

Fundamentos de ondas ultrassônicas: técnicas e aplicações

1st Rayanne Gonçalves

Departamento de Engenharia Elétrica

Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, Brasil

rayanne@ele.puc-rio.br

2nd Lucas Martinho

Departamento de Engenharia Elétrica

Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, Brasil

lucas.martinho@cpti.cetuc.puc-rio.br

3rd Danillo Catalão

Departamento de Informática

Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, Brasil

danillo.nascimento@mindsatwork.com.br

Resumo—Este relatório tem como objetivo demonstrar técnicas de ensaio não destrutivo por ultrassom para medições de espessura, detecção de defeitos, medições de atenuação e velocidade em diferentes materiais, utilizando transdutores na faixa de ultrassom.

Index Terms—Ultrassom, ensaios não-destrutivos

I. INTRODUÇÃO

A técnica de ensaio não destrutivo por ultrassom é fortemente utilizada na indústria para detecção interna de defeitos em materiais, descontinuidades internas ou para a medição de espessura de paredes.

Este documento reporta a empregabilidade desta técnica para medição de espessura, detecção de defeitos, medição de atenuação, velocidade e impedância a partir dos modos de operação Pulso-Eco e Pitch-Catch.

No modo Pulso-Eco, o aparelho produz um pulso no instante (T_1), esse se propaga pela peça, e neste instante (T_1) o circuito de controle do aparelho inicia a contagem do tempo, figura 1. Ao incidir numa descontinuidade (interface), que se encontra na distância (S), ocorre a reflexão da onda emitida pelo cristal que é representado pelo eco de reflexão na tela do aparelho de ultrassom, figura 2. (ANDREUCCI, R., 2011).

No modo Pitch-Catch são utilizados 2 transdutores, um atuando como emissor e o outro como receptor. Onde o pulso emitido é refletido uma ou mais de uma vez até chegar ao receptor. Há 2 amplas categorias para essa técnica: Direto e indireto. No Pitch-Catch direto, figura 3, o receptor é posicionado onde o feixe refletido é esperado se não houve defeitos. A presença de um defeito no material é detectada caso o sinal lido pelo receptor esteja ausente ou enfraquecido (causado pela impedância acústica e atenuação do defeito).

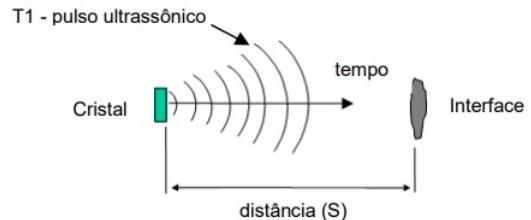


Figura 1. Emissão do sinal ultrassônico (ANDREUCCI, R.,2011).



Figura 2. Reflexão do sinal emitido (ANDREUCCI, R.,2011).

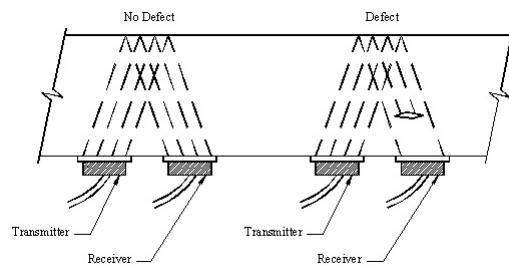


Figura 3. Pitch-Catch direto.

No modo Pitch-Catch indireto, figura 4, o receptor é posicionado onde o feixe refletido é esperado se um defeito existir.

A presença de um defeito é detectada caso o receptor leia algum sinal relevante.

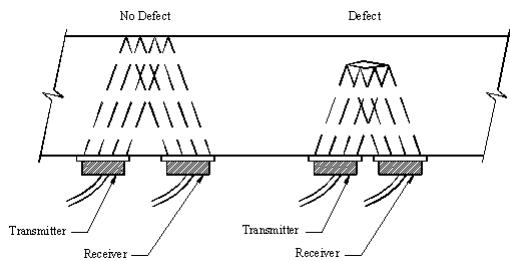


Figura 4. Pitch-Catch indireto.

