

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA INTENSIDADE DO RUÍDO DE GRÃO EM IMAGENS ULTRASSÔNICAS

Paulo Pereira Junior, ppj@fem.unicamp.br¹
Auteliano Antunes dos Santos Junior, aute@fem.unicamp.br¹
Vanessa Vieira Gonçalves, vanessa.vieira@fem.unicamp.br¹

¹Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Rua Mendeleev, 200 - Cidade Universitária, Campinas - SP, 13083-860

Resumo: Imagens geradas a partir de ondas ultrassônicas constituem uma importante ferramenta na detecção de defeitos de forma não destrutiva em componentes mecânicos. Entretanto, a presença de ruído de grão, ou estrutural, pode dificultar a detecção de tais defeitos. O ruído de grão está relacionado à microestrutura do material inspecionado e pode ser utilizado também com a finalidade de caracterização da microestrutura do material. Em ensaios ultrassônicos, a temperatura é um fator importante que muitas vezes deve ser considerado nas inspeções. A influência da temperatura na velocidade da onda ultrassônica é bastante conhecida, contudo, para imagens, não apenas a velocidade de onda constitui um fator importante, como também a amplitude dos sinais, em especial a do ruído de grão. O objetivo deste trabalho é verificar a influência da temperatura na relação sinal-ruído (RSR) em imagens ultrassônicas. A RSR é calculada com base na amplitude do sinal de fundo na amostra e na amplitude média do ruído de grão. As imagens ultrassônicas são geradas pelo Total Focusing Method (TFM) para uma amostra de aço API 5L X70, usado na fabricação de dutos e tubos para a indústria petroquímica. Os resultados mostram que o valor da RSR aumenta linearmente com o aumento da temperatura da amostra. A taxa de variação da RSR em função da temperatura permite a correção de valores de RSR medidos em diferentes temperaturas, possibilitando a correta comparação de valores medidos.

Palavras-chave: Ultrassom, Temperatura, Total Focusing Method

1. INTRODUÇÃO

A inspeção de componentes mecânicos por meio de *arrays* ultrassônicos tem se tornado bastante comum. *Arrays* ultrassônicos são sondas formadas por múltiplos elementos piezelétricos acionados por uma unidade controladora que permite controlar de forma independente a emissão e recepção de ondas ultrassônicas de cada um dos elementos. Através da utilização de *arrays* ultrassônicos, é possível gerar imagens do componente inspecionado, o que permite uma melhor detecção e caracterização de defeitos se comparada à utilização de transdutores formados por apenas um elemento, com a geração de sinais do tipo *A-scan*.

Dentre as técnicas de obtenção de imagens por meio de *arrays*, o *Total Focusing Method* (TFM) se destaca. Pelo TFM, a intensidade de cada pixel na imagem gerada é resultado do somatório das amplitudes de todas as formas de onda gravadas pelo *array* para as posições correspondentes à localização do pixel na amostra. Nesse processo de sucessivas somas reside a principal vantagem do TFM, que é a de reduzir ruídos elétricos de natureza randômica na imagem gerada (Holmes *et al.*, 2005). Com isso, a sensibilidade para detecção de defeitos menores aumenta.

A microestrutura do material inspecionado tem influência significativa no nível de ruído em sinais ultrassônicos. O ruído relacionado à microestrutura do material é conhecido como ruído de grão, ou estrutural. O ruído de grão é gerado quando a onda ultrassônica é espalhada pela fronteira dos grãos e outras não uniformidades microestruturais (Yalda *et al.*, 1996). Dependendo do material ou microestrutura, o ruído de grão pode encobrir o sinal relacionado a possíveis defeitos presentes no componente inspecionado.

Apesar da presença de ruído de grão ser um inconveniente na detecção de defeitos por ultrassom, ela pode, por outro lado, ser uma importante ferramenta para a caracterização da microestrutura do material. Nesse sentido, o ruído de grão funciona como uma assinatura da microestrutura do material. Autores têm relacionando o ruído de grão com o tamanho médio de grão (Williams e Goebbels, 1981; Saniie e Bilgutay, 1986; Panetta *et al.*, 2014) e formato do grão (Li *et al.*, 2014).

