

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA ANISOTROPIA DO AÇO ASTM A-131 ATRAVÉS DA TÉCNICA DE BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA

Lucas Gabriel de Sousa Albuquerque, lucasgsalbuquerque@gmail.com¹

Francisco Ferreira Barbosa Junior, ferreira11@outlook.com¹

Paola Evelyn Costa Baia, paolabaia@hotmail.com¹

Ednelson da Silva Costa, ednelson@ufpa.br²

Jorge Teófilo de Barros Lopes, teofilo@ufpa.br¹

Eduardo de Magalhães Braga, edbraga@ufpa.br¹

¹Universidade Federal do Pará. Faculdade de Engenharia Mecânica, Belém, PA, Brasil,

²Universidade Federal do Pará. Faculdade de Engenharia Industrial, Abaetetuba, PA, Brasil,

Resumo: A anisotropia do material é um fenômeno que permite determinar algumas propriedades mecânicas do mesmo. No caso dos aços laminados, essa anisotropia é caracterizada pela orientação preferencial dos grãos na sua direção de laminação. Neste contexto, é de extrema importância determinar o comportamento dessa anisotropia acústica ao longo do volume do material, isto é, verificar se essa anisotropia se comporta de forma homogênea ou heterogênea e, para tal objetivo, empregou-se a técnica de birrefringência acústica em amostras do aço ASTM A-131. Os resultados mostraram, com base em análises estatísticas, que a anisotropia se comporta de forma heterogênea ao longo do volume do material em estudo.

Palavras-chave: Anisotropia, Birrefringência acústica, Análise de variância.

1. INTRODUÇÃO

A anisotropia, caracterizada pela orientação preferencial dos grãos em chapas de aço laminado, permite caracterizar o mesmo mecanicamente, na medida em que esse material apresenta maior resistência mecânica na sua direção de laminação. E para estudar essa anisotropia existem várias técnicas, umas delas é a técnica ultrassônica não destrutiva, denominada de birrefringência acústica. Esta técnica se baseia no efeito acustoelástico, que é o fenômeno da variação da velocidade da onda ultrassônica em função da tensão ou da textura presente no material (Bittencourt, 2000). Para medir a variação da velocidade da onda corretamente, é necessário ter uma medida com alta precisão, em nanossegundos, do tempo de percurso em que a onda ultrassônica percorre o material (Bittencourt, 2000).

A birrefringência acústica, descoberta por (Benson, et al., 1959), a partir da teoria acustoelástica desenvolvida por Murnaghan, (1951) e, posteriormente, aplicada por Hughes, et al. (1953) é uma técnica rápida que utiliza um transdutor de onda cisalhante que atua como transmissor e receptor dessa onda. O transdutor polariza a onda cisalhante de modo que o movimento das partículas seja perpendicular à direção da propagação da onda. Na utilização da birrefringência acústica, a onda é polarização em duas direções ortogonais entre si. Quando essa polarização coincide com a direção de laminação do material, no caso do aço, a velocidade da onda é (Benson, et al., 1959). A birrefringência indica a anisotropia do material em relação à onda ultrassônica, a qual é calculada pela Eq. (1) (Benson, et al., 1959; Hirao, et al., 1994; Costa, et al., 2017). Nesta equação, V_l é a velocidade da onda ultrassônica cisalhante com a direção de polarização alinhada com a direção de laminação (DL), V_t é a velocidade da onda ultrassônica cisalhante com a direção de polarização transversal a de laminação (DT), t_l é o tempo de percurso da onda ultrassônica com a direção de polarização alinhada com a DL do material e t_t o tempo de percurso da onda ultrassônica com a direção de polarização perpendicular à DL.

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

A partir dos valores de birrefringência acústica do material (B) obtidos dos tempos médios de propagação da onda nas direções longitudinal e transversal, realizou-se uma análise estatística, utilizando-se o ANOVA (Análise de Variância). Este é um ensaio estatístico das médias dos resultados de dois ou mais grupos para saber se os elementos pertencentes a esses grupos são iguais, dentro de um intervalo de confiança pré-determinado (Montgomery, et al. 2009).

