

# VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE ULTRASSÔNICA DE PROPAGAÇÃO LONGITUDINAL

T. Q. Santos\*, D. P. Oliveira\*, A. V. Alvarenga\* e R. P. B. Costa-Felix\*

\*Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Duque de Caxias, Brasil  
e-mail: avalvarenga@inmetro.gov.br

**Resumo:** A escassez na literatura de métodos validados para medição das propriedades acústicas de corpos de prova geram resultados não uniformes e dificilmente comparáveis. Neste propósito, no presente trabalho, tendo como base os documentos DOQ-CGCRE-8:2011, ABNT NBR 17000:2005 e ABNT NBR 17025:2005, foi desenvolvido um ensaio para validação de um método de medição, para caracterização da propriedade acústica de velocidade de propagação do ultrassom longitudinal e da espessura de um corpo de prova. A validação está associada à estimativa das respectivas incertezas de medição, cuja relevância está em gerar resultados metrologicamente confiáveis.

**Palavras-chave:** validação, metrologia, ultrassom, velocidade de propagação.

**Abstract:** *The lack of validated methods for measuring the acoustic properties of test object literature generate uneven and difficult to compare results. In this regard, the present work, based on the documents DOQ-CGCRE-8: 2011, ABNT NBR 17000:2005 and ABNT NBR 17025:2005 developed a preliminary test to validate an experimental system to characterize the acoustic property of speed propagation of longitudinal ultrasonic waves and the thickness of a probe body associated with the estimation of the respective measurement uncertainties, whose relevance is generate metrologically reliable results.*

**Keywords:** validation, metrology, ultrasound.

## Introdução

No contexto do ultrassom na área da saúde é comum o uso de corpos de prova padronizados, com propriedades acústicas bem definidas, para avaliar o desempenho dos aparelhos de ultrassom de uso clínico (terapêutico e diagnóstico), bem como definir protocolos de terapia e auxiliar na interpretação das imagens por eles produzidas.

É de fundamental importância que os laboratórios disponham de meios e critérios objetivos para demonstrar que os métodos empregados para medição das propriedades ultrassônicas dos corpos de prova utilizados sejam válidos e que o ensaio que executam conduz a resultados confiáveis e adequados à qualidade pretendida [1-2].

Neste sentido, os documentos DOQ-CGCRE-8:2011, ABNT NBR 17000:2005 e ABNT NBR 17025:2005 [1, 3-4] fornecem as diretrizes para

validação de métodos analíticos a fim de que os laboratórios atendam aos requisitos técnicos e que atestem a devida competência na realização de ensaios e calibração. As normas para validação de métodos analíticos são aplicáveis a métodos não normalizados, métodos normalizados fora do escopo para o qual foi concebido ou modificado para atender a requisitos específicos, ou a métodos totalmente novos, desenvolvidos pelo próprio laboratório garantindo assim que os métodos de ensaio que o laboratório executa conduzem a resultados com princípios metroológicos confiáveis [1].

Por ser o resultado da medição uma aproximação ou uma estimativa do valor para o método de interesse, este deve ser acompanhado pela expressão de incerteza de medição, um parâmetro relacionado à dispersão de valores no resultado de um ensaio que possibilita quantificar a qualidade de uma medida, permitindo comparação de resultados entre os experimentos [5].

O presente artigo reporta um ensaio realizado para validar metrologicamente um método experimental, desenvolvido no Laboratório de Ultrassom (Labus) do Inmetro, visando caracterização da velocidade ultrassônica de propagação longitudinal, bem como a determinação das respectivas incertezas de medição. O método validado poderá ser utilizado na determinação da velocidade de corpos de prova tipicamente empregados em ensaio de segurança e na calibração de equipamentos de ultrassom de uso clínico (*phantom* para diagnóstico e terapia).

## Materiais e métodos

O corpo de prova usado no presente ensaio foi um cilíndrico em aço inoxidável AISI 304, cortado e polido (Figura 1) e calibrado quanto à espessura ( $101,4 \pm 0,1$  mm) e velocidade de propagação do ultrassom longitudinal na região central ( $5724,7 \pm 2,7$ ) m·s<sup>-1</sup> de acordo a norma [6]. Seu diâmetro é de 100 mm (dimensão não calibrada).



Figura 1: Vistas (a) superior e (b) frontal do corpo de

prova em aço inox ANSI 304.