Em técnicas ultrassônicas baseadas na medição de velocidade de onda, a temperatura pode interferir de forma considerável nos resultados das medições. A relação entre temperatura e velocidade de onda ultrassônica longitudinal se mostra linear em metais para temperaturas variando entre 15 e 35 °C (Fraga *et al.*, 2008; Santos *et al.*, 2010). A não correção dos efeitos da temperatura na velocidade da onda ultrassônica pode resultar em erros de interpretação de medidas. Apesar da influência da temperatura na velocidade de ondas ultrassônicas ser bem documentada na literatura, não há trabalhos relacionadas à influência da temperatura em imagens ultrassônicas.

O objetivo deste trabalho é verificar a influência da temperatura na intensidade do ruído de grão em imagens geradas por *arrays* ultrassônicos. A intensidade do ruído de grão foi avaliada através de uma relação sinal-ruído (RSR) estabelecida entre o sinal das ondas refletidas no fundo das amostras e o sinal de ruído de grão nas imagens geradas pelo TFM. Uma amostra de aço API 5L X70 foi usada para o estudo. Esse aço é comumente utilizado na fabricação de dutos e tubos para a indústria petroquímica. Realizando medições de RSR em diferentes temperaturas da amostra, foi possível estabelecer uma relação entre os dois parâmetros.

2. IMAGENS ULTRASSÔNICAS

Para a geração de imagens pelo TFM é necessária a gravação das formas de onda de todas as combinações de pares de elementos transmissores e receptores de onda do *array*. Para isso, o controlador do *array* deve ser configurado para emitir com um elemento da sonda e gravar os sinais recebidos por todos os seus elementos. Após a gravação dos sinais, deve ser disparado o próximo elemento do *array* e novamente devem-se armazenar os sinais de todos os elementos. Esse processo de captura de sinais é conhecido como *Full Matrix Captue* (FMC).

Pelo TFM, sendo $\mathbf{r}$ o vetor posição de um pixel qualquer na imagem que se queira gerar, $\mathbf{r}_{e_T}$ e $\mathbf{r}_{e_R}$ vetores que representam as posições de um elemento atuando como transmissor e elemento receptor, respectivamente, a intensidade da imagem do pixel localizado em $\mathbf{r}$ é dada por (Wilcox *et al.*, 2007):

$$I(\mathbf{r}) = \left| \sum_{e_T=1}^N \sum_{e_R=1}^N h_{e_T, e_R} \left(\frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{e_T}| + |\mathbf{r}_{e_R} - \mathbf{r}|}{c} \right) \right| \quad (1)$$

onde c é a velocidade da onda no material e $h_{e_T, e_R}(t)$ é a amplitude da onda em função do tempo captada pelo elemento e_R (receptor) quanto o elemento e_T transmite a onda no instante t .

Nota-se pela Eq. (1) que a intensidade de cada pixel na imagem gerada é resultado do somatório das amplitudes de todas as formas de onda gravadas para as posições correspondentes à localização do pixel na amostra. Nesse processo de sucessivas somas, com dito, a sensibilidade para detecção de defeitos menores aumenta, e, para a aplicação deste trabalho, as imagens se mostram mais sensíveis ao ruído de grão com a redução do ruído elétrico. Em um primeiro momento, pode-se apontar como desvantagem o custo computacional de se gravar e processar N^2 formas de onda; entretanto, esse inconveniente vem sendo reduzido com o aumento constante das velocidades de processamento e redução de custos computacionais.