Cabe ressaltar que, que homogeneidade ou heterogeneidade da distribuição da anisotropia do material influencia suas propriedades mecânicas.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a análise da birrefringência acústica foi utilizado uma chapa retangular do aço estrutural ASTM A-131, com dimensões de 1200 x 800 x 9,50 mm, com uma variação dimensional de 0,6 mm ao longo da espessura. O material é específico para a construção naval ou *off-shore*, classificado conforme o percentual de carbono, como aço de baixo teor de carbono e baixa liga. A chapa de aço é ilustrada esquematicamente na Figura 1. Desta chapa foram usinadas amostras com dimensões 400 x 200 x 9,5 mm, obtendo-se um total de 9 (nove), onde em cada amostra foram marcados 36 (trinta e seis) pontos, conforme se observa na Fig. 2.

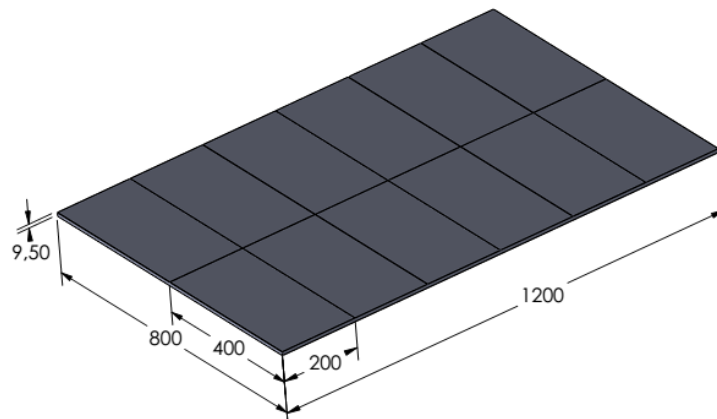


Figura 1. Imagem ilustrativa da chapa com seus respectivos cortes (dimensões em mm).

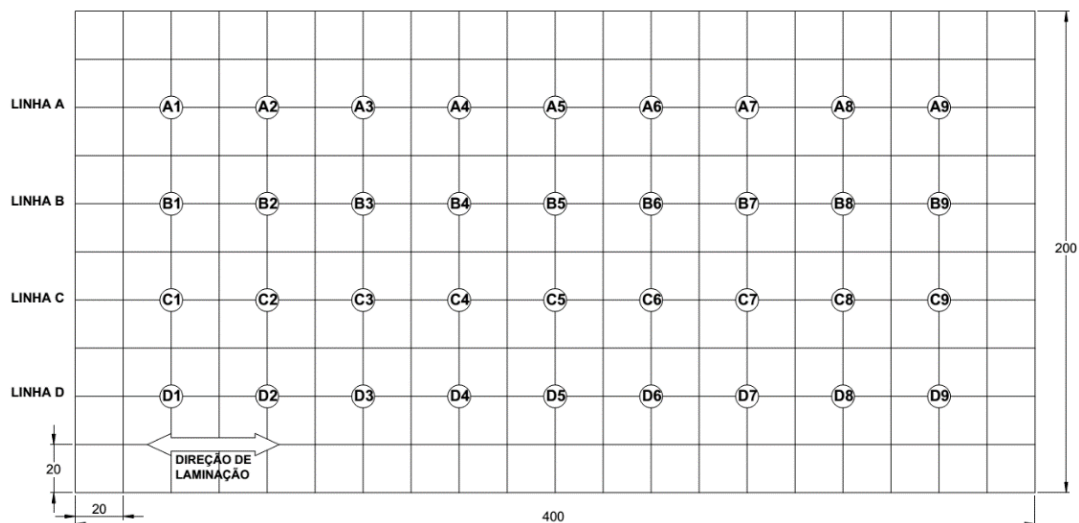


Figura 2. Imagem ilustrativa de uma amostra apresentando os pontos de medição e a direção de laminação (Dimensões em mm).

