalados em terrenos geologicamente instáveis provocam tensões trativas e compressivas imperceptíveis visualmente.

A birrefringência acústica foi capaz de avaliar a anisotropia da chapa grossa (barra) causada pela deformação devido ao processo de conformação mecânica de laminação.

Agradecimentos

Aos funcionários do IEN, Manoel Antonio da Costa Fonseca, Antonio Geraldo, Paulo Ribeiro Alves e Daniel Martorelli pela ajuda na realização dos experimentos e suporte técnico.

Ao Laboratório de Ultra-som do Instituto de Engenharia Nuclear, onde foi realizada toda a parte experimental do trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 BENSOM, R.W.; RAELSON, V.J. Acoustoelasticity. **Product Engineering**, v. 30, p. 56-9, July 1959.
- 2 CRECRAFT, D.I. Ultrasonic measurement of stresses. **Ultrasonics**, v. 6, n.2, p. 117-21, Apr. 1968.
- 3 SCHNEIDER, E. Ultrasonic birefringence effect: its application for materials characterization. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 22, n.4-5, p.305-23, 1995.
- 4 HUGHES, D. S.; KELLY, J.K. Second order elastic deformation of solids. **Physical Review**, v. 92, n. 5, p. 1145-9, 1953.
- 5 BITTENCOURT, M.S.Q. **Desenvolvimento de um sistema de medida de tempo decorrido na onda ultrassônica e análise do estado de tensões em materiais metálicos pela técnica da birrefringência acústica**. 2000. Tese (Doutorado em Ciências Sociais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro; 2000.
- 6 SI-CHAIB M.O.; DJELOUAH H.; BOUTKEDJIRT T. Propagation of ultrasonic waves in materials under bending forces. **NDT&E International**, v. 38, n. 4, p. 283-9, June 2005.
- 7 TIMOSHENKO, S.P. **Strength of materials**. 2. ed. New York: D. Van Nostrand Company; 1949.
- 8 IWASHIMIZU, Y.; KUOBOMURA, K. Stress-induced rotation of polarization direction of elastic waves in slightly anisotropy materials. **International Journal of Solids and Structures**, v. 9, n. 1, p. 99-114, Jan. 1973.

Recebido em: 18/06/07

Aceito em: 13/09/07

Proveniente de: CONGRESSO ANNUAL DA ABM, 61., 2006, Rio de Janeiro, RJ. São Paulo: ABM, 2006.