

AVALIAÇÃO POR ULTRA-SOM DAS TENSÕES IMPOSTAS POR FLEXÃO EM UMA BARRA DE AÇO¹

Daniel Chauviere do Carmo²

Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt³

João da Cruz Payão Filho⁴

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 a 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.

ULTRASONIC STRESS EVALUATION IN A STEEL BAR UNDER BENDING FORCES

Abstract

The structural integrity area has a great interest to use one non destructive technique to determine if a structural component meets in compressive or tensile stresses. It is well known that tensile stresses are responsible for cracks propagation. The objective of this work was, using ultrasonic birefringence technique, to evaluate the stress state of a bar submitted to bending forces. The results show that the birefringence technique was able to determine the tensile and the compressive stresses regions.

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

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Engenheiro Mecânico M.Sc., Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia (COPPE/UFRJ), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Eng^a Metalúrgica e de Materiais, Centro de Tecnologia, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, 21945-970 Rio de Janeiro (RJ), Brasil, dcarmo@metalmat.ufrj.br

³ Engenheiro Metalúrgico D.Sc., Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN), Via 5, C.P. 68.550, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, 21945-970 Rio de Janeiro (RJ), Brasil, bittenc@ien.gov.br

⁴ Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia (COPPE/UFRJ), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Eng^a Metalúrgica e de Materiais, Centro de Tecnologia, Sala F-210, C.P. 68.505, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, 21945-970 Rio de Janeiro (RJ), Brasil, jpayao@metalmat.ufrj.edu.br

INTRODUÇÃO

Materiais estruturais são empregados na indústria em geral, podendo muitas vezes alcançar condições de sollicitação 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 neutrongrafia e difração de raios-x, elas possuem limitações que dificultam sua utilização, despertando o interesse da comunidade científica no desenvolvimento de outros métodos.

Neste campo de pesquisa a técnica ultra-sônica tem se mostrado bastante consistente, podendo ser aplicada para análise de tensões. Esta técnica baseia-se na variação da velocidade da onda ultra-sônica quando esta percorre o interior de um sólido elástico submetido à tensão.

Nas considerações dos cálculos da mecânica da 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 avaliar o estado de tensão em uma barra de aço estrutural submetido a esse esforço, utilizando a técnica da birrefringência acústica.

REVISÃO TEÓRICA

Quando um meio homogêneo é anisotrópico, um feixe de luz que o atravessa sofre dupla refração, gerando ondas que apresentam diferentes ângulos de polarização. Materiais que apresentam esta propriedade são chamados duplamente refratores ou birrefringentes.^(1,2) A anisotropia do material é causada tanto pela textura, quanto pelo estado de tensões em um sólido elástico.

A velocidade das ondas ultra-sônicas em um meio isotrópico livre de tensões é constante, o mesmo não acontece em materiais anisotrópicos. Essa variação da velocidade da onda ultra-sônica, ao percorrer um material elástico sob tensão é chamada de efeito acustoelástico.

A birrefringência acústica pode ser mais bem explicada usando sua semelhança com a birrefringência óptica. A fotoelasticidade foi investigada em 1816 quando Brewster descobriu o efeito da birrefringência em uma barra de vidro de baixa tensão.

Ele verificou que quando uma luz polarizada penetra um sólido com baixa tensão as ondas geradas possuem a mesma direção de polarização se o feixe de luz incidida for paralelo ao eixo de simetria do material. No caso onde a direção de polarização está a certo ângulo em relação a um dos eixos principais a luz torna-se elipticamente polarizada, provocando uma diferença de fase entre as 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.

Murnaghan incluiu termos de terceira ordem na definição da energia elástica e introduziu as constantes elásticas de terceira ordem (l, m e n que foram chamadas de constantes de Murnaghan). Tendo por base a teoria desenvolvida por Murnaghan em 1937, Hughes e Kelly^(1,3) em 1953 desenvolveram as relações básicas entre velocidade da onda ultra-sônica e a deformação que surge devido à tensão no material onde essa onda se propaga.