Para a determinação da anisotropia através da birrefringência acústica foi utilizado um sistema de captura de sinais ultrassônicos (Fig. 3), que medisse a velocidade ou tempo de percurso da onda cisalhante normal à espessura do material. O sistema ultrassônico consistiu de um aparelho de ultrassom (gerador de pulso) que, através da técnica de inspeção pulso eco, fez-se a análise. Utilizou-se também um osciloscópio com uma frequência de amostragem de 350 MHz e taxa de amostragem de 2,5 GS/s; um transdutor ultrassônico piezoeletrico de onda transversal e incidência normal de 12,7 mm de diâmetro e frequência nominal de 5 MHz; um filtro eletrônico redutor de tensão de duas saídas (uma de baixa tensão para o osciloscópio e outra de alta tensão para o transdutor ultrassônico). E, por último, o *software* desenvolvido pelo Instituto de Engenharia Nuclear - IEN do Rio de Janeiro, escrito na plataforma *LabView*, que utiliza a correlação cruzada e interpolação nos sinais ultrassônicos para obtenção do tempo de percurso da onda com maior precisão, instalado em um notebook para visualização do sinal.

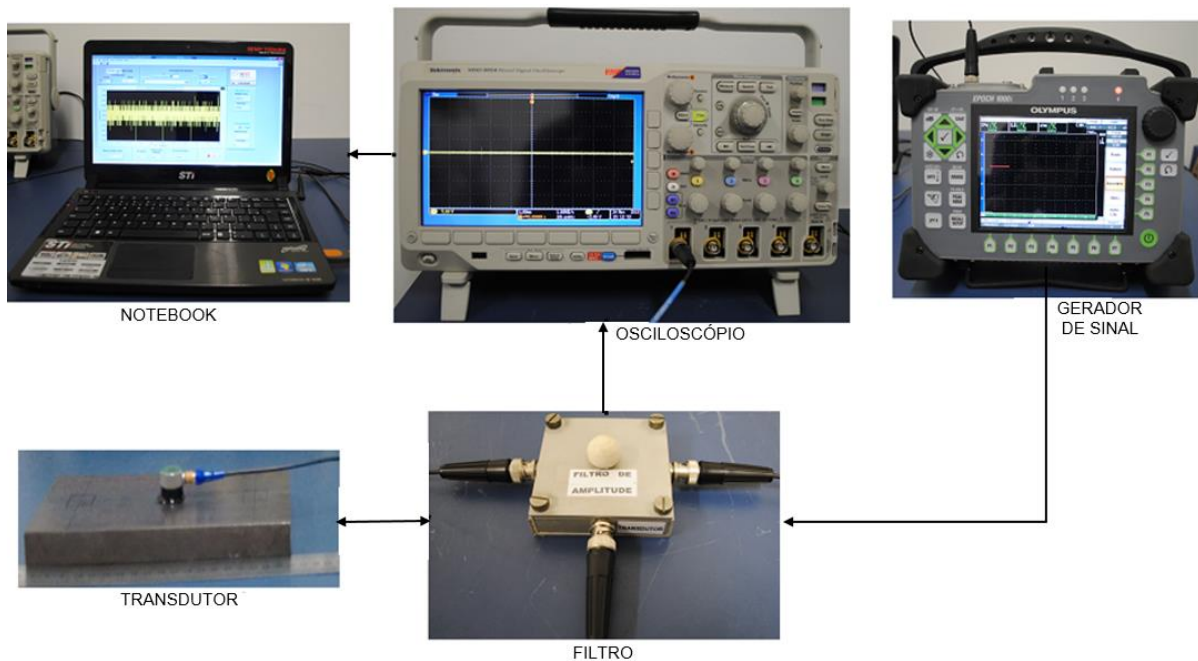


Figura 3. Sistema ultrassônico utilizado na captura do tempo de percurso da onda ultrassônica.

