

Efeito da temperatura na propagação de ondas longitudinais criticamente refratadas (LCR) para medição de tensões

Cleudiane Soares Santos
cleudiane@fem.unicamp.br
Universidade Estadual de
Campinas - Unicamp

Paulo Pereira Júnior
ppj@fem.unicamp.br
Universidade Estadual de
Campinas - Unicamp

Edson Haruo Miyaura
edsonharuo@fem.unicamp.br
Universidade Estadual de
Campinas - Unicamp

**Auteliano Antunes dos
Santos Jr**
aute@fem.unicamp.br
Universidade Estadual de
Campinas - Unicamp

Resumo

Dutos são amplamente utilizados no transporte de derivados do petróleo. A avaliação de tensões em paredes de dutos é de extrema importância por fornecer informações para determinar a integridade da estrutura e possibilitar um melhor aproveitamento do duto com segurança. Este trabalho tem como objetivo contribuir na avaliação de tensão por ultrassom ao estudar e avaliar o efeito da temperatura na velocidade de propagação e no tempo de percurso da onda Lcr de maneira a minimizar erros de medidas de tensão por ultrassom, decorrentes da variação da velocidade originadas pela temperatura. O processo de medição de tensões mecânicas por ultrassom faz uso da teoria acustoelástica. Neste trabalho avaliou-se a influência da temperatura na velocidade de propagação da onda ultrassônica no aço API 5L X70, utilizado na fabricação de dutos, e na sapata de acrílico utilizada como base para os transdutores. Para realizar as medidas de tempo de percurso da onda Lcr foram utilizados transdutores ultrassônicos e para análise das ondas uma aplicação desenvolvida no LabView™ em um sistema portátil. Os resultados mostraram que há uma influência significativa da temperatura sobre a velocidade de propagação.

Palavras-chave: Ultrassom. Ondas LCR. Medição de Tensões. Acustoelasticidade.

Abstract

Pipelines are widely used for transporting petroleum derivatives. The evaluation of stresses in the walls of oil pipelines is very important to provide valuable information to determine the integrity of the structure and enable a better and safely use of the product. This paper aims to contribute to the stress evaluation with ultrasonic waves by studying and analyzing the temperature effect on the propagation speed and time-of-flight of the LCR wave, in order to minimize errors of measuring stress by ultrasonic techniques, resulting in speed variations originated by temperature. The process of measuring mechanical stresses with ultrasound uses acoustoelastic theory. This study evaluated the influence of temperature on the propagation velocity of ultrasonic waves in the API 5L X70 steel used to manufacture pipelines and in the acrylic shoes used as a base for the transducers. For measurements we used ultrasonic transducers, an ultrasonic device and an application developed in the LabView™ environment in a portable system. The results showed that there is a significant influence of temperature on the speed propagation of ultrasonic waves.

Keywords: Ultrasound. LCR Waves. Stress Measurement. Acoustoelasticity.

1 Introdução

A utilização de dutos pela indústria petrolífera para o transporte de gás natural, petróleo e derivados tem aumentado substancialmente nas últimas décadas. Para permitir o crescimento da malha dutoviária, torna-se necessário o desenvolvimento e a implementação de diversos projetos de engenharia que muitas vezes demandam quantidades de recursos elevadas. Dutos de grandes dimensões e que apresentam alto grau de complexidade necessitam esquemas de manutenção adequados, com técnicas otimizadas de inspeção. A falha, em muitos casos, pode levar a desastres ambientais, com consequências econômicas e sociais imensuráveis (Andrino, 2007).

A avaliação experimental das tensões existentes em paredes de dutos é um modo eficaz de prever se o duto está em boas ou más condições de operação (Kudryavtsev et al, 2004). Existem vários métodos para medição de tensões, tais como:

difração de raios X, difração de nêutrons e propagação de ondas ultrassônicas. Utilizou-se para este trabalho o ultrassom e os conceitos de acustoelasticidade.

Existe uma relação entre a velocidade das ondas ultrassônicas e a tensão na região do material percorrido por tais ondas. Inúmeros pesquisadores realizaram experimentos visando aperfeiçoar esta técnica e obter novas descobertas (Andrino, 2003; Andrino, 2007; Caetano, 2003; Santos, 2005 e Santos, 2007). Observou-se que a velocidade das ondas ultrassônicas não depende apenas da tensão aplicada, mas também da temperatura em que é realizado o ensaio, da pressão no contato peça-transdutor, da microestrutura e da textura do material (Santos, 2007).

A temperatura foi a variável de estudo escolhida para este estudo, pois sua influência é bastante significativa na medida da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Essa variável pode ocasionar medidas errôneas de tensão pelo método ultrassônico.

O objetivo deste trabalho é determinar a influência da temperatura na velocidade de ondas longitudinais em aço API 5L X70, muito comumente utilizado na fabricação de dutos petrolíferos. A quantificação deste e dos demais fatores de influência é fundamental para a obtenção da tensão existente utilizando o método de medição por ondas longitudinais.