A forma simplificada da equação desenvolvida por Hughes e Kelly é representada em termos da variação da velocidade da onda ultra-sônica em relação à tensão e podem ser apresentadas, de maneira genérica, da seguinte forma:⁽⁴⁾

Para ondas cisalhantes,

$$\frac{V_{ij} - V_c^0}{V_c^0} = k_3 \sigma_i + k_4 \sigma_j + k_5 \sigma_k \quad (\text{eq. 1})$$

onde, V_c^0 é a velocidade da onda cisalhante respectivamente no material sem tensão, V_{ij} é a velocidade da onda ultra-sônica propagando na direção i e polarizada na direção j, σ_i , σ_j , σ_k são as tensões principais nas respectivas direções e k_3 a k_5 são chamadas de constantes acustoelástica normalizadas.

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:

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

Onde t_l é o tempo de percurso da onda ultra-sônica com direção de polarização alinhada com a direção de laminação do material, t_t o tempo de percurso da onda ultra-sônica com direção de polarização perpendicular a direção de laminação do material e B é a birrefringência.

Em um material isotrópico, sem efeito da tensão ou textura, a onda ultra-sônica incidindo perpendicularmente ao material, quando polarizada em duas direções perpendiculares retornara ao mesmo tempo ($B = 0$). Porém, quando neste material é aplicada uma tensão isso não ocorre e a equação genérica da onda cisalhante (equação 1), combinada para as duas direções, pode ser expressa da seguinte forma:

$$B = \frac{(V_{31} - V_{32})}{V_c^0} = (k_4 - k_5)(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (\text{eq. 3})$$

Um material ortotrópico é aquele que tem propriedades de simetria elástica com relação a três planos cristalinos. A barra retangular de aço estrutural, que será objeto de estudo neste trabalho possui as direções de simetria com relação aos três planos cristalinos.

Neste caso a tensão cisalhante é igual à zero, o que significa que as direções dos eixos principais coincidem com as direções de simetria ortotrópica do material e a equação para medida de tensão pela técnica da birrefringência fica:

$$B = B_0 + m(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (\text{eq. 4})$$

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

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Na realização da parte experimental deste 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 adquirido corresponde a uma sucessão de ecos provenientes da face, oposta a que o transdutor está acoplado.

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

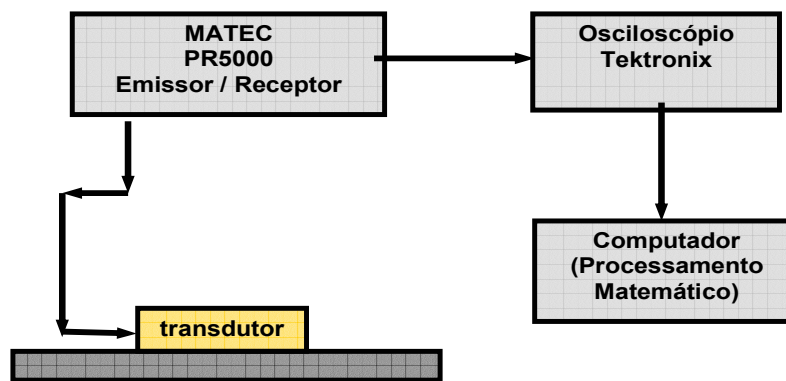


Figura 1. (a) Fluxograma esquemático do sistema ultra-sônico: (1) gerador de pulso, (2) osciloscópio, (3) transdutor, (3) corpo - de - prova, (5) computador

Neste trabalho foi utilizada uma barra de aço SAE 1045. A barra 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 espécime foram marcados pontos para indicar os locais de acoplamento do transdutor, como mostrado na Figura 2. Em cada ponto adquiriu-se 10 sinais ultra-sônico (cinco pares, sendo cada par o conjunto de dois sinais com a polarização do transdutor alinhada e ortogonal a direção longitudinal da

barra), para medida do tempo de percurso da onda ultra-sônica, em duas direções ortogonais.