II. DETECÇÃO DE DEFEITO POR PULSO-ECO

O objetivo deste ensaio é determinar a profundidade de dois defeitos presentes em uma placa de aço através da técnica pulso-eco usando o transdutor Panametrics 5MHz V109. Os valores reais da profundidade para os dois furos, obtidos com o auxílio de um paquímetro, foram de 21.95mm e 5.5mm.

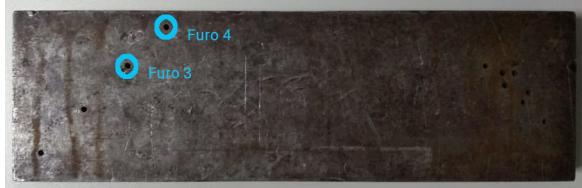


Figura 5. placa de aço estudada.

A primeira etapa deste ensaio consistiu em determinar a velocidade do som na peça de aço inspecionada pela técnica pulso-eco. Para isto, o transdutor foi posicionado sobre a parte sem defeito da peça. A figura 6 mostra o sinal adquirido para esta configuração.

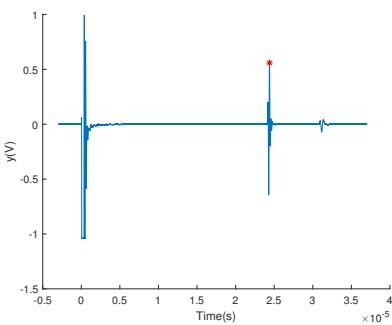


Figura 6. Reflexão do eco de fundo.

A velocidade de propagação no aço pode ser determinada a partir da equação 1. Onde D, é a espessura da placa e tp o tempo de pico do primeiro eco. A partir do sinal de reflexão do eco de fundo, obteve-se como tempo de pico 24.39 μ s. Com o auxílio de um paquímetro obteve-se como espessura da placa 71.05 mm. Com base nesses dados, a velocidade de propagação no aço calculada foi de 5825 m/s.

$$v = \frac{2D}{tp} \quad (1)$$

Real (m/s)	Experimental (m/s)	Erro(%)
5900	5825	12.7

Tabela I

ERRO PERCENTUAL NA OBTENÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO NO AÇO.

Utilizando a velocidade de propagação calculada, a profundidade do furo pode ser medida ajustando a equação 1 para a equação 2.

$$p = \frac{v_{aço}tp}{2} \quad (2)$$

Na obtenção dos sinais de reflexão o transdutor foi posicionado sobre a parte com os defeitos da peça. A figura 7 mostra dois sinais. Em ambos, o primeiro eco, com o pico destacado em vermelho, é o eco do defeito. O segundo eco é o eco do fundo da placa.

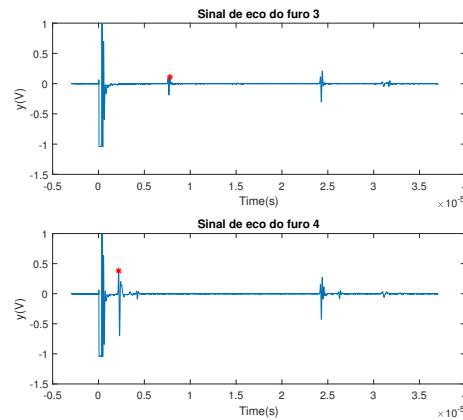


Figura 7. Reflexão dos defeitos.

Os tempos de picos para os furos 3 e 4 foram, respectivamente, 7.788 μ s e 2.200 μ s. A Tabela II resume os valores de profundidade obtidos a partir desses dados aplicados na equação 2.