Para quantificar a intensidade do ruído de grão nas imagens optou-se pela relação sinal-ruído (RSR) entre o sinal de fundo e o ruído de grão. O RSR é calculado em decibéis usando a relação entre o valor máximo de intensidade na imagem do sinal de fundo e a raiz do valor quadrático médio (*root mean square*, ou RMS) da intensidade do ruído de grão em uma região determinada na amostra inspecionada. Sua equação pode ser escrita como:

$$RSR = 20 \log_{10} \left(\frac{\hat{I}_{SF}}{I_{RMS}} \right) \quad (2)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{1}{N_r} \right) \sum_{\mathbf{r}} [I(\mathbf{r})]^2} \quad (3)$$

onde $\hat{I}_{SF}$ é o valor máximo de intensidade da imagem de TFM do sinal de fundo e I_{RMS} é o valor RMS do ruído de grão da imagem do interior da peça, dado pela Eq. (3), onde N_r é o número de pixels definido para a imagem de TFM e $\mathbf{r}$ é o vetor que indica a posição de cada pixel na imagem. As imagens de TFM são calculadas, usando a Equação (1), a partir das formas de onda obtidas pelo *array* usando o FMC.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma barra do aço API 5L X70 de dimensões 760 x 70 x 10 mm foi utilizada como amostra. O aço API 5L é especialmente empregado na fabricação de dutos utilizados pela indústria petrolífera, sendo os tipos X65, X70 e X80 os mais utilizados atualmente.

O sistema de medição para obtenção das imagens a partir dos sinais provenientes da sonda de *array* é composto pela própria sonda, por uma unidade controladora e um computador pessoal. Essa unidade é responsável pela emissão e recepção dos sinais para cada um dos elementos da sonda, pela conversão analógico/digital dos sinais e pela sincronização de acionamento dos elementos, dentre outras funções. A unidade utilizada conta com 64 canais e a sonda linear utilizada apresenta 64 elementos, com frequência central de 5 MHz. As dimensões dos elementos da sonda de *array* são mostradas na Fig. 1.

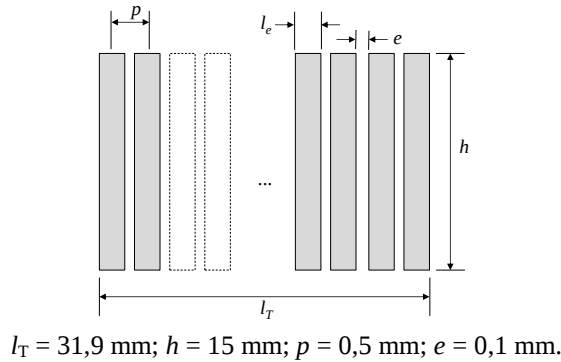


Figura 1. Principais dimensões dos elementos da sonda de *array*.

Para medição de temperatura das amostras durante os ensaios, foi utilizado um termopar do tipo K conectado a um módulo condicionador de sinais para termopar e conversor analógico/digital com frequência de amostragem de 14 amostras por segundo e resolução de 24 bits. A conexão entre o módulo e o controlador embarcado é feita via rede Ethernet. Na Fig. 2 está representado o desenho esquemático para o sistema de medições com *array*.

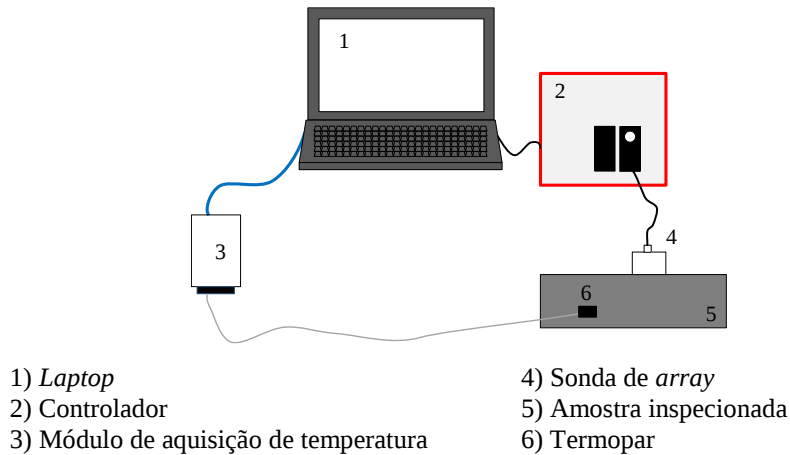


Figura 2. Desenho esquemático do sistema de medição com *array* de 64 canais.