O ensaio para caracterização da velocidade de propagação do ultrassom longitudinal e da espessura do corpo de prova foi conduzido em tanque com água deionizada. O sistema experimental era composto por dois transdutores de ultrassom (Tx1 e Tx2, atuando como transmissor ou receptor em etapas distintas do método), ambos com frequência central nominal de 5 MHz (modelo V303, Olympus-Panametrics, MA, EUA). Os transdutores, bem como o corpo de prova, foram montados em um trilho construído para assegurar sua fixação e o alinhamento (figura 2).

A fim de obter o equilíbrio térmico todo o sistema (tanque com água, trilho, transdutores e corpo de prova) permaneceu em repouso por 30 minutos. Após o equilíbrio térmico ser alcançado, um gerador de funções arbitrarias modelo 33250A (Agilent Technologies, CA, EUA) foi usado para excitar o transdutor Tx com um *burst* senoidal de 20 ciclos e 20 V de amplitude pico a pico, período de repetição de 10  $\mu$ s e frequência de 5 MHz. Os sinais foram digitalizados utilizando-se um osciloscópio modelo DSO 5012A (Agilent Technologies, CA, EUA) com frequência de amostragem de 500 MSa/s e as medições de tempo realizadas com auxílio dos cursores eletrônicos disponíveis no osciloscópio.

Foram analisados diferentes tempos de voo, tanto refletidos nas faces do corpo de prova quanto transmitidos entre os Tx1 e Tx2. Os tempos de voo foram denominados  $t_{ref1}$  (reflexão na face mais próxima ao Tx emissor),  $t_{ref2}$  (reflexão na face mais afastada do Tx emissor),  $t_{CP}$  (transmissão entre transdutores emissor e receptor com o corpo de prova inserido no caminho acústico) e  $t_w$  (transmissão entre transdutores emissor e receptor sem o corpo de prova).

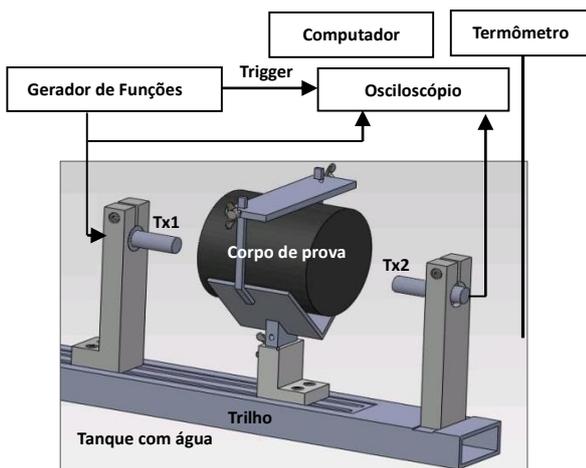


Figura 2. Sistema experimental para caracterização das propriedades acústicas de corpos de prova.

A temperatura foi monitorada durante todo o processo de medição com um termômetro analógico, resolução de 0,1°C (ThermoSchneider, Baden-Württemberg, Alemanha). Os dados coletados, incluindo os tempos de voo e condições climáticas,

foram armazenados em um computador para pós-processamento. Todo o procedimento foi repetido cinco vezes por dois operadores distintamente, portanto em condições de precisão intermediária.

A velocidade longitudinal de propagação do ultrassom no corpo de prova  $c$  foi calculada por (1).

$$c = \frac{x}{t} \quad (1)$$

sendo  $x$  é a espessura do corpo de prova em metros calculada a partir de (2),  $t$  é o tempo de voo do ultrassom no corpo de prova em segundos calculada a partir de (4).

$$x = [(2t_w - t_{ref1} - t_{ref2}) \cdot c_w] \quad (2)$$

sendo  $t_w$ ,  $t_{ref1}$  e  $t_{ref2}$  foram definidos anteriormente (expressos em segundos), e  $c_w$  é a velocidade de propagação do ultrassom na água ( $m \cdot s^{-1}$ ).

A velocidade de propagação do ultrassom na água  $c_w$  foi calculada de acordo com (3) [7].

$$c_w = 1404,3 + 4,7T - 0,04T^2 \quad (3)$$

sendo  $T$  é a temperatura na água ( $^{\circ}C$ ).

$$t = t_{CP} - \frac{(t_{ref1} + t_{ref2})}{2} \quad (4)$$

sendo  $t_{CP}$ ,  $t_{ref1}$  e  $t_{ref2}$  foram definidos anteriormente.