2 Ondas Ultrassônicas

O ultrassom é um tipo de onda que necessita de um meio material para que se propague e que possui frequências superiores a 20 kHz. Para aplicação geral em ensaios de materiais utiliza-se preferencialmente a faixa de frequência entre 0,5 MHz e 15 MHz, conforme Figura 1.

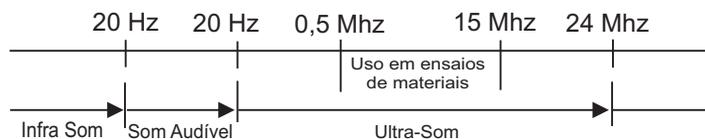


Figura 1: Espectros das frequências sonoras.
Fonte: MINICUCCI (2003).

As ondas ultrassônicas podem ser classificadas em longitudinais ou transversais. As ondas longitudinais são aquelas cuja movimentação das partículas do meio em que ela se propaga ocorre na mesma direção de propagação e as ondas transversais, também conhecidas como onda cisalhante, a movimentação das partículas é perpendicular à direção de propagação, conforme Figura 2.

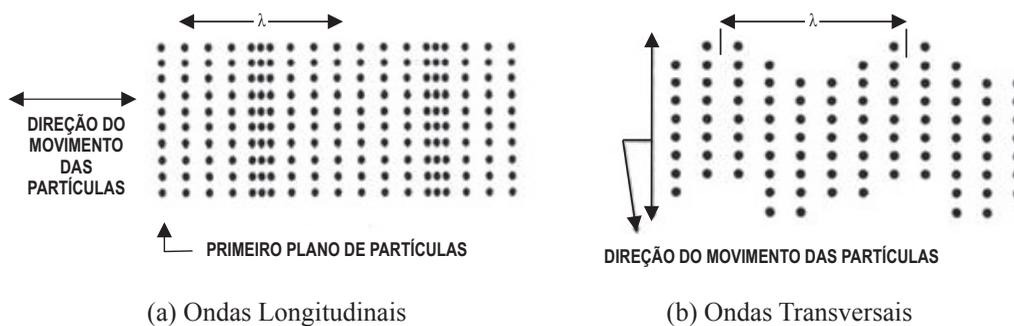


Figura 2: Planos de propagação da onda longitudinal e transversal.
Fonte: SANTOS (2003).

2.1 Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas (LCR)

A onda longitudinal criticamente refratada é o tipo de onda mais indicado para o ensaio de tensões por ultrassom. Ela se propaga logo abaixo da superfície, minimizando efeitos de irregularidades superficiais, como a corrosão. Sua velocidade de propagação é mais sensível às variações de tensão (Santos e Bray, 2000b). Para obter este tipo de onda propagando-se em aço, coloca-se um transdutor que gera ondas longitudinais sobre uma sapata de acrílico, de modo que

o ângulo de incidência da onda longitudinal esteja em 28° em relação à direção normal à superfície do objeto ensaiado. Figura 3 ilustra esta situação.

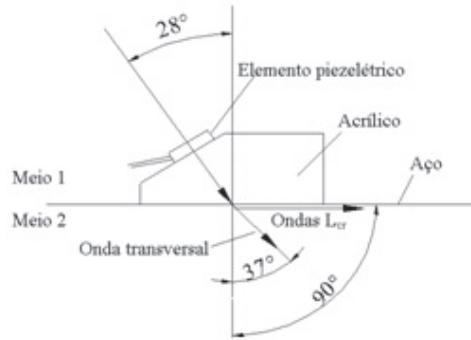


Figura 3: Geração de uma onda longitudinal criticamente refratada.
Fonte: ANDRINO (2003).

2.1.1 Aplicação das Ondas LCR para Medição de Tensões

De acordo com Bray e Stanley (1997), técnicas ultrassônicas de medição de tensões em materiais são baseadas no comportamento da velocidade de uma onda sonora, relacionado ao estado de tensões atuantes em um determinado componente mecânico. Considerando-se, como na Fig. 4, um sólido em forma de paralelepípedo e sob ação de tensões de tração na direção longitudinal, podem ser geradas ondas que se propagam nas três dimensões ortogonais (x,y,z).