Para a realização dos ensaios, a peça foi colocada ao sol por cerca de 30 minutos antes das medições. A partir do início das medições o ar condicionado do laboratório foi ligado. Sucessivas medições foram realizadas à medida que a temperatura da amostra caía. A faixa de temperaturas definida foi de 23 a 38 °C, com 10 medições realizadas nesse intervalo. As medições com *array* foram feitas no centro da amostra.

Especificações sobre a aquisição das formas de onda pelo *array*, tais como frequência de amostragem, resolução, voltagem e largura do pulso, ganho e número de pontos são mostradas na Tab. 1.

Tabela 1. Especificações da aquisição para avaliação da influência da temperatura nas imagens ultrassônicas.

Frequência de amostragem (MHz):	50
Voltagem do pulso (V):	70
Largura do pulso (ns):	100
Número de pontos:	600
Resolução (bits):	8
Ganho (dB):	45,1

Para a obtenção das imagens de TFM neste trabalho, foi considerada a velocidade da onda longitudinal padrão no aço de 5.900 m/s (inserida na Eq. 1). Antes da formação da imagem de TFM, o sinal é filtrado no domínio da frequência com uma janela gaussiana com banda de passagem de -40 dB, largura de 4 MHz e frequência de centro igual à da sonda de array.

As regiões para obtenção das imagens de TFM são indicadas na Fig. 3. A região sobre o “fundo” da peça é usada para obtenção da intensidade máxima do sinal e as regiões na área central da peça são utilizadas para o cálculo do valor RMS da intensidade do ruído. As áreas foram escolhidas de modo que elas não sofressem influência da “zona morta” (*dead zone*) próxima da região de contato entre sonda e peça. Nessa região, os elementos de recepção recebem o sinal de emissão diretamente do elemento emissor e, por esse motivo, no início das formas de onda gravadas são vistos componentes de alta amplitude.

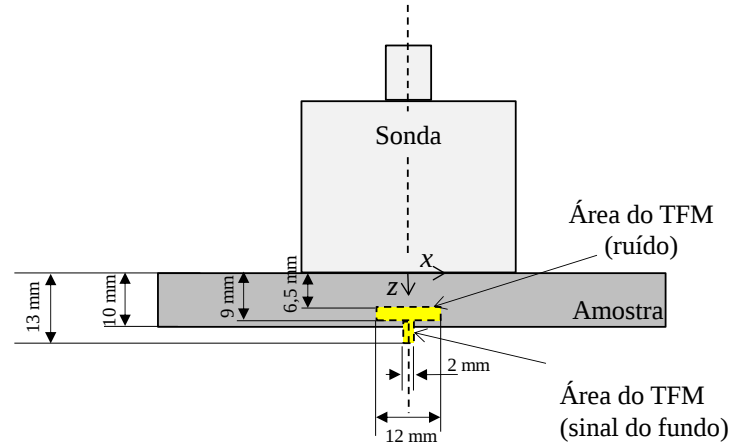


Figura 3. Áreas delimitadas na peça para obtenção do valor RMS do ruído de grão e intensidade do sinal de fundo da amostra.

Um exemplo de imagem de TFM com indicação das áreas usadas para o cálculo da RSR é mostrado na Fig. 4. A imagem é normalizada com relação à amplitude máxima no sinal de fundo e plotada em decibéis (dB).

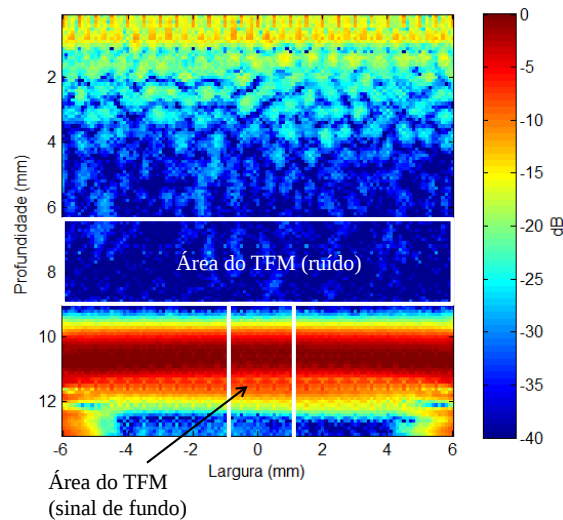


Figura 4. Áreas delimitadas na imagem de TFM para obtenção do valor RMS do ruído de grão e intensidade do sinal de fundo da amostra.