Para a determinação da birrefringência acústica do material, em cada um dos pontos (Fig. 2), foi medido o tempo de percurso da onda cisalhante, ora com a direção de polarização da onda na direção de laminação do material, ora na direção transversal a esta. Em cada ponto, foi calculada a média aritmética entre os 20 (vinte) tempos de percurso obtidos em cada direção. De posse da média dos tempos de percurso em cada direção analisada, foi calculada a birrefringência de cada ponto com o uso da Equação 1, gerando 36 (trinta e seis) valores de birrefringência para cada amostra.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

São mostras a seguir as tabelas 1 e 2 contendo os 36 (trinta e seis) valores de tempos médios obtidos das nove amostras nas direções, longitudinal e transversal a de laminação, seguido de um gráfico (Fig. 4) criado para uma melhor análise. Na Figura 4, as siglas L.A-DL e L.A-DT significam medições em pontos da linha A, nas direções longitudinal e transversal, respectivamente. Além disso, o eixo x, representado pelos valores de zero a nove indicam os pontos analisados, espaçados de 40 em 40 mm e o eixo y indica o tempo de percurso da onda em cada ponto.

Tabela 1: Média entre os tempos médios (ns) obtidos das nove peças na direção de laminação.

Tabela 1: Média entre os tempos médios (ns) obtidos das nove peças na direção de laminação.

Tempos Médios na Direção Longitudinal (ns)				
Pontos	Linha A	Linha B	Linha C	Linha D
1	6250,22	6252,61	6251,45	6251,17
2	6250,74	6252,80	6251,00	6251,81
3	6252,27	6254,24	6252,14	6253,05
4	6251,72	6253,55	6252,64	6252,41
5	6248,98	6249,48	6248,16	6247,37
6	6253,24	6253,22	6253,66	6252,30
7	6254,95	6256,02	6256,36	6254,29
8	6251,74	6253,94	6253,32	6252,42
9	6249,29	6251,58	6251,69	6249,77
Média	6251,46	6253,05	6252,34	6251,62
D. Padrão	1,91	1,82	2,22	2,02

Tabela 2. Média entre os tempos médios (ns) obtidos das nove peças na direção transversal a de laminação.

Tempos Médios na Direção Transversal (ns)				
Pontos	Linha A	Linha B	Linha C	Linha D
1	6287,66	6289,74	6288,77	6287,99
2	6288,84	6290,92	6289,01	6289,73
3	6289,13	6291,68	6289,21	6290,20
4	6288,62	6290,56	6289,70	6289,37
5	6286,51	6287,46	6285,47	6284,57
6	6289,89	6290,68	6290,48	6289,45
7	6291,88	6293,42	6293,73	6291,69
8	6289,56	6292,33	6291,40	6290,82
9	6286,84	6289,04	6288,61	6287,32
Media	6288,77	6290,65	6289,60	6289,02
D. Padrão	1,65	1,78	2,24	2,13