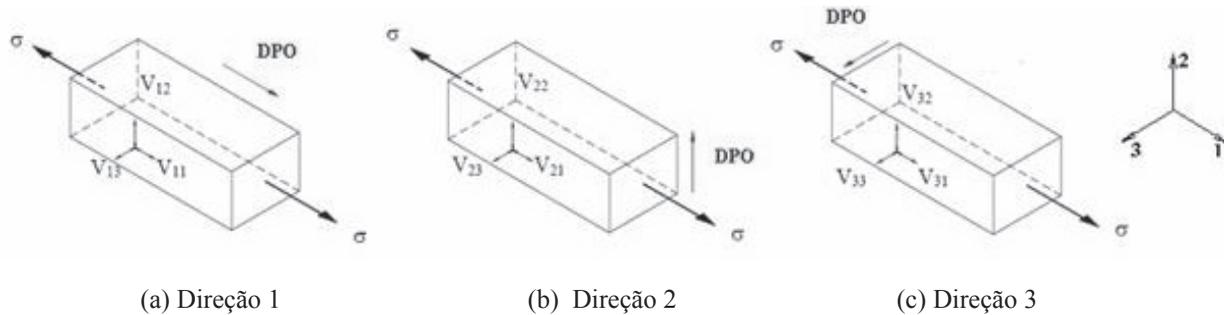


Figura 4: Sistema de coordenadas de um

No caso das velocidades, o primeiro índice refere-se à direção de propagação da onda (DPO); o segundo índice refere-se à direção de movimento das partículas. Na Figura 4a, a onda com V11 se propaga na direção 1. V11 representa a velocidade da onda longitudinal. As velocidades V12 e V13 representam a velocidade de ondas transversais. Nas Fig. 4b e 4c as ondas propagam-se em direções ortogonais em relação às tensões atuantes. V22 é a velocidade da onda longitudinal que se propaga na direção 2. V33 é a velocidade da onda longitudinal que se propaga na direção 3. σ é a tensão aplicada. Todas as demais velocidades são referentes a ondas transversais.

A velocidade das ondas ultrassônicas que se propagam na mesma direção da tensão aplicada relaciona-se com o estado de deformação triaxial segundo as Eq. (1), (2) e (3) (Bray e Stanley, 1997).

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) + (4m + 4\lambda + 10\mu)\varepsilon_1 \quad (1)$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \mu + (\lambda + m)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) + 4\mu\varepsilon_1 + 2\mu\varepsilon_2 - \frac{1}{2}n\varepsilon_3 \quad (2)$$

$$\rho_0 V_{13}^2 = \mu + (\lambda + m)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) + 4\mu\varepsilon_1 + 2\mu\varepsilon_3 - \frac{1}{2}n\varepsilon_2 \quad (3)$$

Em que:

ρ_0 é a massa específica inicial do material;

l , m e n são as constantes elásticas de terceira ordem de Murnaghan;

ε_1 , ε_2 e ε_3 são componentes de deformação das direções 1, 2 e 3;

λ e μ são constantes elásticas de segunda ordem de Lamé.

As constantes elásticas de segunda ordem de Lamé se relacionam com as propriedades elásticas conhecidas como módulo de Young (E) e o módulo transversal (G), segundo as Eq. (4) e (5).

$$G = \mu \quad (4)$$

$$E = \mu \left(\frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \right) \quad (5)$$

As Eq. (1), (2) e (3) podem ser simplificadas, considerando que a deformação está agindo apenas na direção 1 (estado uniaxial), onde ν é o coeficiente de Poisson. Portanto, as seguintes considerações podem ser feitas com relação às deformações:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon \quad (6)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\nu\varepsilon \quad (7)$$

As Eq. (1), (2) e (3) podem ser simplificadas em:

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + \left[4(\lambda + 2\mu) + 2(\mu + 2m) + \nu\mu \left(1 + \frac{2l}{\lambda} \right) \right] \varepsilon \quad (8)$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \rho_0 V_{13}^2 = \mu + \left[4\mu + \nu \left(\frac{n}{2} \right) + m(1 - 2\nu) \right] \varepsilon \quad (9)$$

Derivando-se a Eq. (8) em relação à deformação e reagrupando os termos, obtém-se:

$$\frac{dV_{11}/V_{11}^0}{d\varepsilon} = 2 + \frac{\mu + 2m + \nu\mu(1 + 2l/\lambda)}{\lambda + 2\mu} = L_{11} \quad (10)$$

Em que:

V_{11}^0 é a velocidade da onda longitudinal quando o material encontra-se livre de tensões;

L_{11} é a constante acustoelástica para ondas longitudinais criticamente refratadas na direção do carregamento.

Com a Lei de Hooke, pode-se obter uma expressão conveniente para a variação da tensão com a variação do tempo de percurso da onda:

$$d\sigma = E d\varepsilon \Rightarrow d\sigma = \frac{E(dV_{11}/V_{11})}{L_{11}} = \frac{E}{L_{11}t_0} dt \quad (11)$$

Em que:

t_0 é o tempo de percurso da onda quando o material está livre de tensões.

Ao analisar esta equação, nota-se que é desejável que o valor da constante acustoelástica L_{11} seja elevado, pois, desta forma, há uma maior sensibilidade do tempo de percurso da onda em relação à mudança de tensão mecânica aplicada (Santos, 2007).

