

Método da Birrefringência Acústica para Avaliação de Anisotropia em Materiais

Ana Cláudia B. Rezende¹, Sílvio L. Vieira²

¹Escola de Eng. Elétrica e de Computação – Universidade Federal de Goiás (UFG) – Goiânia – GO – Brasil

²Instituto de Física – Universidade Federal de Goiás (UFG) – Goiânia – GO – Brasil

anacbrz@gmail.com, slvieira@ufg.br

Abstract. *There is great interest in the use of non-destructive techniques to analyze the integrity of structural components. This work aims to identify the structural anisotropy by means of the ultrasonic technique of acoustic birefringence in two solid materials that were submitted to a symmetry break. The oscilloscope was used as a data acquisition system in conjunction with computational implementation for acoustic birefringence calculations. On average, for points outside the junction between the acrylic bars, it has been found a difference of 95.23% in relation to the value obtained in the zone of rupture. Thus, demonstrating the potential of the method for analysis of anisotropy in materials.*

Resumo. *Há grande interesse na utilização de técnicas não destrutivas para análise da integridade de componentes estruturais. Este trabalho tem por objetivo identificar a anisotropia estrutural por meio da técnica ultrassônica da birrefringência acústica em dois materiais sólidos que foram submetidos a uma quebra de simetria. O osciloscópio foi utilizado como sistema de aquisição de dados em conjunto com implementação computacional para os cálculos de birrefringência acústica. Em média, para pontos fora da junção entre as barras de acrílico, foi encontrada uma diferença de 95,23% em relação ao valor obtido na zona de ruptura. Assim, demonstrando o potencial do método para análise de anisotropia em materiais.*

1. Introdução

Os processos de fabricação comumente geram tensões internas em materiais. Na indústria, a avaliação de tensões residuais em estruturas é de grande importância por fornecer informações importantes acerca da integridade da estrutura avaliada. As tensões residuais influenciam em características importantes como a resistência e o funcionamento dos elementos estruturais. A soldagem, por exemplo, é um processo que gera tensões devido a contração e expansão desiguais no cordão de solda, na zona termicamente afetada (ZTA) e no metal de base. Em materiais isotrópicos o processo de soldagem introduz uma quebra de simetria no meio, alterando assim as propriedades locais do meio. Existem vários métodos qualitativos e quantitativos de determinação de tensões residuais. De modo geral, tais métodos podem ser divididos em métodos destrutivos e métodos não destrutivos.

Dentre os métodos não destrutivos, destaca-se a técnica ultrassônica. Desde 1929, quando Sokolov, na antiga União Soviética, propôs a utilização da técnica do ultrassom por transmissão para encontrar falhas ocultas em materiais, os testes não destrutivos empregando ultrassom em materiais têm se desenvolvido. Em 1958, Benson e Raelson descobriram o fenômeno da birrefringência acústica, por meio de observações da variação da velocidade da onda transversal conforme sua polarização coincidia ou era perpendicular a tensão aplicada. Desde então, vários métodos foram propostos para análise de tensões residuais em materiais metálicos pela técnica da birrefringência acústica [Bittencourt, 2000], [Lamy *et al.*, 2002], [Ortega, *et al.*, 2003], [Alves, *et al.*, 2012]. Em polímeros termoplásticos tal como o polimetilmetacrilato (PMMA) ou simplesmente acrílico, a técnica da birrefringência acústica também pode ser aplicada [Zhu *et al.*, 2015].

Explorar novas aplicações para a técnica da birrefringência acústica é algo motivador, por se tratar de um procedimento relativamente simples, prático e que pode ser executado de forma rápida. Assim, o estudo de anisotropia estrutural em materiais, tais como aço e resinas termoplásticas, sujeitos a quebra de simetria poderão proporcionar novos horizontes para o emprego dessa técnica em outras áreas como a Medicina. No entanto, para o sucesso dessa abordagem, a aquisição e processamento dos dados são de extrema importância. Processos esses que podem ser realizados empregando um simples osciloscópio e via implementação computacional.

2. Materiais e Métodos

2.1 Birrefringência Acústica

Quando uma onda ultrassônica se move numa determinada direção em um meio elástico, a sua velocidade de propagação depende, fundamentalmente, das constantes elásticas de segunda ordem do meio e, portanto da sua simetria estrutural. A presença de um estado de tensões elásticas produz pequenas mudanças na velocidade de propagação (fenômeno conhecido como efeito acustoelástico [Hughes; Kelly, 1953]). A velocidade de propagação da onda ultrassônica passa a depender também das constantes elásticas de terceira ordem. Consequentemente é possível avaliar o estado de tensões da região percorrida pela onda medindo a sua velocidade de propagação.