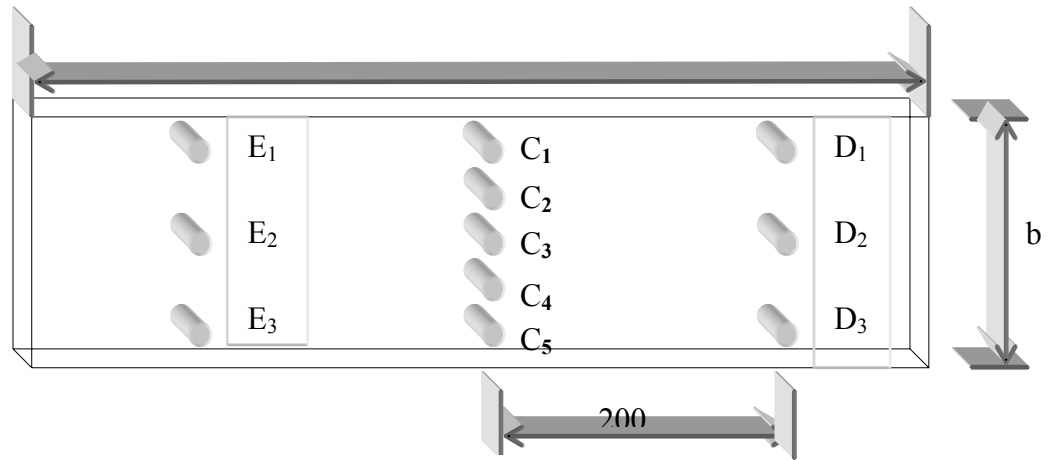


Figura 2. Diagrama do corpo de prova

A barra foi posicionada no equipamento para ensaio de flexão (Figura 3) de modo que ficasse apoiada em dois pontos, distando 800 mm entre si, e foi submetida a um carregamento de 8.000 kg (80% do limite de escoamento da barra) em seu ponto central. Com um transdutor de ondas cisalhantes e incidência normal, com frequência de 5,00 MHz, acoplado nas marcações feitas na barra, foram gerados e aquisitados os sinais ultra-sônicos estando à barra sem carregamento e com carregamento.



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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O gráfico da Figura 4 apresenta os valores da birrefringência, na barra antes de ser submetida à flexão, calculados (equação 6) a partir da medida de tempo realizada em todos os pontos da barra (Figura 2). Os tempos de percurso da onda foram adquiridos com a direção de polarização do transdutor alinhado com a direção longitudinal e perpendicular a esta direção (direções de simetria do material). 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 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 avaliar essas deformações por “camadas” como pode ser visto pelo gráfico da Figura 4, onde os pontos mais próximos dos laminadores (E_1 , C_1 , D_1 e E_3 , C_5 , D_3) possuem maiores valores de B_0 indicando haver nessas regiões um grau de anisotropia maior.