3 Estudo dos Fatores de Influência sobre o Processo de Medição

A variação de tensão no material não é o único fator que provoca variações na velocidade de propagação de uma onda ultrassônica, como visto na Eq. (11), depende também de fatores como: temperatura, força exercida pelo suporte dos transdutores sobre a peça, textura superficial do material, microestrutura e tensões residuais.

Estudos revelam que o tempo de percurso de ondas longitudinais propagando-se num material apresenta uma relação linear com a temperatura (Santos, 2007), que é o foco do estudo. A quantificação desse fator de influência possibilita corrigir a tensão medida com o conhecimento da temperatura em que se encontra o material.

Segundo Bray e Stanley (1997), a tensão real pode ser medida quando utilizada a Eq. (12), que leva em consideração o efeito de diversos fatores.

$$\Delta\sigma = \frac{E(t - t_0 - \Delta t_{RS} - \Delta t_T - \Delta t_{TX})}{L_{11}t_{ref}} = \frac{E\Delta F}{L_{11}t_{ref}} \quad (12)$$

$$t = t_0 + \Delta t_{RS} + \Delta t_T + \Delta t_F + \Delta t_{TX} \quad (13)$$

Em que:

t_{ref} é o tempo de percurso da onda a uma temperatura de referência, com o material livre de tensão;

Δt_{RS} é a variação do tempo de percurso da onda devido a tensões residuais;

Δt_T considera o fato de que a temperatura em que é realizado o ensaio é diferente da temperatura de referência;

ΔT_{TX} é para considerar efeitos da textura do material, como no caso em que há corrosão, ou quando ele apresenta propriedades anisotrópicas;

Δt_F é o efeito provocado pela variação de uma força externa ao material.

4 Materiais e Métodos

Foram realizados dois experimentos. No experimento 1, foi determinada a influência da temperatura na velocidade de ondas L_{CR} em uma chapa de aço API 5L X70. O experimento 2 teve por objetivo verificar a influência da temperatura na velocidade de propagação de ondas longitudinais no acrílico, que é o material usado na fabricação das sapatas.

Apesar de vários serem os fatores que influenciam no tempo de percurso das ondas L_{cr} , nos dois experimentos existe a variação apenas da temperatura, pois as demais variáveis de influência foram mantidas constantes.

4.1 Experimento 1

A Figura 5 mostra os equipamentos utilizados para a montagem do experimento 1 e a Tab. (1) apresenta a descrição dos equipamentos.



Figura 5: Arranjo experimental para medir o tempo de percurso e a temperatura da chapa.

Tabela 1: Descrição dos equipamentos para realização do ensaio para o experimento 1.

Posição	Descrição	Especificação
1	chapa de aço	aço API 5L X70
2	pulsador/receptor	modelo USB-UT350 da marca Ultratec
3	termômetro de precisão	0,1 °C
4	bloco isolante	
5	probe com sapatas de acrílico	155 mm
6	par de transdutores emissor/receptor de ondas longitudinais	5 MHz – marca: Panametrics
7	cabo coaxial	

A medição da temperatura da chapa foi realizada com o termômetro de precisão. Este foi inserido num orifício do bloco isolante em contato com a chapa de aço para evitar a troca de calor do termômetro com o ambiente, mas permite que ocorra com a peça. Considerou-se que as temperaturas medidas pelo termômetro são as mesmas em toda a extensão da peça. Para melhor contato entre a sapata e a placa utilizou-se como fluido acoplante um gel utilizado para exames de ultra-sonografia.

Usou-se como procedimento experimental, a variação da temperatura de 22,6°C até 36,0°C fazendo medições de tempo de percurso em intervalos de aproximadamente 0,5°C. A cada intervalo foram coletadas 10 formas de onda para cada temperatura selecionada e para cada forma de onda foi obtido o tempo de percurso.

Como a distância percorrida pela onda é constante, em virtude do posicionamento das sapatas na probe, a dilatação não afeta nas medições do tempo de percurso, por isto foi desconsiderada.

Uma aplicação desenvolvida no ambiente LabVIEW™ foi utilizada para visualização das formas de onda captadas pelo transdutor receptor, bem como para ajustar os parâmetros do pulso ultrassônico emitido e também da aquisição do sinal, simulando o funcionamento de um osciloscópio, como pode ser visto na Figura 6.