Na aplicação do ultrassom 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 trânsito da onda ultrassônica, em relação a duas direções perpendiculares, como pode ser visto na Equação (1).

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

em que B é o índice de birrefringência acústica, V_l e V_t são as velocidades da onda ultrassônica se propagando na mesma direção e polarizadas em direções perpendiculares entre si. Como a onda percorre o mesmo espaço no material, nessas duas direções, pode-se trabalhar diretamente com os tempos de propagação de onda (t_l e t_t).

No caso em que a onda ultrassônica é polarizada nas direções de simetria do material, e as direções das tensões principais coincidem com estas direções de simetria a Equação (2) representa a equação para medida de tensão pela técnica da birrefringência:

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

em que B_0 é a birrefringência induzida pela textura, associada a leves diferenças nos módulos de cisalhamento nas direções mutuamente perpendiculares, m a constante acustoelástica do material, e σ_1 e σ_2 são componentes da tensão residual.

2.2 Método Experimental

O sistema de aquisição de dados foi montado conforme fluxograma da Figura 1, capaz de gerar, receber e processar as ondas de cisalhamento.

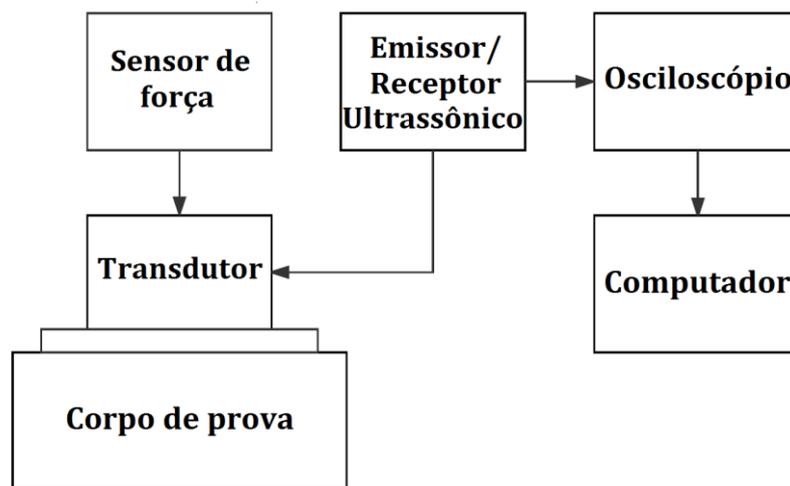


Figura 1. Fluxograma do sistema ultrassônico utilizado para aquisição dos sinais.

O arranjo experimental foi composto por um transdutor de contato de ondas cisalhantes e incidência normal (V110-RM, Panametrics, MA, USA) de 5,0 MHz, e diâmetro de 12,7 mm. O transdutor foi conectado a um emissor/receptor de pulsos ultrassônicos (Pulser/Receiver 5072PR, Olympus, PA, USA) via cabo coaxial apropriado, e aos corpos de prova. Um sensor de força (Pasco, Economy Force Sensor, CI-6746) foi utilizado para medir a pressão aplicada ao transdutor, de modo a garantir que todas as medidas fossem realizadas sobre as mesmas condições de pressão. Adotou-se o valor de $(7,00 \pm 0,03)$ N de pressão para as medições. Os sinais provenientes do transdutor foram visualizados e adquiridos por um osciloscópio (TDS2024C, Tektronix, OR, USA). A base de tempo do osciloscópio foi ajustada para trabalhar em alta taxa de resolução temporal, da ordem de 2,5 ns, de modo a adquirir o tempo de voo da onda ultrassônica com alta precisão. Posteriormente os sinais foram digitalizados, fornecendo o tempo de percurso da onda, possibilitando assim calcular a birrefringência acústica via implementação computacional.