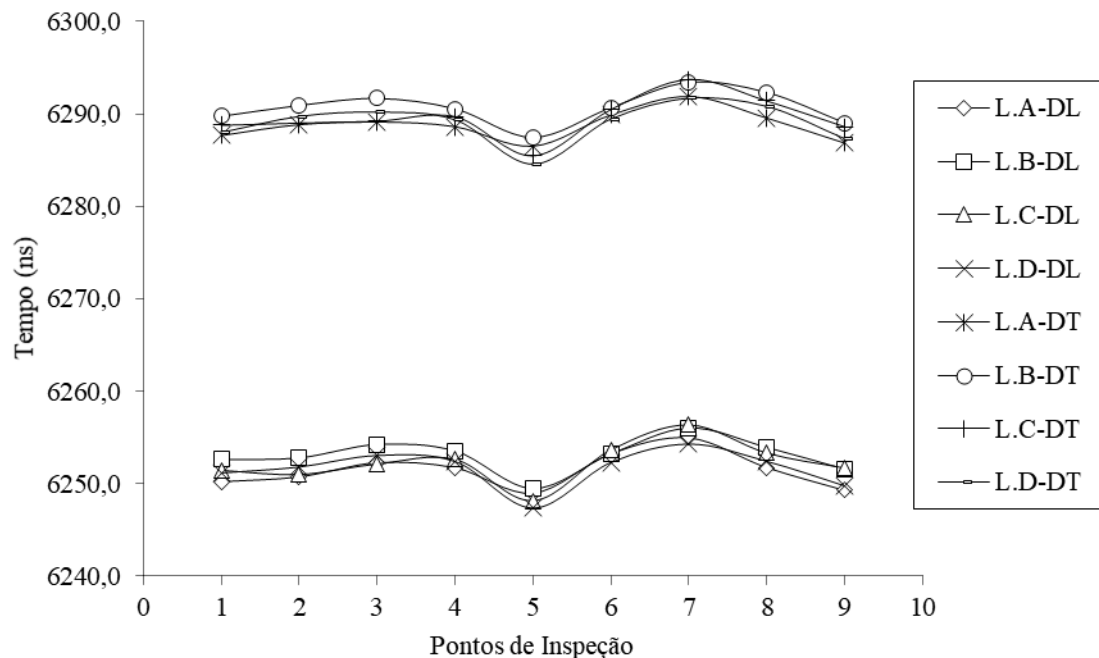


Figura 4. Distribuição dos 36 (trinta e seis) tempos médio de percurso da onda ultrassônica polarizada nas direções longitudinal e transversal ao longo do material.

Como pode ser observado nas tabelas 1 e 2 e reforçado pela Fig. 4, o tempo médio na direção de laminação é menor que o tempo médio transversal, característica de material laminado, como o aço, ou seja, a velocidade da onda cisalhante é maior na direção de laminação deste tipo de material. A diferença de tempo entra as duas direções indica que existe uma anisotropia acústica no material que pode estar relacionada tanto com uma tensão residual pré-existente no material quanto pela sua textura, sendo que esses dois fatores influenciam na mesma ordem de grandeza a velocidade da onda (Benson, et al., 1959).

Com os tempos médios longitudinal e transversal das Tabelas 1 e 2 e com o uso da Equação 1, mostram-se na Tabela 3, os 36 (trinta e seis) valores médios de birrefringência (B).

Tabela 4. Birrefringências acústicas distribuídas ao longo do material (B).

Pontos	Linha A	Linha B	Linha C	Linha D
1	5,973E-03	5,921E-03	5,952E-03	5,872E-03
2	6,077E-03	6,078E-03	6,062E-03	6,047E-03
3	5,878E-03	5,967E-03	5,912E-03	5,923E-03
4	5,884E-03	5,901E-03	5,909E-03	5,895E-03
5	5,988E-03	6,059E-03	5,954E-03	5,936E-03
6	5,843E-03	5,972E-03	5,871E-03	5,925E-03
7	5,886E-03	5,960E-03	5,956E-03	5,962E-03
8	6,031E-03	6,121E-03	6,072E-03	6,124E-03
9	5,991E-03	5,974E-03	5,888E-03	5,991E-03
Desvio Padrão		7,507E-05	<u>BMédio</u>	5,965E-03

Os resultados de birrefringências são mostrados graficamente na Fig. 5. Nesta figura são apresentados gráficos de pontos, em que cada ponto localiza a linha e a região onde o tempo de percurso da onda foi medido, consequentemente, a anisotropia. O eixo x indica os pontos analisados e o eixo y corresponde aos valores de birrefringências.