4. RESULTADOS

O resultado do ensaio para a verificação da influência da temperatura no RSR para a amostra do aço API 5L X70 é mostrado no gráfico da Fig. 5.

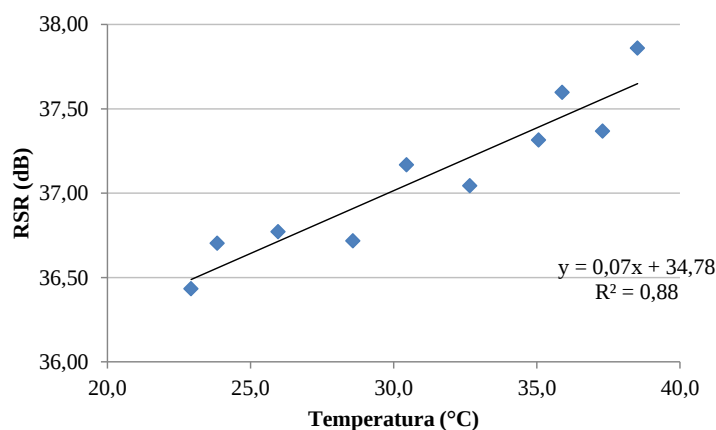


Figura 5. Variação da RSR da imagem de TFM em função da temperatura.

Se considerarmos uma relação linear entre RSR e temperatura, pela linha de tendência do gráfico da Fig. 5 é possível ver que a RSR aumenta a uma taxa de 0,07 dB/°C. O coeficiente de determinação R^2 que indica o quão bem o modelo proposto se ajusta aos dados experimentais ficou em 0,88. Este valor não é muito elevado, e representa a dispersão em torno da curva observada na figura.

Uma das possíveis causas para o efeito da variação da temperatura na RSR seria o próprio efeito da temperatura na velocidade da onda ultrassônica. Para obtenção das imagens de TFM neste trabalho é utilizado o valor padrão aproximado da velocidade da onda longitudinal no aço de 5.900 m/s. Usando os próprios dados adquiridos para a formação da imagem, foi possível estimar a velocidade real na amostra em cada nível de temperatura medido e usá-la, ao invés do valor padrão. Para isso, foram utilizadas as formas de onda gravadas de cada um dos 64 elementos com eles atuando tanto como emissores quanto receptores (modo pulso eco). Como para essas formas de onda gravadas pode-se verificar o eco de fundo duas vezes, é possível estimar o tempo de percurso da onda no material e consequentemente sua velocidade. Os sinais gravados foram filtrados com a janela gaussiana já descrita e as amplitudes máximas dos dois ecos de fundo foram estabelecidas como pontos de medição na forma de onda para obtenção do tempo de percurso. O tempo obtido para cada um dos 64 elementos é usado para calcular o tempo médio e a velocidade é calculada considerando a espessura da amostra (10 mm). O efeito da dilatação térmica também foi levado em consideração com a correção do valor da distância percorrida pela onda. Para a faixa de temperaturas utilizada no experimento, a relação entre a dilatação e a temperatura pode ser considerada linear (Wang, 2005). O coeficiente de dilatação utilizado foi de $1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Hibbeler, 2004). As velocidades estimadas em função das temperaturas podem ser vistas na Fig. 6. Na Fig. 7, são mostradas as novas RSRs calculadas com os valores medidos de velocidade.