Uma barra de aço de $[(245,00 \pm 0,05) \text{ mm} \times (75,00 \pm 0,05) \text{ mm} \times (9,00 \pm 0,05) \text{ mm}]$ (comprimento x altura x espessura) foi cortada ao meio, tendo em seguida as suas faces novamente unidas por meio de soldagem elétrica. Assim, o primeiro corpo de prova

utilizado possui o formato de uma barra retangular, que foi usinada de forma que suas faces ficassem paralelas e com a superfície devidamente polida. Em seguida, foram demarcadas regiões ao longo do comprimento da barra, sendo uma no centro (na solda) e as outras dez equidistantes da região central. Em cada região, foram marcados pontos para indicar os locais de acoplamento do transdutor, como ilustrado na Figura 2.

O segundo corpo de prova empregado foi uma barra retangular de acrílico, de dimensões $[(139,00 \pm 0,05) \text{ mm} \times (29,00 \pm 0,05) \text{ mm} \times (10,00 \pm 0,05) \text{ mm}]$ (comprimento \times altura \times espessura), de faces planas paralelas e superficiais polida. Como no corpo de prova anterior, também foi realizada uma ruptura e junção no centro da barra. Definiram-se regiões ao longo do comprimento da barra, estando uma região no centro e as outras seis equidistantes, representadas de forma semelhante ao que foi mostrado na Figura 2.

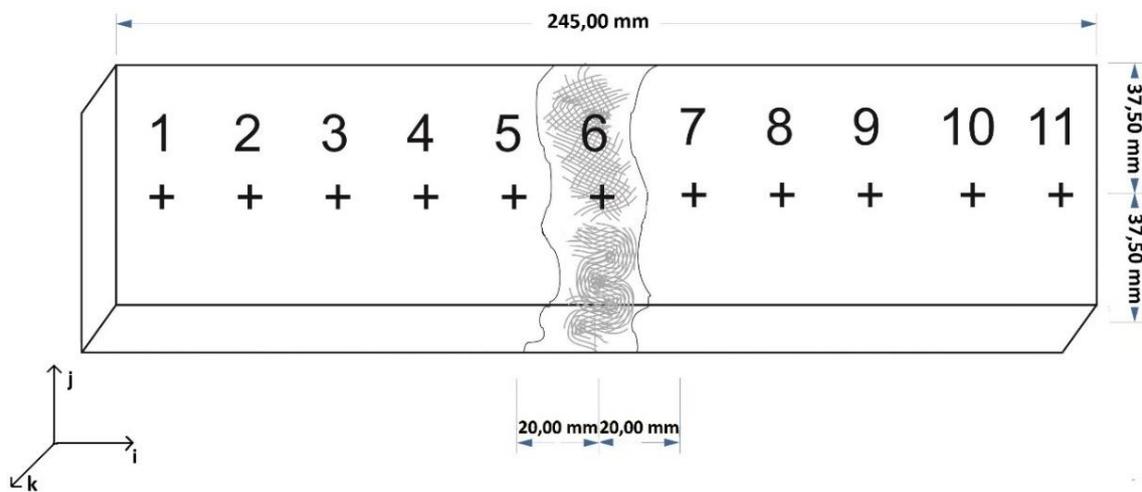


Figura 2. Diagrama do corpo de prova de aço.

Para cada ponto foram realizadas oito medições, quatro na direção longitudinal ($V_l = V_{kj}$) e outras quatro na direção ortogonal ($V_t = V_{ki}$) da barra.

3. Resultados

Na Figura 3 podemos observar o sinal original da onda de ultrassom se propagando na barra de aço. Na figura é possível visualizar nitidamente o pulso de excitação e os dois ecos consecutivos.

Na Figura 4, foi ilustrada uma ampliação do maior pico de amplitude do primeiro eco, empregando a resolução temporal de 2,5 ns. O algoritmo foi programado para extrair a amplitude máxima dessa porção do sinal, o qual foi correlacionado com o tempo de propagação da onda no meio.