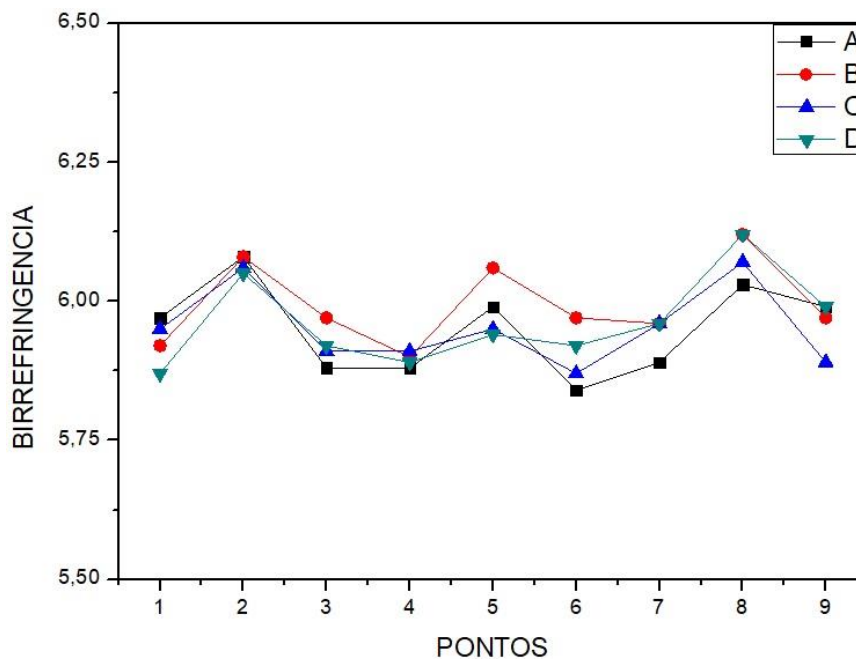


Figura 5. Variação de B0 ao longo do material.

De acordo com a Fig. 5, observa-se que não há uma homogeneidade nos resultados de birrefringências. Isso pode estar relacionado textura variável ao longo do material, ou também por tensões residuais presentes no material, visto que o mesmo foi submetido a tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT), entretanto, pressupõe-se que as tensões residuais sejam mínimas na medida em que as amostras ao serem usinadas ocorre alívio de tensões.

Embora se observe visualmente uma distribuição não homogênea da birrefringência, não foi possível afirmar de forma precisa se esses valores médios de birrefringências eram diferentes mesmos, um em relação ao outro, portanto, coube a análise estatística através do ANOVA determinar ou não a homogeneidade ou heterogeneidade desses valores. Para isso, utilizou-se nessa análise um grau de confiança de 95% ou de incerteza de 5%. Os resultados dessas análises são mostrados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5. Resultados das análises estatísticas das linhas A, B, C e D do material.

Anova: fator único						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Linha A	9	5,36E-02	5,95E-03	6,41E-09		
Linha B	9	5,40E-02	5,99E-03	5,45E-09		
Linha C	9	5,36E-02	5,94E-03	5,07E-09		
Linha D	9	5,37E-02	5,97E-03	6,29E-09		
Anova						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos (MQG)	1,12E-08	3	3,73E-09	6,42E-01	5,94E-01	2,9
Dentro dos grupos (MQR)	1,86E-07	32	5,81E-09			
Total	1,97E-07	35				

Tabela 6. Resultados das análises estatísticas dos pontos 1 a 9.

Anova: fator único						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Ponto 1	4	0,0237	0,0059	1,91E-09		
Ponto 2	4	0,0243	0,006	2,05E-10		
Ponto 3	4	0,0237	0,0059	1,35E-09		
Ponto 4	4	0,0235	0,0059	1,11E-10		
Ponto 5	4	0,0239	0,0059	2,93E-09		
Ponto 6	4	0,0236	0,0059	3,27E-09		
Ponto 7	4	0,0238	0,0059	1,33E-09		
Ponto 8	4	0,0243	0,0061	1,94E-09		
Ponto 9	4	0,0238	0,0059	2,43E-09		
Anova						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos (MQG)	1,51E-07	8	1,89E-08	10,97	9,71E-07	2,31
Dentro dos grupos (MQR)	4,64E-08	27	1,72E-09			
Total	1,97E-07	35				

Com base no teste F realizado pelo ANOVA, o qual é a razão da variação entre os grupos e a variação dentro dos grupos dos valores analisados e com a finalidade de estimar se existe diferenças entre os mesmos, determinou-se o valor de F calculado e comparou-se com o tabelado fornecido pelo programa Excel. Se o valor de $F_{\text{calculado}}$ for menor que o de F_{tabelado} os valores analisados são considerados iguais estatisticamente. Nesse contexto, pela Tabela 5, ou seja, resultados obtidos ao longo das linhas, verifica-se que o valor de $F_{\text{calculado}}$ (circulado) foi menor do que o valor de F_{tabelado} ($F_{\text{crítico}}$), assim como, o valor- P , (probabilidade de significância) que foi maior do que o nível de significância adotado, isto é, de 5%. Estes resultados obedeceram aos critérios estatísticos adotados e, portanto, implicam a afirmar que a hipótese de nulidade (H_0) seja aceita, ou seja, não há evidências de diferença significativa entre tratamentos (entre os valores), ao nível α de significância escolhido. Assim, afirma-se que os valores de birrefringências analisados paralelamente à direção de laminação do material apresentam um comportamento homogêneo, estatisticamente.