Furo	Real (mm)	Experimental (mm)	Erro(%)
3	21.95	22.7	3.41
4	5.50	6.40	16.4

Tabela II
ERRO PERCENTUAL NO CÁLCULO DA PROFUNDIDADE DOS FUROS.

No cálculo da velocidade de propagação no aço considerou-se somente o tempo de pico do primeiro eco. No modo de operação pulso-eco, o tempo de pico de referência sofre incerteza devido à influência do tempo de excitação. Para obter maior precisão seria necessário calcular a velocidade a partir da diferença entre dois tempos de pico consecutivos. Além disso, outro fator que afeta a precisão nos cálculos de velocidade e de posição é a amostragem do sinal. A

amostragem limita o valor de referência do tempo de pico. A aplicação de técnicas avançadas para obtenção do tempo de referência, como a aplicação da transformada de Hilbert para interpolação, seria uma forma de reduzir o erro oriundo da amostragem.

O erro no cálculo da posição do furo 4 foi bastante alto. Isto porque este furo é muito próximo à superfície do corpo de prova e, por consequência, o eco do defeito sofre interferência com o sinal de excitação.

III. PITCH-CATCH POR FEIXE OBLÍQUO

Neste experimento usa-se duas cunhas com ângulo nominal de 60° para medir as posições dos ecos onde os picos são máximos e o tempo em que esses picos ocorrem. As cunhas possuem essa angulação com o propósito de somente transmitir ondas transversais, do tipo S, no material a ser analisado. Esta possibilidade provém da Lei de Snell,

$$\frac{\sin(\theta_i)}{c_1} = \frac{\sin(\theta_{tP})}{c_{2P}} = \frac{\sin(\theta_{tS})}{c_{2S}} \quad (3)$$

Sendo c_{2P} e c_{2S} as velocidades das ondas P e S no meio 2 e θ_{tP} e θ_{tS} os ângulos de propagação das ondas P e S no meio 2. Como $c_{2P} > c_{2S}$, temos que $\theta_{tP} > \theta_{tS}$.

Logo, o primeiro ponto crítico do material, aquele em que a única onda propagante é a onda S, pode ser calculado através da expressão:

$$\theta_{CR_1} = \arcsin\left(\frac{c_1}{c_{2P}}\right) \quad (4)$$

Também existe um segundo ângulo crítico, a partir do qual a onda transversal também passa a ser transmitida somente na superfície, impossibilitando sua leitura pelo transdutor. Isso mostra que cada cunha deve ser feita pensando em um material específico para se analisar, já que os ângulos críticos podem variar dependendo da velocidade, sendo importante trabalhar entre os dois.

Na montagem explicitada pela figura 8, o transdutor a esquerda funciona como o transdutor emissor. Sua posição é mantida fixa e serve como referência. O transdutor a direita é o receptor e pode ser movimentado em direção oposta ao transdutor de referência. O processo de identificação dos picos consiste em movimentar a segunda cunha em direção oposta a cunha de referência acompanhando com o osciloscópio o momento em que a amplitude do sinal recebido se torna máxima. Os sinais explícitos pela figura 9 correspondem, respectivamente, ao primeiro e ao segundo pico máximo que ocorrem para $t_{pico1} = 41.84\mu s$ e $t_{pico2} = 67.62\mu s$. Esse picos ocorrem respectivamente para as distâncias $7.3mm$ e $14.2mm$, medidas com o auxílio de uma régua.

A partir do esquemático mostrado na figura 10, pode-se afirmar que o primeiro máximo ocorre em $L_1 = 2H\tan(\theta)$ e o segundo máximo em $L_2 = 2L_1 = 4H\tan(\theta)$. O tempo de propagação da onda até atingir a posição L_1 é $\Delta t_1 = \frac{2H}{\cos(\theta)} \frac{1}{C_s}$. Consequentemente, o tempo de propagação até atingir L_2 é $\Delta t_2 = 2\Delta t_1$.