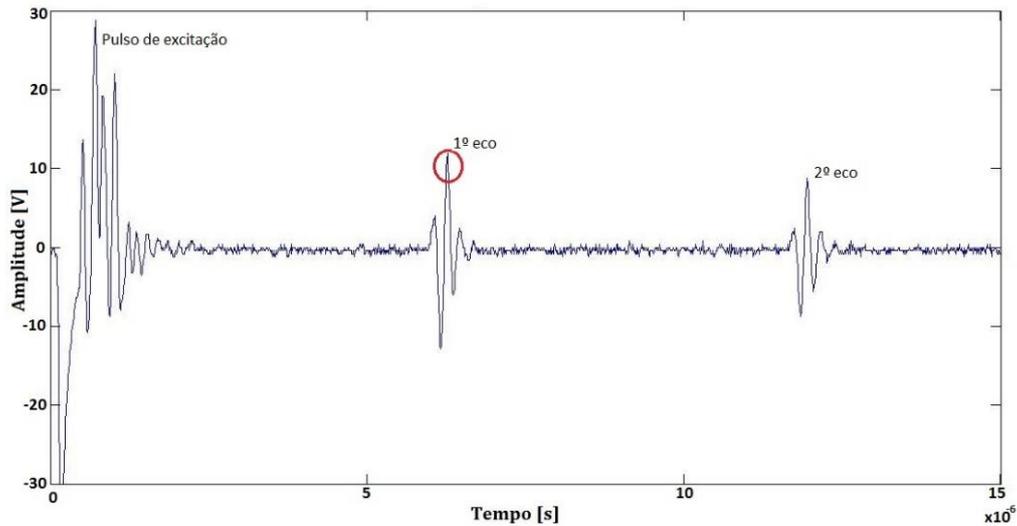


Figura 3. Sinal original do ultrassom visualizado na tela do osciloscópio.

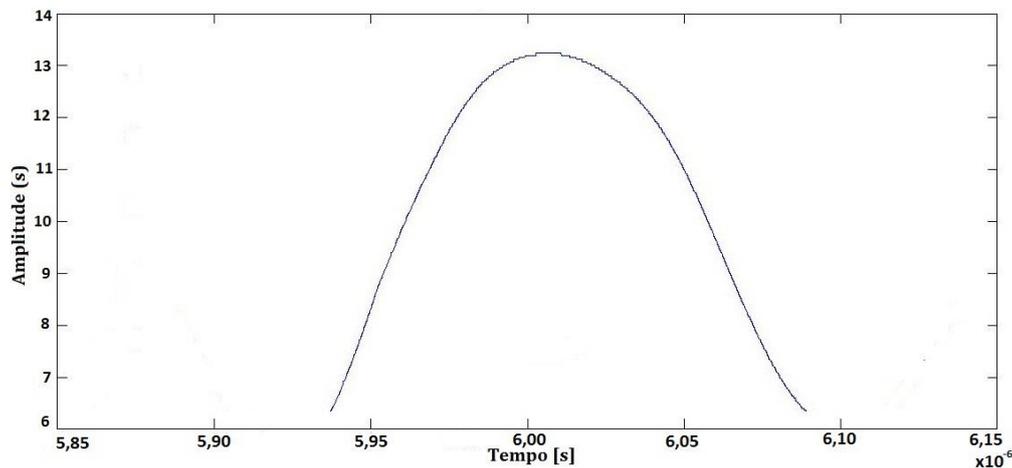


Figura 4. Sinal ampliado do pico de interesse (maior amplitude do primeiro eco).

3.1 Birrefringência Acústica no aço

Na Tabela 1 foi apresentado os resultados dos tempos de propagação das ondas cisalhantes nas duas polarizações em cada ponto da placa de aço e sua respectiva birrefringência acústica. O tempo resultante foi estimado do valor médio das quatro medidas realizadas para cada polarização em cada ponto de referência.

Uma análise qualitativa dos pontos na barra de solda permite observar na Figura 5, no ponto 6 (na solda), uma importante anisotropia estrutural. Isto ocorre devido ao cordão de solda, que gerou tensões trativas no material. Nos demais pontos os índices de birrefringência obtidos foram menos expressivos, isto devido a influência do cordão de solda, porém com menor intensidade. Além da anisotropia inerente ao material (B_0) foi introduzida uma quebra de simetria no meio através da ruptura do material e posterior consolidação do mesmo por meio da soldagem. A média dos índices de birrefringência acústica para os pontos fora do cordão de solda foi de -0,0013, enquanto na região da

solda o índice de birrefringência atingiu -0,0100, resultando em uma diferença percentual de 87,00%.

Tabela 1. Tempo de percurso das ondas ultrassônicas cisalhantes com direção de polarização ortogonal (t_{ki}) e longitudinal (t_{kj}) no aço e índice de birrefringência acústica (B).