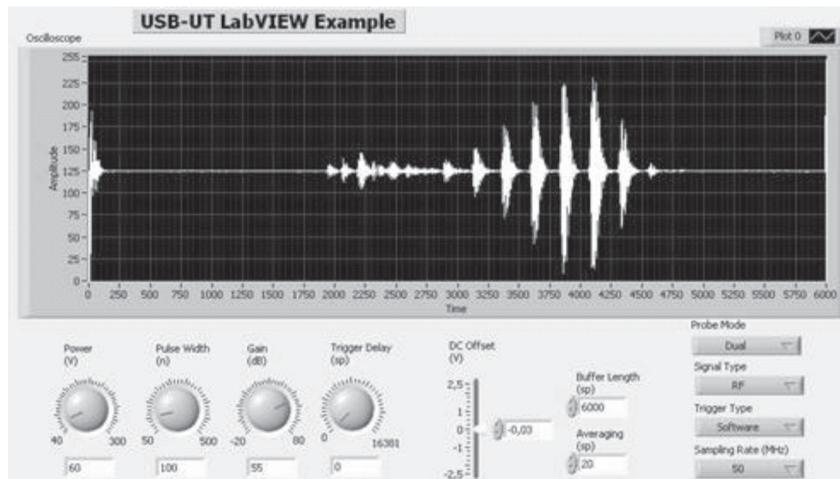


Figura 6: Tela do aplicativo desenvolvido no LabVIEW™.

A medição do tempo de percurso é obtida entre o *trigger* inicial até o primeiro pulso, que representa a onda L_{CR} . Outros tipos de ondas são gerados juntos da onda L_{CR} , entretanto pelo fato da onda L_{CR} se propagar em linha reta e com maior velocidade, ela representa o primeiro pulso visualizado na tela do aplicativo, indicado pelo círculo vermelho na Fig. 7.

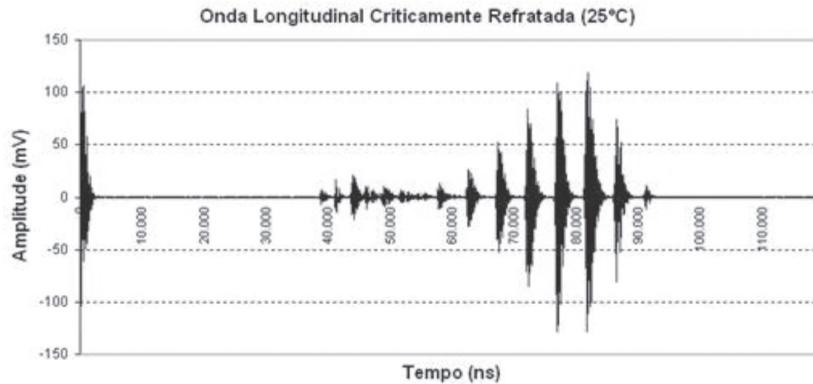


Figura 7: Sinal registrado pelo programa osciloscópio da onda L_{CR} .

Analisando detalhadamente o pulso da onda L_{CR} , o ponto utilizado como referência para início do pulso é o segundo cruzamento com o zero após o primeiro pico do gráfico, indicado pelo círculo vermelho na Fig. 8.

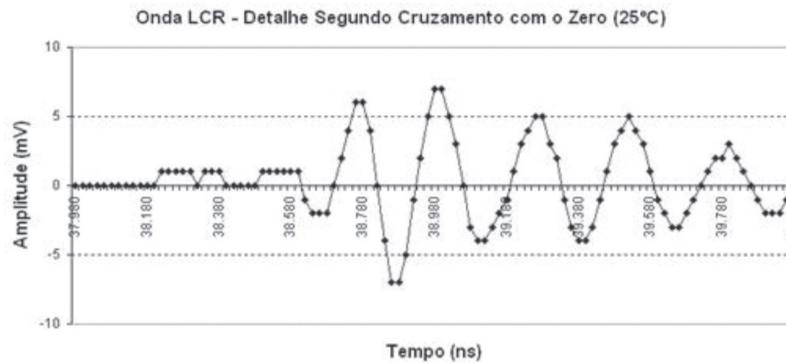


Figura 8: Sinal registrado pelo programa osciloscópio da onda L_{CR} no cruzamento com o zero após o primeiro pico.

4.2 Experimento 2

O método utilizado para verificação do tempo de percurso da onda no acrílico foi o pulso-eco. O método consiste na utilização de um transdutor que tem a função tanto de transmissor como de receptor.

Para se obter a relação entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica no acrílico em função da temperatura, mediu-se este parâmetro com o termômetro de precisão e construiu-se um isolante térmico para envolver uma das sapatas utilizadas no ensaio. Neste isolante, fixou-se um termômetro em contato com a sapata de acrílico. Um dos lados da sapata não foi isolado a fim de permitir o contato com o transdutor de ultrassom. Este arranjo é visto na Figura 9.



(a) Montagem do experimento



(b) Detalhe do transdutor no acrílico

Figura 9: Arranjo experimental para medir o tempo de percurso e a temperatura da sapata de acrílico.

O transdutor de ultrassom e o pulsador/receptor empregados são os mesmos usados no experimento 1. Uma sapata de acrílico de 40 mm de largura foi aquecida até 37°C. Na medida em que ela resfriava, até 25°C coletavam-se dados de tempo de percurso, pelo método pulso-eco, em intervalos de aproximadamente 2°C. Nesta faixa de temperatura a dilatação pode ser considerada desprezível. Considerou-se também, que as temperaturas medidas pelo termômetro são as mesmas em toda a extensão da peça.