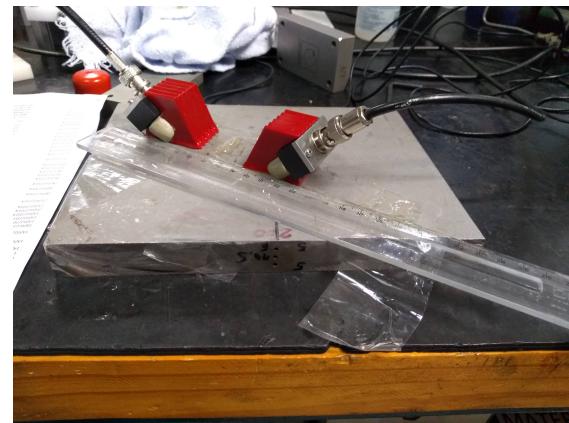


Figura 8. Montagem do modo de operação Pitch-Catch.

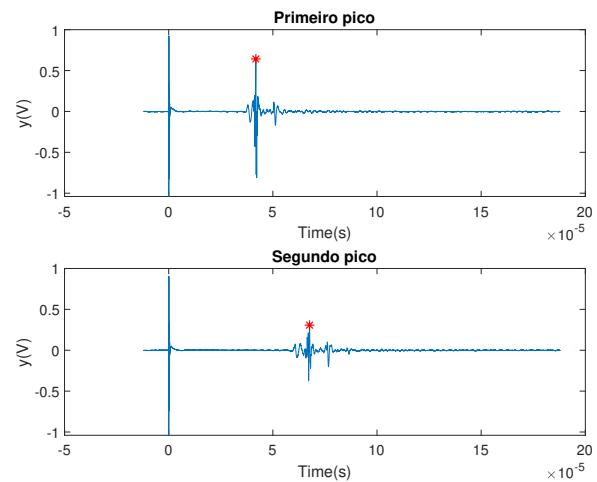


Figura 9. Reflexão dos defeitos.

A Tabela III resume as posições de pico e seus respectivos tempos de ocorrência obtidos para ângulo nominal de 60° , velocidade de propagação da onda transversal no aço igual $C_s = 3200 m/s$ e altura da peça correspondente à $H = 21.5mm$.

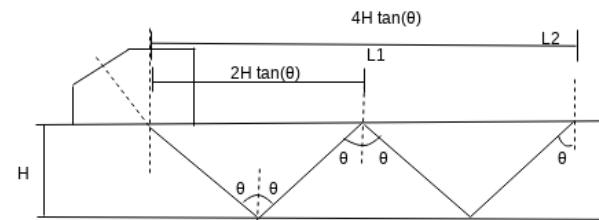


Figura 10. Esquemático.

Comparando as distâncias calculadas com os valores esperados (tabela III), tem-se um erro de 1.92% para a primeira posição e 4.22% para a segunda posição. Ao comparar os

$\Delta t_n(\mu s)$	$L_n(mm)$
$\Delta t_1 = 26.87$	$L_1 = 7.44$
$\Delta t_2 = 53.74$	$L_2 = 14.8$

Tabela III

VALORES TEÓRICOS PARA O TEMPO DE PICO E POSIÇÕES ONDE A AMPLITUDE É MÁXIMA.

tempos de picos, observa-se uma grande discrepância. No entanto $t_{pico2} - t_{pico1} = 25.78\mu s$, ou seja, o tempo de propagação do primeiro máximo para a ocorrência do segundo máximo é próximo ao intervalo teórico de $\Delta t = 26.87\mu s$. Portanto, essas discrepâncias nos tempos de pico podem ser decorrentes de uma referência de tempo equivocada.

IV. MEDAÇÃO DE VELOCIDADE COM CHAPAS IMERSAS (PULSO-ECO)

A montagem consiste em submergir um transdutor em água para medir a velocidade de propagação na chapa de aço que fica no final do suporte, além de medir a velocidade de propagação na água, utilizando o esquema da figura 11.