Pontos	Tempo de percurso longitudinal (t_{ki}) [μ s]	Tempo de percurso ortogonal (t_{kj}) [μ s]	Birrefringência Acústica (B)
1	6,1431	6,1387	-0,0007
2	6,1554	6,1407	-0,0024
3	6,1557	6,1380	-0,0029
4	6,1456	6,1364	-0,0015
5	6,0887	6,0852	-0,0006
6	6,0631	6,0027	-0,0100
7	6,1184	6,1031	-0,0025
8	6,1329	6,1291	-0,0006
9	6,1409	6,1377	-0,0005
10	6,1315	6,1282	-0,0009
11	6,1402	6,1353	-0,0008

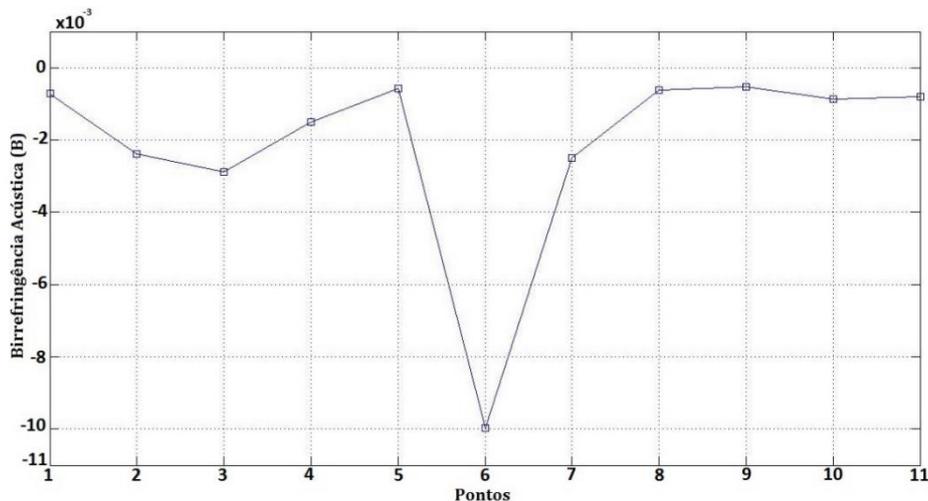


Figura 5. Birrefringência acústica na barra de aço.

3.2 Birrefringência Acústica no acrílico

Na Tabela 2 encontra-se descrito os resultados obtidos para o corpo de prova de acrílico.

A resposta no acrílico foi apresentada graficamente na Figura 6, em que observou-se um comportamento similar ao encontrado no aço. Por exemplo, no ponto 4 (região referente à junção entre as peças de acrílico) obteve-se o maior índice de birrefringência acústica. Isso ocorre devido as tensões trativas oriundas do processo de ruptura do acrílico e depois união do mesmo. Nos outros pontos avaliados foram encontrados índices de birrefringência menos expressivos, demonstrando influência pouco significativa do que

ocorreu no ponto 4 no restante do corpo de prova. A média dos índices de birrefringência acústica para os pontos fora da junção entre as peças de acrílico foi de $-0,0002$, enquanto na região da junção o índice de birrefringência atingiu o valor de $-0,0042$, resultando assim, em uma diferença percentual de $95,23\%$.

Tabela 2. Tempo de percurso das ondas ultrassônicas cisalhantes com direção de polarização ortogonal (t_{ki}) e longitudinal (t_{kj}) no acrílico e índice de birrefringência acústica (B).

Pontos	Tempo de percurso longitudinal (t_{ki}) [μs]	Tempo de percurso ortogonal (t_{kj}) [μs]	Birrefringência Acústica (B)
1	1,5431	1,5431	0,0000
2	1,5522	1,5537	-0,0010
3	1,5423	1,5419	0,0003
4	1,5446	1,5511	-0,0042
5	1,5453	1,5448	0,0003
6	1,5445	1,5452	-0,0005
7	1,5455	1,5465	-0,0006