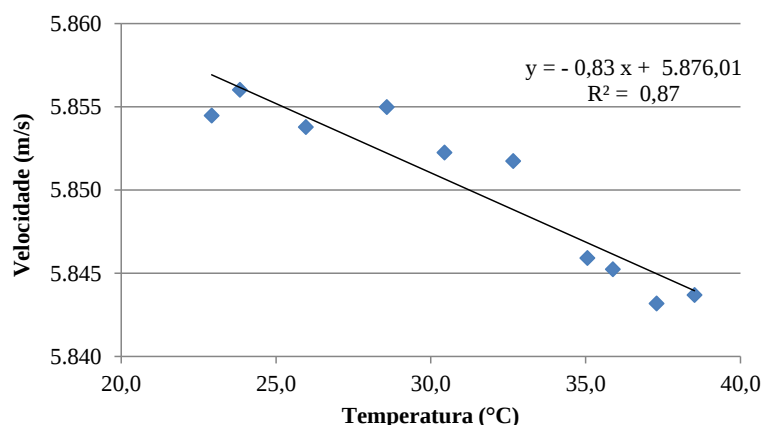


Figura 6. Variação da velocidade de onda em função da temperatura para medições com elementos do array no modo pulso eco.

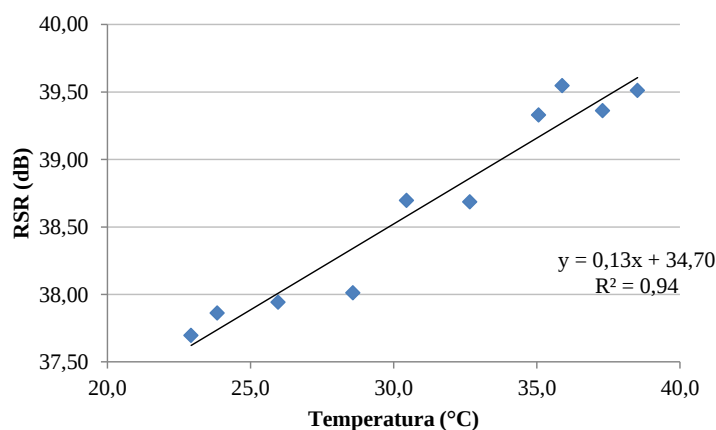


Figura 7. Variação da RSR da imagem de TFM em função da temperatura com a velocidade de onda medida.

O resultado apresentado na Fig. 7 mostra que a tendência de crescimento do RSR em função da temperatura se manteve mesmo após as correções de velocidade de onda em função da temperatura. A taxa de variação aumentou para 0,13 dB/°C. O R^2 melhorou, passando de 0,88 para 0,94 em comparação com os dados de RSR obtidos com a velocidade de onda constante igual a 5.900 m/s (Fig. 5).

5. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi verificar a influência da temperatura na relação sinal-ruído (RSR) em imagens ultrassônicas obtidas por *arrays*. Utilizou-se para a obtenção das imagens o *Total Focusing Method* (TFM) a partir de sinais gravados pelo *array* ultrassônico. A RSR foi calculada com base na intensidade máxima da imagem de TFM relativa à reflexão das ondas ultrassônicas no fundo da amostra e no valor RMS da intensidade do ruído de grão da imagem no interior da amostra.

Analisando os resultados, percebeu-se que o RSR aumenta linearmente com a temperatura. A taxa média de aumento verificada foi de 0,07 dB/°C com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,88, quando considera-se a velocidade da onda ultrassônica constante e igual a 5.900 m/s. A variação linear da RSR se torna mais clara quando o valor da velocidade de onda é corrigida levando-se em conta a influência da própria temperatura. Nesse caso, a taxa de variação aumentou para 0,13 dB/°C e o R^2 alcançou o valor de 0,94.

Os resultados obtidos no trabalho podem ser utilizados para corrigir medições utilizando imagens ultrassônicas realizadas em diferentes temperaturas relacionadas à intensidade do ruído de grão para fins de caracterização de materiais ou na detecção de defeitos em que se utiliza como parâmetro de detecção a relação entre o ruído e a amplitude do sinal referente ao defeito.

6. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento através dos projetos de pesquisa de números 2012/25174-9 e 2013/21616-0; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo financiamento através do projeto de pesquisa de número P479939/2012-8; e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de pesquisa concedida.