Assim como no experimento 1, para cada intervalo foram coletadas 10 formas de onda para cada temperatura selecionada e para cada forma de onda foi obtido o tempo de percurso.

5 Resultados e discussão

Os resultados foram obtidos através de análise gráfica usando os softwares: LabVIEW™ e Microsoft Excel™. Os parâmetros para cálculo da velocidade de propagação da onda L_{CR} para os dois experimentos são mostrados na Tab. (2). Figura 10 apresenta um desenho 2D com maior detalhamento das distâncias percorridas.

Tabela 2: Parâmetros usados no experimento.

<i>Parâmetros</i>	<i>Valores</i>
Velocidade de Propagação do som no acrílico (m/s)	2660 (para 25 °C)
Largura da sapata de acrílico (mm)	40
Distância percorrida no acrílico (mm)	32
Distância percorrida no aço (mm)	155

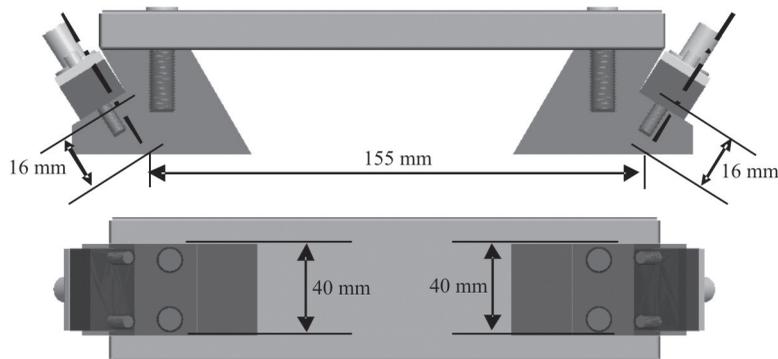


Figura 10: Distância percorrida pela onda L_{CR} na chapa de aço e no acrílico.

5.1 Experimento 1

A Figura 11 e a Figura 12 comprovam que os dados experimentais do tempo de percurso e velocidade de propagação da onda L_{CR} em uma chapa de aço API 5L X70 apresentam uma relação linear com a temperatura.

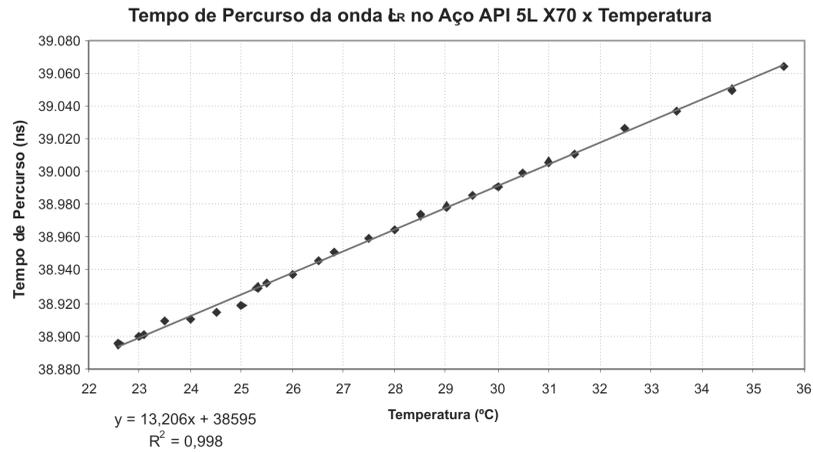


Figura 11: Tempo de percurso da onda L_{CR} em função da temperatura medida da chapa.

Podemos observar a partir da Figura 11 que o experimento 1 forneceu como resultado um acréscimo de 13,2 ns/°C no tempo de percurso da onda.

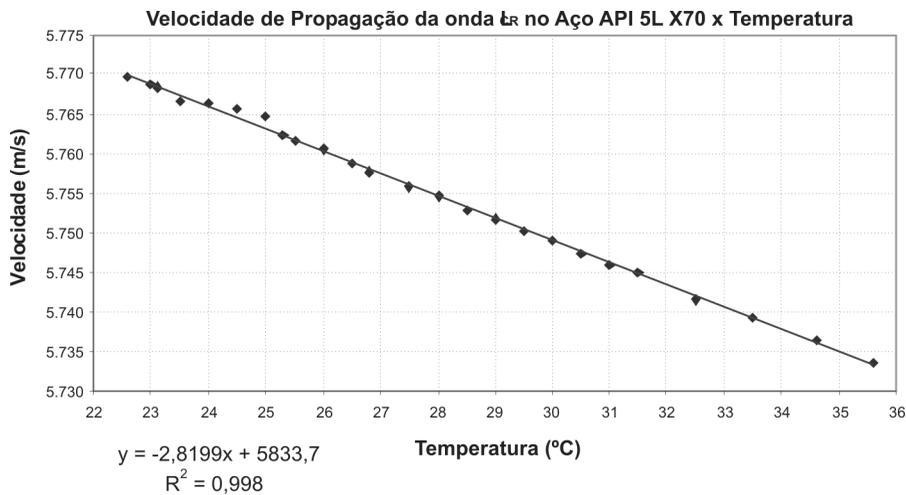


Figura 12: Velocidade de propagação do som no aço API 5L X70 em função da temperatura.