Como o resultado da medição é uma aproximação ou uma estimativa do valor para a velocidade de propagação longitudinal do ultrassom e a espessura no corpo de prova, estas devem ser acompanhadas pela expressão de incerteza de medição. No presente estudo a incerteza da medição foi calculada de acordo com o Guia de Expressão para a Incerteza de Medição – GUM, que recomenda uma estimativa pela avaliação da incerteza de medição do Tipo A e Tipo B para um determinado mensurando [5].

No que tange a determinação incerteza de medição da velocidade longitudinal de propagação do ultrassom, bem como a incerteza de medição da espessura do corpo de prova, as seguintes fontes de incerteza foram consideradas: a incerteza tipo A (computada como desvio padrão da média entre as repetições dos ensaios); a incerteza da temperatura obtida do certificado de calibração do termômetro analógico (0,03°C); a incerteza da determinação da velocidade de propagação do ultrassom na água (0,018  $m \cdot s^{-1}$ ) [7]; a incerteza do certificado de calibração da base de tempo do osciloscópio, utilizado para determinação dos diferentes tempos de voo (0,06%).

A partir do modelo de espessura do corpo de prova expresso por (2) e (3), foram calculados os coeficientes de sensibilidade para as fontes de incerteza relacionadas à: temperatura ( $cx_T$ ); velocidade de propagação do ultrassom na água ( $cx_{c_w}$ ); tempos de voo  $t_w$  ( $cx_{t_w}$ ),  $t_{ref1}$  ( $cx_{t_{ref1}}$ ) e  $t_{ref2}$  ( $cx_{t_{ref2}}$ ), conforme (5), (6), (7) e

(8).

$$cx_T = \frac{\partial x}{\partial T} = 4,7t_w - 2,35t_{ref1} - 2,35t_{ref2} - 0,8t_w + 0,04Tt_{ref1} + 0,04Tt_{ref2} \quad (5)$$

$$cx_{t_w} = \frac{\partial x}{\partial t_w} = 1404,3 - 4,7T + 0,04T^2 \quad (6)$$

$$cx_{t_{ref1}} = \frac{\partial x}{\partial t_{ref1}} = -\frac{1404,3}{2} - \frac{4,7T}{2} + \frac{0,04T^2}{2} \quad (7)$$

$$cx_{t_{ref2}} = \frac{\partial x}{\partial t_{ref2}} = -\frac{1404,3}{2} - \frac{4,7T}{2} + \frac{0,04T^2}{2} \quad (8)$$

A incerteza combinada para espessura do corpo de prova ( $u_x$ ), em metros, foi calculada de acordo com (9).

$$u_x^2 = cx_T^2 \cdot u_T^2 + cx_{t_w}^2 \cdot u_{t_w}^2 + cx_{t_{ref1}}^2 \cdot u_{t_{ref1}}^2 + cx_{t_{ref2}}^2 \cdot u_{t_{ref2}}^2 \quad (9)$$

Observando modelo de tempo de voo no corpo de prova expresso por (4) foram calculados os coeficientes de sensibilidade para as fontes de incerteza relacionadas: aos tempos de voo total na água com o corpo de prova ( $ct_{cp}$ ); até atingir as faces do corpo de prova ( $ct_{t_{ref1}}$  e  $ct_{t_{ref2}}$ ), respectivamente, conforme (10), (11) e (12).

$$ct_{cp} = \frac{\partial t}{\partial t_{cp}} = 1 \quad (10)$$

$$ct_{t_{ref1}} = \frac{\partial t}{\partial t_{ref1}} = -\frac{1}{2} \quad (11)$$

$$ct_{t_{ref2}} = \frac{\partial t}{\partial t_{ref2}} = -\frac{1}{2} \quad (12)$$

A incerteza combinada para tempo de voo no corpo de prova ( $u_t$ ) em segundos foi calculada de acordo com (13).

$$u_t^2 = ct_{cp}^2 \cdot u_{t_{cp}}^2 + ct_{t_{ref1}}^2 \cdot u_{t_{ref1}}^2 + ct_{t_{ref2}}^2 \cdot u_{t_{ref2}}^2 \quad (13)$$