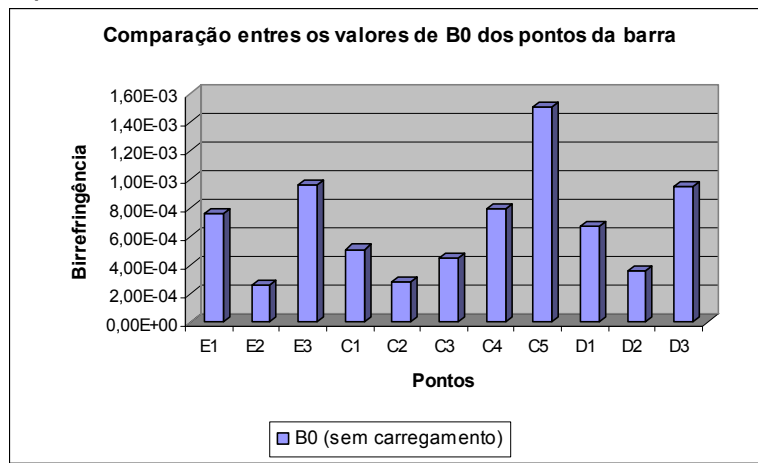


Figura 4. Variação dos valores da birrefringência nos pontos da barra

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

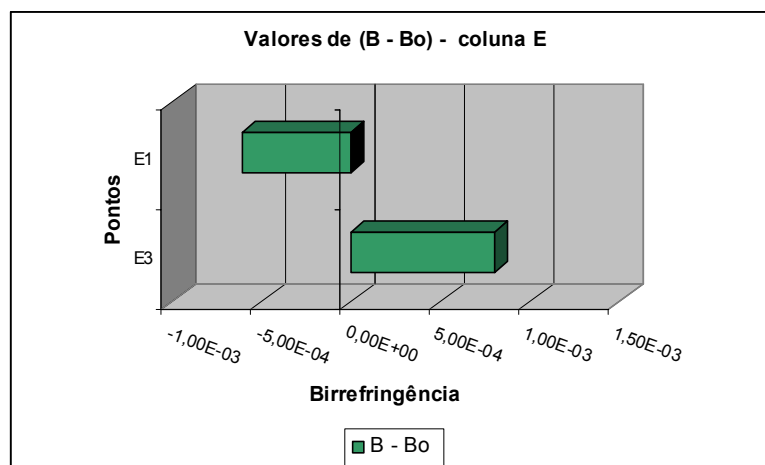


Figura 5. Diferença entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento

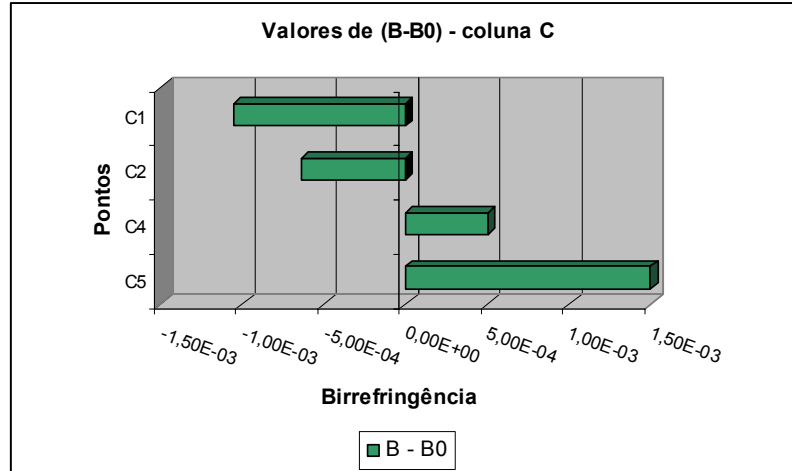


Figura 6. Diferença entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento

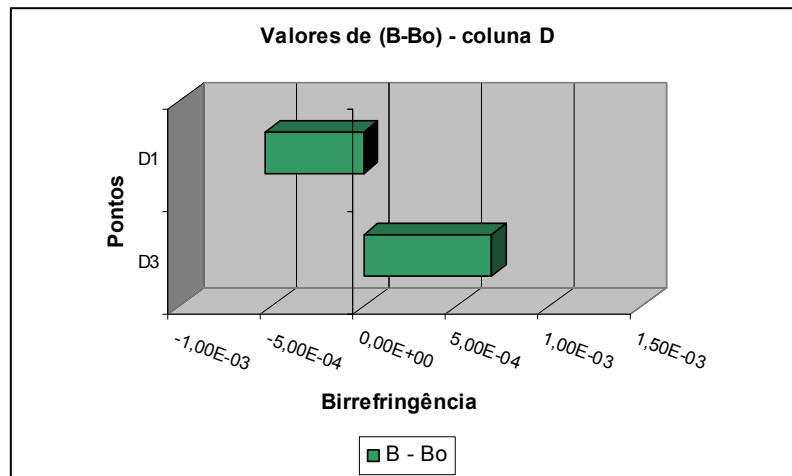


Figura 7. Diferença entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento

Quando a barra é submetida à flexão são geradas tensões trativas e compressivas. Através das medidas de tempo de percurso da onda ultra-sônica antes e durante o carregamento, é possível diferenciar o estado de tensão no material. Na análise de tensão esses tempos são usados para calcular a birrefringência acústica que é a diferença fracional da velocidade ou do tempo de transito da onda ultra-sônica, em relação a duas direções perpendiculares.