5.2 Experimento 2

A Figura 13 e a Figura 14 mostram que o tempo de percurso e velocidade de propagação da onda L_{CR} , considerando a distância percorrida de 80 mm (tempo de ida e volta da onda na direção da largura), na sapata de acrílico em função da temperatura é linear.

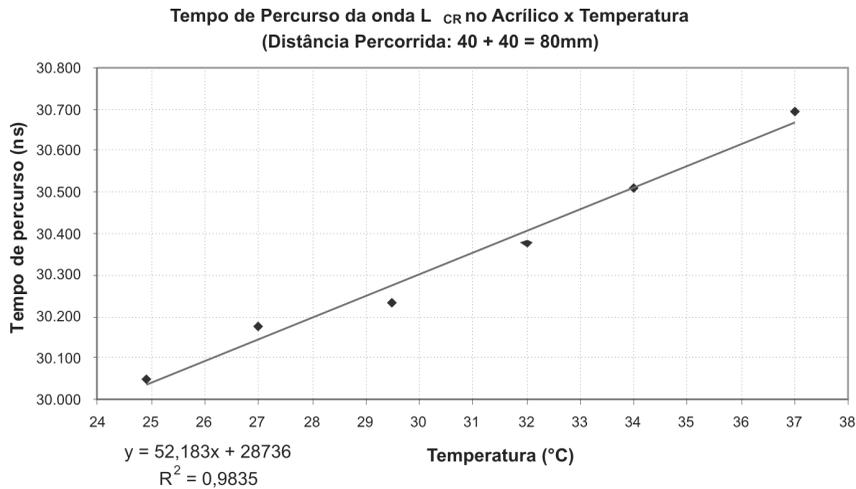


Figura 13: Tempo de percurso em função da temperatura numa sapata de acrílico de 40 mm de largura.

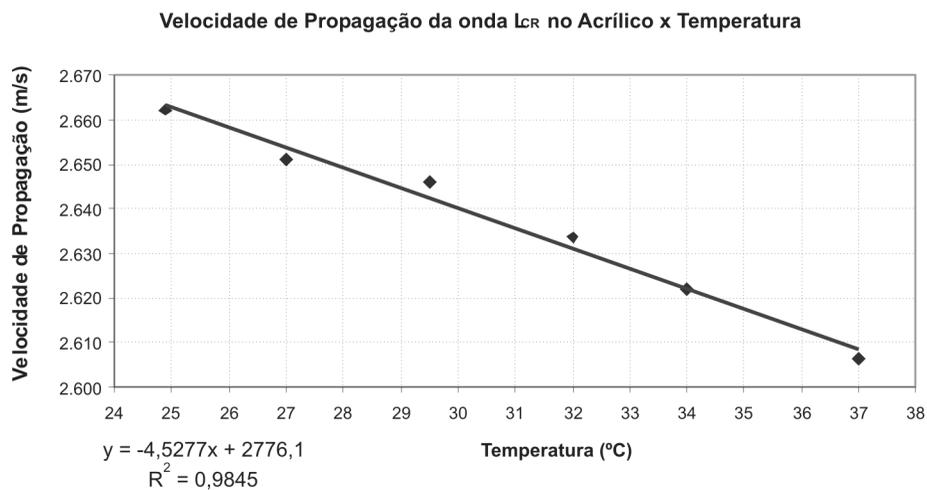


Figura 14: Velocidade de propagação do som no acrílico em função da temperatura.

A partir da curva da velocidade de propagação em função da temperatura, pode-se calcular o tempo necessário para percorrer 32 mm, correspondente à distância percorrida da onda na sapata de acrílico (Figura 15).

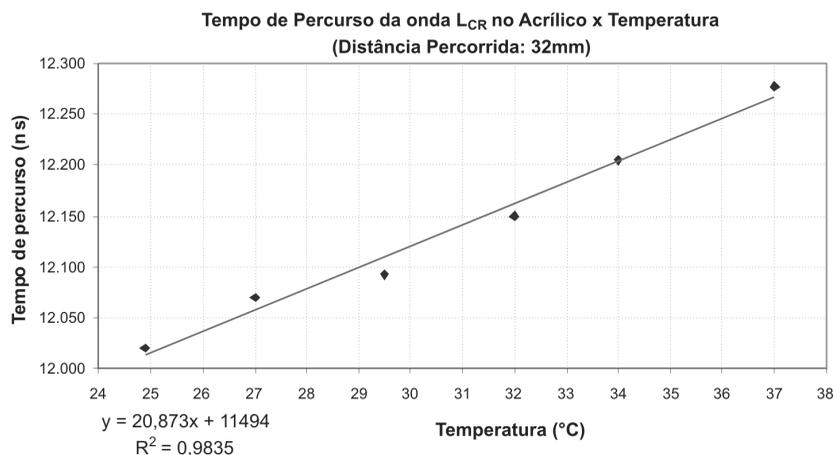


Figura 15: Tempo para percorrer 32 mm de acrílico (16 mm em cada sapata dos transdutores).