A partir do modelo de velocidade de propagação do ultrassom do corpo de prova expresso por (1) foram calculados os coeficientes de sensibilidade para as fontes de incerteza relacionadas à espessura ( $c_x$ ) e ao tempo de voo no corpo de prova ( $c_t$ ), respectivamente, conforme (14) e (15).

$$c_x = \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{1}{x} \quad (14)$$

$$c_t = \frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{x}{t} \quad (15)$$

A incerteza combinada da velocidade do corpo de prova ( $u_c$ ) foi calculada segundo (16).

$$u_c = c_x^2 \cdot u_x^2 + c_t^2 \cdot u_t^2 \quad (16)$$

A incerteza expandida para os mensurandos foi calculada para uma probabilidade de abrangências de 0,95.

## Resultados

O resultado da medição da caracterização da espessura e velocidade de propagação longitudinal do corpo de prova, bem como as respectivas incertezas padrão e expandidas associadas, são apresentados nas Tabelas 1 e 2, para dois operadores distintos. De maneira complementar determinou-se o erro normalizado com base nos valores de velocidade e espessura calibrados segundo a norma ABNT NBR 15824:2010 [6].

Tabela 1: Mensurandos ( $t$ ,  $x$  e  $c$ ) e respectivas incerteza combinada ( $u$ ), fator de abrangência ( $k$ ), incerteza expandida ( $U$ ) e erro normalizado ( $E_n$ ) referente ao operador 1.

Mensurando e Incertezas para o operador 1		
	$x$ (m)	$c$ (m·s <sup>-1</sup> )
Valor médio	<b>0,10130</b>	<b>5738</b>
<i>u</i> tipo A	1,92E-05	3,63
<i>u</i> tipo B	5,03E-05	4,89
<i>k</i>	1,97	2,04
<i>U</i>	<b>0,00011</b>	<b>13</b>
<i>E<sub>n</sub></i>	0,7	1,0

Tabela 2: Mensurandos ( $t$ ,  $x$  e  $c$ ) e respectivas incerteza combinada ( $u$ ), fator de abrangência ( $k$ ), incerteza expandida ( $U$ ) e erro normalizado ( $E_n$ ) referente ao operador 2.

Mensurando e Incertezas para o operador 2		
	$x$ (m)	$c$ (m·s <sup>-1</sup> )
Valor médio	<b>0,10134</b>	<b>5736</b>
<i>u</i> tipo A	6,94E-05	3,38
<i>u</i> tipo B	5,15E-05	4,76
<i>k</i>	2,26	2,03
<i>U</i>	<b>0,00020</b>	<b>12</b>
<i>E<sub>n</sub></i>	0,3	0,9

## Discussão e Conclusão

Foi desenvolvido, avaliado e validado um método de medição da velocidade de propagação longitudinal de corpos de prova. Neste trabalho, foram reportados os resultados relativos à espessura do corpo de prova e sua velocidade de propagação longitudinal. O corpo de prova foi um tarugo cilíndrico de aço, calibrado previamente por um método normalizado quanto a sua

velocidade de propagação longitudinal e comprimento [6].

A validação do sistema se deu comparando os resultados das medições realizadas neste trabalho com os resultados na calibração do corpo de prova. O parâmetro de comparação foi o Erro Normalizado ( $E_n$ ). Nesta abordagem, os resultados são considerados satisfatórios se  $E_n \leq 1$ . No presente trabalho, observam-se nas tabelas 1 e 2 os erros normalizados inferiores ou iguais a 1 em todos os casos. Neste pressuposto, o método pode ser considerado validado para medição de espessura de corpos de prova e velocidade de propagação longitudinal (inicialmente em 5 MHz).

Na literatura encontram-se diversas referências citando resultados de medição de velocidade de propagação de corpos de provas dos mais variados materiais, tanto sólidos quanto líquidos, ou mesmo gasosos. Entretanto, poucos autores dão a devida atenção aos rigores metrológicos nos seus estudos, ou no mínimo não reportam apropriadamente seus resultados. A Incerteza, por exemplo, a despeito de ser parte obrigatória de uma completa expressão de um resultado de medição [1, 2, 4, 5, 6], normalmente não é reportada. Outras vezes a incerteza é confundida equivocadamente com erro ou desvio padrão e quando reportam não especificam detalhes da validação do método de medição ou como foram calculadas as respectivas incertezas.