7. REFERÊNCIAS

- Fraga, R.S., Santos, A.A., Andrino, M.H., 2008, "Temperature effect on the measurement of stresses in pipelines using ultrasonic Lcr waves," IMECE08 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition., Boston, MA, pp. 1–7.
- Hibbeler, R. C., 2004, "Resistência dos materiais", Ed. Pearson Education, São Paulo, Brasil, 670 p.
- Holmes, C., Drinkwater, B.W., Wilcox, P.D., 2005, "Post processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation," NDT & E International, Vol. 38, No. 8, pp. 701-711.
- Li, J., Yang, L., Rokhlin, S.I., 2014, "Effect of texture and grain shape on ultrasonic backscattering in polycrystals," Ultrasonics, Vol. 54, No. 7, pp.1789–1803.
- Panetta, P. D., Bland, L. G., Tracy, M., Hassan, W., 2014, "Ultrasonic backscattering measurements of grain size in metal alloys," TMS2014 Annual Meeting Supplemental Proceedings - Integration of Materials Science and Nondestructive Evaluation for Materials Characterization, San Diego, CA, pp.721–730.
- Saniie, J., Bilgutay, N.M., 1986, "Quantitative grain size evaluation using ultrasonic backscattered echoes," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 80, pp. 1816–1824.

- Santos, C.S., Pereira Jr., P., Miyaura, E.H., Santos, A.A., 2010, "Temperature effect on the propagation of critically refracted longitudinal waves (L_{cr}) for stress," VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2010), Campina Grande, PB, Brasil, pp. 1–10.
- Wang, Y.C., 2005, "Steel and composite structures: behavior and design for fire safety", CRC Press, New York, USA, 352 p.
- Wilcox, P., Holmes, C., Drinkwater, B., 2007, "Advanced reflector characterization with ultrasonic phased arrays in NDE applications," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 54, No. 8, pp. 1541–1550.
- Willems, H., Goebbels, K., 1981, "Characterization of microstructure by backscattered ultrasonic waves," Metal Science, Vol. 15, No. 11-12, pp. 549–553.
- Yalda, I., Thompson, R.B., Margetan, F.J., 1996, "Predicting ultrasonic grain noise in polycrystals: A Monte Carlo model," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 99, No. 6, pp. 3445-3455.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

INFLUENCE OF THE TEMPERATURE ON THE GRAIN NOISE IN ULTRASONIC IMAGES

Paulo Pereira Junior, ppj@fem.unicamp.br¹

Auteliano Antunes dos Santos Junior, aute@fem.unicamp.br¹

Vanessa Vieira Gonçalves, vanessa.vieira@fem.unicamp.br¹

¹Faculty of Mechanical Engineering (FEM) – University of Campinas (UNICAMP), Rua Mendeleyev, 200 - Cidade Universitária, Campinas - SP, 13083-860

Abstract. Images generated from ultrasonic waves are an important tool in detecting non-destructively defects on mechanical components. However, the presence of grain (structural) noise may complicate the detection of such defects. The grain noise is related to the microstructure and, for this reason, it can be used to characterize the microstructure of the inspected material. In ultrasonic testing, the temperature is an important factor that often must be considered in the inspection. The influence of temperature on the velocity of ultrasonic waves is well known, however, to images, not only the wave velocity is an important factor, as well as the amplitude of the signals, in particular of the grain noise. The objective of this study is to investigate the influence of temperature on the signal to noise ratio (SNR) in ultrasonic images. The SNR is calculated based on the back-wall signal amplitude in the sample and the average amplitude of the grain noise. The ultrasound images are generated by Total Focusing Method (TFM) for a sample of API 5L X70 steel, used in the manufacture of pipes and tubes for the petrochemical industry. The results show that the value of the SNR increases linearly with increasing the sample's temperature. The SNR rate of change with temperature allows correcting SNR values measured at different temperatures, allowing the precise comparison of measured values.

Keywords: Ultrasound, Temperature, Total Focusing Method