Analisando-se os valores de birrefringências, transversalmente à direção de laminação, verifica-se pela Tabela 6 que o valor de $F_{\text{calculado}}$, também circulado foi maior do que o F_{tabelado} e o valor- P foi menor do que a incerteza de 5% adotada, estes resultados implicaram em afirmar que a hipótese de nulidade (H_0) foi rejeitada, ou seja, existem evidências de diferença significativa entre pelo menos um par de médias de tratamentos nessa direção analisada, ao nível α de significância escolhido. Portanto, baseado nos resultados das análises estatísticas foi comprovado que o material apresentou na direção transversal, uma distribuição heterogênea da anisotropia acústica.

4. CONCLUSÃO

A técnica de birrefringência acústica foi capaz de identificar a anisotropia presente no material em estudo e com a análise estatística dos resultados de birrefringências, comprovou-se que o material possui uma distribuição da anisotropia acústica homogênea paralela a direção de laminação do material, porém heterogênea na direção transversal à direção de laminação e isto, provavelmente, implica em propriedades mecânicas diferentes nas duas direções.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFPA em especial, ao LCAM, que nos proporcionou os equipamentos e assistência necessária para a realização desse trabalho. Também agradecem ao Instituto de Engenharia Nuclear pelo fornecimento do programa para aquisição dos sinais ultrassônicos.

6. REFERÊNCIA

- Benson, R. W., Raelson, V. J., 1959. "Acoustoelasticity. Product Engineering", v. 30, n. 29, p. 56-9.
- Bittencourt, M. S. Q., 2000. "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". Tese de Doutorado. Tese de D. Sc., COPPE/UF RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Costa, E. S., et al, 2017. "Residual stresses in cold-wire gas metal arc welding. Science and Technology of Welding and Joining", v. 22, n. 8, p. 706 – 713.
- Hirao, M., Ogi, H., and Fukuoka, H., 1994. "Advanced ultrasonic method for measuring rail axial stresses with electromagnetic acoustic transducer," *Res. Nondestruct. Eval.*, vol. 5, no. 3, pp. 211-223.
- Hughes, S., Kelly, J. L., 1953. "Second-order elastic deformation of solids. Physical review", v. 92, n. 5, p. 1145.
- Montgomery, D. C.; Runger, G. C., 2009. "Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros". 4 ed. Editora LTC.
- Murnaghan, F.D, 1951. "Finite Deformation of an Elastic Solid", Wiley, New York.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ANISOTROPY BEHAVIOR ANALYSIS OF THE ASTM A-131 STEEL THROUGH ACOUSTIC BIREFRINGENCE TECHNIQUE

Lucas Gabriel de Sousa Albuquerque, lucasgsalbuquerque@gmail.com¹

Francisco Ferreira Barbosa Junior, ferreira11@outlook.com¹

Paola Evelyn Costa Baia, paolabaia@hotmail.com¹

Ednelson da Silva Costa, ednelson@ufpa.br²

Jorge Teófilo de Barros Lopes, teofilo@ufpa.br¹

Eduardo de Magalhães Braga, edbraga@ufpa.br¹

¹Federal University of Pará, Department of Mechanical Engineering, Belém, PA, Brazil,

²Federal University of Pará, Department of Industrial Engineering, Abaetetuba, PA, Brazil

Abstract. The anisotropy is a phenomenon that allows determining some mechanical properties of the materials. In the case of rolled steels, the anisotropy is characterized by the preferential orientation of the grains in their rolling direction. In this context, it is extremely important to determine the behavior of this acoustic anisotropy along the material volume, that is, to verify if the anisotropy behaves homogeneous or heterogeneous, and for this purpose, the acoustic birefringence technique was used in ASTM A-131 steel samples. The results showed, based on statistical analysis, that the anisotropy behaves is heterogeneously along of the material studied volume

Keywords: Anisotropy, Acoustic birefringence, Variance analysis.