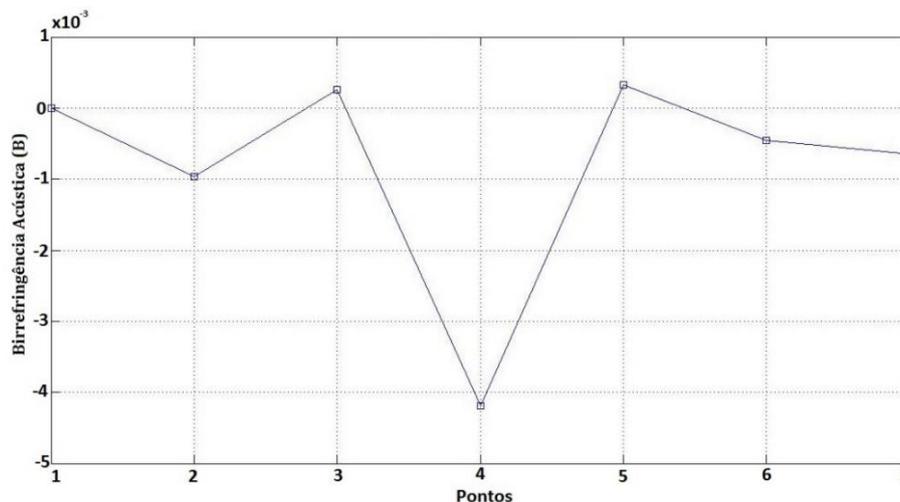


Figura 6. Birrefringência acústica na barra de acrílico.

Assim, por meio da técnica de birrefringência acústica pode-se avaliar propriedades mecânicas microestruturais. No presente estudo, não foi possível fazer uma avaliação do material no estado antes da soldagem, impossibilitando uma estimativa precisa da influência da birrefringência referente a textura (B_0). Apesar disso, os resultados apresentados demonstraram que a técnica ultrassônica empregada permite avaliar e quantificar a anisotropia estrutural por meio do índice de birrefringência acústica, e se encontra em concordância com outros trabalhos na área [Ortega *et al.*, 2003].

7. Conclusões

O emprego do osciloscópio em conjunto com implementação computacional para estimativa da birrefringência acústica mostrou-se satisfatório e uma ferramenta rápida de análise. O nível de incerteza no processo de coleta do tempo de voo da onda ultrassônica foi da ordem de $\pm 0,80$ ns. O índice de birrefringência acústica obtido para o aço e para o

acrílico apresentou uma diferença percentual de 87,00% e 95,23%, respectivamente, entre a região de maior anisotropia e os demais pontos.

A técnica da birrefringência acústica mostrou-se eficiente para análise da anisotropia estrutural de materiais isotrópicos. Demonstrando o potencial do ultrassom como ferramenta não invasiva e inócua ao operador, na detecção de falhas nos materiais analisados. A metodologia aqui abordada forneceu informações importantes para futuros cálculos de campos de tensões residuais.

8. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás – UFG pela infraestrutura. A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), edital 05/2012, num. 10267001199 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), edital MCTI/CNPq 14/2014, num. 46229820140 pelo apoio financeiro. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da EMC/UFG.

9. Referências

- Bittencourt, M. S. Q., (2002) “Desenvolvimento de um Sistema de Medida de Tempo Decorrido da Onda Ultrassônica e Análise do Estado de Tensões em Materiais Metálicos pela Técnica da Birrefringência Acústica”, dissertação de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.
- Lamy, C. A., Payão Filho, J. C., Bittencourt, M. S. Q., e Areas V. L. F. (2002) “Avaliação por Ultra-som do Tratamento Térmico para Alívio de Tensões”, VI Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos e XXI Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos, 19 a 21 de ago. de 2002, 10 pp., Salvador - BA, Brasil.
- Ortega, L. P. C., Lamy, C. A., Bittencourt, M. S. Q., Maraes, M. M., e Payão Filho, J. C. (2003) “Avaliação por Ultra-som do Tratamento Térmico de Alívio de Tensões em Componente Industrial”, III Conferência Pan - Americana de Testes Não Destrutivos (PANNDT), 02 a 06 de junho de 2003, 8pp., Rio de Janeiro-RJ, Brasil.
- Alves, D. S., Albuquerque, M. C. S., Farias, C. T. T., Araújo, M. S. S., Santos, Y. T. B. (2012) “Determinação de Tensões Residuais em Aços Carbono Através da Técnica de Birrefringência Acústica”, XXX Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção (ConaEnd) e 16ª Conferência Internacional sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida de Equipos Industriales (IEV).13 pp., São Paulo – SP, Brasil.
- Zhu, Q., Burtin, C., Binetruy, C., Poitou, A., (2015) “Residual Stress Determination With Acoustic Birefringence in Slightly Anisotropic Polymers”, GeM (Institut de recherche en génie civil et mécanique), CNRS UMR 6183, Ecole Centrale de Nantes, 44321 Nantes, France.
- Hughes, D. S., Kelly, J. K., (1953) “Second order elastic deformation of solids”, Physical Review, v. 92, n. 5, p. 1145-9.