A análise de tensão foi realizada de forma qualitativa por meio da diferença entre B (medidas de tempo tomadas durante o carregamento) e B₀ (medidas de tempo relacionado à textura do material antes do carregamento). Para realizar uma análise quantitativa é necessário levantar a constante acustoelástica do material que não foi objeto de estudo neste trabalho.

Quando é realizada a diferença B – B₀ indica que esta sendo retirado o efeito da textura (visto na Figura 4) nos pontos onde as medidas de tempo foram aquisitadas, ficando apenas o valor da anisotropia referente à tensão aplicada. As Figuras 5, 6 e 7 do gráfico acima mostram que na região de compressão os valores de B – B₀ assumem um valor negativo e na região trativa um valor positivo. Esse comportamento era esperado, pois como a propagação da onda se faz por meio de átomos e moléculas, quando o material é comprimido 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. 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 no artigo da referencia,⁽⁶⁾ onde foi empregada onda longitudinal em uma barra 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. No caso deste trabalho, ondas cisalhantes, a diferença fracional do tempo de transito da onda ultra-sônica durante a compressão diminui e na tração aumenta em relação aos valores de B_0 . Assim, quando é realizada a diferença $B - B_0$ resulta nos valores dispostos nos gráficos das Figuras 5, 6 e 7, comprovando a eficácia da análise ultra-sônica na distinção entre os estados de tensão compressivo e trativo.

Teoricamente quando uma barra é submetida a um carregamento no ponto central, como foi realizada neste trabalho, a tensão é distribuída de forma homogênea ao longo do material. Desta forma os pontos da coluna E_1 , E_3 , D_1 e D_3 devem ter o mesmo valor em modulo de $B - B_0$, pois estão simétricos do ponto de aplicação da carga. Porém existe uma variação entres os pontos E_3 e D_1 de aproximadamente $2,7 \text{ E-}04$.

Na teoria o material é considerado homogêneo e isotrópico, porém a Figura 4 mostra que a barra é anisotrópica e heterogênea, assim as tensões podem estar distribuídas de forma heterogênea explicando essa variação. Do ponto de vista prático, quando a barra é fletida, há uma rotação dos eixos de simetria e um novo sistema de coordenadas se estabelece.⁽⁶⁾ Como foi visto na revisão teórica quando a onda é polarizada fora do eixo de simetria ela sofre difração dividindo-se em duas componentes de onda com diferentes polarizações provocando uma diferença de fase entre essas componentes que pode ocasionar uma variação no tempo de percurso da onda.

Essa discussão também serve para explicar as variações que ocorrem entre os pontos C_2 e C_4 , assim como nos pontos C_1 e C_5 que deveriam ser iguais.

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. Além da análise ultra-sônica identificar as regiões trativa e compressivas, ela também foi capaz de avaliar os pontos de maior tensão.

Como já foi comentado, quando a barra é fletida, há uma rotação dos eixos de simetria e um novo sistema de coordenadas se estabelece. Na superfície neutra (pontos E_2 , C_3 e D_2) a rotação dos eixos de simetria é de 45 graus (valor angular calculado na teoria) em relação aos eixos antes da barra ser carregada (que serão chamados de eixos originais). Sendo assim, o gráfico da Figura 8 mostra os valores da diferença de B e B_0 , quando B é calculado com as medidas de tempo aquisitadas na direção longitudinal da barra e ortogonal a esta direção e quando é tomada a 45 graus dos eixos originais. Nos outros pontos da barra optou-se por não girar o transdutor para o novo sistema de coordenadas porque a variação angular em relação às coordenadas originais era pequena (entre 3 a 7 graus).