Cannon *et al.* (2011) afirmaram em seu estudo terem realizado a validação do método de medição do sistema macroscópico acústico (SAMA) por eles desenvolvido para velocidade de propagação ultrassônica. Foi utilizado o método de medição por pulso eco, com frequência central do transdutor de 7,5 MHz e um tanque com água desgaseificada a 21,5°C. Para validar o método, os autores utilizaram uma célula de referência de óleo de silicone disponibilizado pela *National Physical Laboratory* (NPL, Teddington, Reino Unido). Os autores relatam uma velocidade de propagação de 1385 m·s<sup>-1</sup>, portanto variando em torno de 0,2% (~3 m·s<sup>-1</sup>) em relação ao material de referência utilizado (1382 ± 14 m·s<sup>-1</sup>, segundo o NPL). Sem maiores rigores estatísticos, os autores consideram o método de medição validado [8]. Esta afirmação está incompleta, uma vez que as incertezas encontradas pelos autores não foram reportadas.

Brewin *et al.* (2008) realizaram um estudo de estabilidade a longo prazo, por período de dois anos, das propriedades acústicas de um corpo de prova a base de agar. Os autores usaram dois sistemas de medição (um empregando o método transmissão-recepção de banda estreita e o outro, pulso-eco de banda larga) ambos com base na técnica de substituição e frequência central de 20 MHz. No corpo de prova utilizado, obtiveram uma velocidade de 1540,9 m·s<sup>-1</sup> e incertezas de medição de 2,75 (banda estreita) e 7 m·s<sup>-1</sup> (banda larga). Apesar de informadas as incertezas, a forma como elas foram combinadas não está clara, nem tampouco é informada a probabilidade de abrangência. No tocante a medição da espessura, os autores empregaram o tempo de voo para

calculo da espessura do corpo de prova obtendo uma incerteza de medição de 0,1% [9], novamente sem maiores detalhamentos.

Recursivamente, não se encontram na literatura informações completas sobre a forma de calcular incerteza. Muitas vezes, nem a informação sobre a incerteza está presente nos artigos. A comunidade científica internacional tem como consenso que utilizar o Guia de Expressão de Incerteza de Medição – GUM [5] permite que se calcule a incerteza com suficiente rigor estatístico. A incerteza é um parâmetro fundamental para se compararem resultados experimentais, qualquer que seja a área ou aplicação do mensurando. Prescindir desta informação coloca em risco a validade dos resultados reportados em um estudo, e inviabiliza uma apropriada comparação de resultados obtidos em diferentes realizações do mensurando.

### Agradecimentos

Às agências CNPq, CAPES e FAPERJ pelo apoio financeiro, e aos pesquisadores Ruan Mayorm e Douglas Braz pelo apoio técnico.

### Referências

- [1] INMETRO. DOQ-CGCRE-008: Orientações sobre validação de métodos analíticos. 4ª revisão, INMETRO: Duque de Caxias, 2011.
- [2] INMETRO. Vocabulário Internacional de Metrologia. Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. (VIM 2012), 3ª ed., INMETRO: Duque de Caxias, 2012.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Avaliação de conformidade – Vocabulário e princípios gerais. ABNT NBR ISO/IEC 17000: 2005.
- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Requisitos gerais para a competência dos laboratórios de ensaio e de calibração. ABNT NBR ISO/IEC 17025: 2005.
- [5] Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição. (GUM 2008). Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Ensaio não-destrutivo - Ultrassom - Medição de espessura. ABNT NBR 15824: Rio de Janeiro, 2010.
- [7] J. Lubbers and R. Graaff. A simple and accurate formula for the sound velocity in water. *Ultrasound in Med. and Biol.*, v.24, n.7, p.1065-1068, 1998.
- [8] L.M. Cannon, A.J. Fagan and J.E. Browne. Novel tissue mimicking materials for high frequency breast ultrasound phantoms. *Ultrasound in Medicine and Biology*, v.37, n.1, p.122-135, 2011.
- [9] M.P. Brewin, L.C. Pike, D.E. Rowland and M.J. Birch. The acoustic properties centered on 20 MHz, of IEC agar-based tissue mimicking materials and its temperature, frequency and age dependence

Ultrasound in Medicine and Biology, v.34, n.8,  
p.1292-1306, 2008.