Podemos observar a partir da Fig. 15 que o experimento 2 forneceu como resultado um acréscimo de 20,9 ns/°C no tempo de percurso da onda.

6 Conclusão

Os resultados confirmam o que foi previsto pela literatura, isto é, o efeito da temperatura no tempo de percurso de ondas ultrassônicas assume forma linear (Santos, 2007). Quanto maior a temperatura, maior é o tempo de percurso (ou menor é a velocidade de propagação).

Comparando o experimento 1 com o experimento 2, verifica-se que a velocidade de propagação do som no acrílico sofre uma forte influência da temperatura. Observa-se nos dois experimentos, que quanto maior a temperatura maior o tempo de percurso e menor a velocidade de propagação das ondas L_{CR} .

Conclui-se a partir da análise computacional, que a temperatura das sapatas de acrílico não acompanha a temperatura da chapa de aço durante os experimentos, como visto na diferença dos valores do coeficientes angulares nos gráficos para os dois experimentos, sendo maior o do acrílico.

Além disso, é possível concluir que embora a velocidade de propagação da onda ultrassônica no acrílico sofra uma forte influência da temperatura, este efeito não é expressivo no arranjo experimental empregado. Uma possível explicação para isto é que a condutividade térmica do acrílico é muito baixa (0,17-0,22 W/m.K) se comparada com a do aço carbono (em torno de 60 W/m.K). Assim, as sapatas de acrílico não sofrem variações de temperatura muito rapidamente, principalmente quando a diferença de temperatura entre elas e a chapa de aço não for significativa, como é o caso dos experimentos aqui expostos.

Estes dados futuramente possibilitarão uma medição adequada da tensão existente em paredes de dutos de aço API 5L X70, pela leitura do tempo de percurso de ondas de ultrassom propagando-se nas mesmas e posterior correção deste tempo em função da temperatura do duto.

7 Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Estadual de Campinas e a CAPES e a CNPq pelo apoio em forma de bolsa aos pesquisadores.

Referências

- ANDRINO, M. H. Avaliação de tensões residuais em soldas de dutos utilizando o efeito acustoelástico. 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Campinas, Campinas, SP, 2003.
- ANDRINO, M. H. Aplicação de ondas longitudinais criticamente refratadas para a medição de tensões em dutos. 203f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Campinas, Campinas, SP, 2007.
- BRAY, D. E. and Stanley, R.K., Nondestructive Evaluation: A Tool in Design, Manufacturing, and Service, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1997. 586 p.
- CAETANO, S. F. Determinação das constantes acustoelásticas para aço API 5L X70 para gasodutos. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Campinas, Campinas, SP, 2003.
- FRAGA, R. S.; SANTOS, A. A.; ANDRINO, M. H. Temperature effect on the measurement of stresses in pipelines using ultrasonics lcr waves. ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, Boston, 2008.
- KUDRYAVTSEV, Y. et al. Ultrasonic technique and device for residual stress measurement. INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION ON EXPERIMENTAL AND APPLIED MECHANICS, 10., 2004, Costa Mesa, CA, p. 1-7.
- MINICUCCI, D. J. Avaliação de tensões por ultra-som no aro de rodas ferroviárias forjadas novas: classe C. 119F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Campinas, Campinas, SP, 2003.
- SANTOS, A. A.; BRAY, D. E. Ultrasonic stress measurement using PC based and commercial flaw detectors. Review of Scientific Instruments, American Institute of Physics, v. 71, n. 9, p. 3464-3469. 2000a.

SANTOS, A. A.; BRAY, D. E. Stress Measurements in Bars Using LCR Waves, Aging management, component and piping analysis, Nondestructive Engineering, Monitoring and Diagnosis, Ed. L.I. Ezekoye, Seattle, WA, USA, Vol. 409, pp. 223-228. 2000b.

SANTOS, A. A. et al. Application of acoustoelasticity to evaluate stress relaxation in API 5L X70 steel for pipelines, Materials Evaluation, American Society for Nondestructive Testing, v. 63, n. 5, p. 511-515, 2005.

SANTOS, R. A. Efeito da temperatura sobre a medição de tensão por ondas LCR em aços API 5L X70, Master 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Campinas, Campinas, SP, 2003.