As barras em vermelho representam a diferença de $B - B_0$ e as barras em marrom a diferença entre $B (45 \text{ graus}) - B_0$.

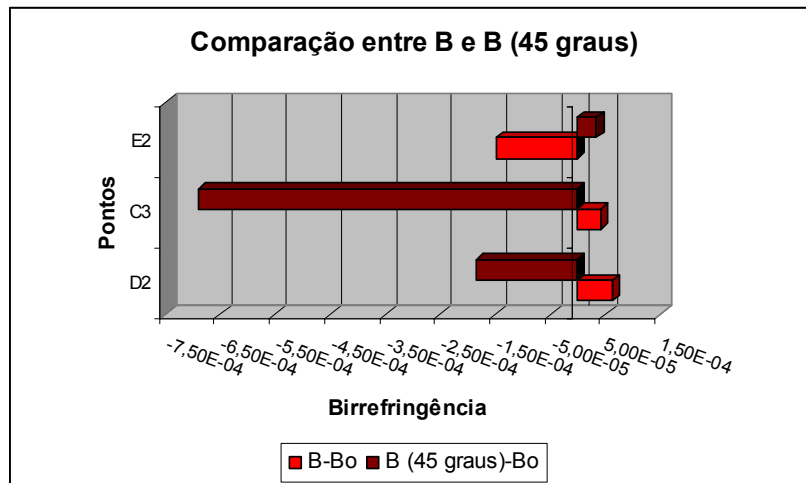


Figura 8. Valores da diferença entre as birrefringências

O valor da diferença da birrefringência ($B 45 \text{ graus} - B_0$) deveria ser igual entre esses pontos, porém essa situação não foi encontrada. Mostrando que não foi possível encontrar as direções principais através de cálculos teóricos. No caso de $B - B_0$, já era esperada uma variação entre esses pontos, pois o efeito da difração da onda incidente provocaria diferenças de fase entre as componentes da onda de $\frac{1}{2}$ comprimento de onda. Uma diferença de fase dessa magnitude provoca uma interferência destrutiva entre elas. Uma forma de encontrar a direção principal durante o carregamento seria girar o transdutor sobre a peça aquisitando os sinais ultra-sônicos, o sinal que chegar com menor tempo será a direção procurada.^(4,7)

CONCLUSÕES

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

A técnica da birrefringência acústica foi capaz de identificar as tensões trativas e compressivas, assim como, identificar as regiões de maiores tensões no material mesmo sem conhecer o valor da tensão.

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 estagiário Alcides, pela ajuda que prestou no processamento dos sinais.

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

REFERÊNCIAS

- 1 Bittencourt, M.S.Q., Desenvolvimento de um Sistema de Medida de Tempo Decorrido na Onda Ultra-Sônica e Análise do Estado de Tensões em Materiais Metálicos pela Técnica da Birrefringência Acústica. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.
- 2 SEARS, F. W., ZEMANSKY, M. W., Física-Calor, Ondas e Ótica, v.2, 6 ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1981
- 3 HUGHES, D. S., KELLY, J.K., Second Order Elastic Deformation of Solids, Physical Review, v. 92, n. 5, pp. 1145-1149, 1953.
- 4 SCHNEIDER, E., Ultrasonic Birefringence Effect-Its Application for Materials Characterizations. Fraunhofer-Institute for Nondestructive Testing, Bldg 37, D-66123 Saarbrücken, Germany.
- 5 Méd. O. Si-Chaib., H. Djelouah., T. Boutkedjirt., Propagation of Ultrasonic Waves in Materials Under Bending Forces NDT&E Int 2004.
- 6 TIMOSHENCO, S. P., Resistência dos Materiais, v.1, 3 ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1971.
- 7 Bittencourt, M.S.Q., Lamy, C.A., Payão, J.C., Determinação da Direção de Laminação de Aços e Ligas de Alumínio Por Ultra-som, In Anais do Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos, Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, pp 41-47, 29 de setembro a 01 de outubro 1997.