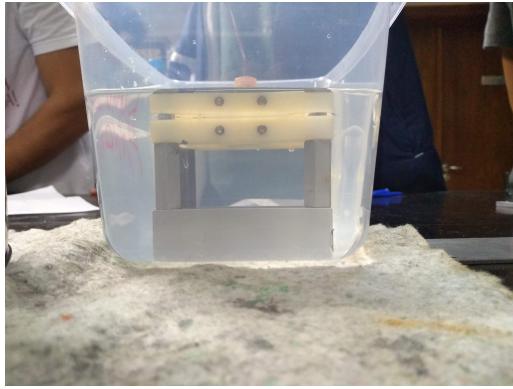


Figura 11. Montagem para o experimento pulso-eco.

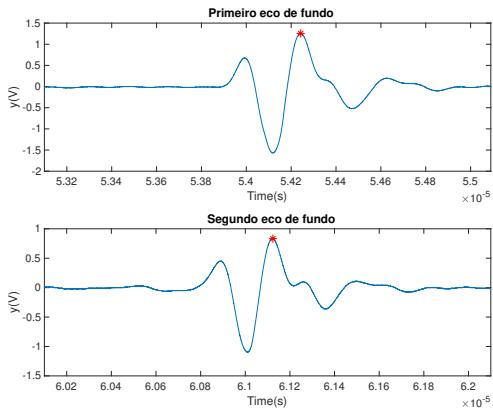


Figura 12. Sinais referentes ao eco do fundo da placa de aço.

A velocidade pode ser determinada, novamente, pela equação 1. Desta vez, foram utilizados os segundos picos de eco, o que aumenta a confiança da medida. Assim, as velocidades calculadas foram $v_{água} = 1482.5 \frac{m}{s}$ e $v_{aço} = 5812.9 \frac{m}{s}$

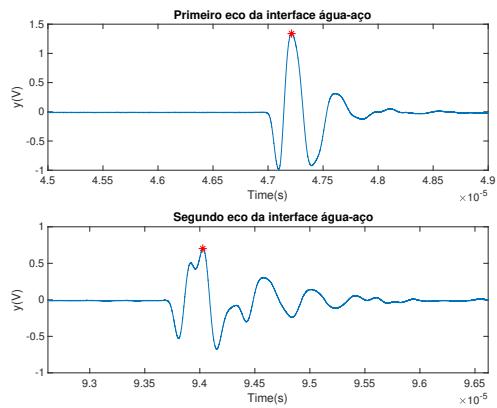


Figura 13. Sinais referentes ao eco da interface entre água e aço.

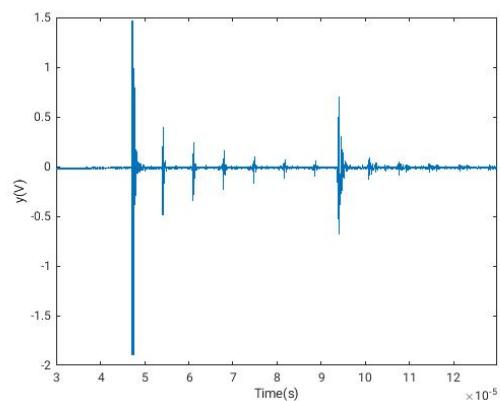


Figura 14. Reflexões na chapa de 20mm.

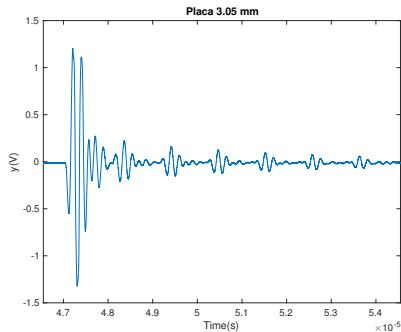


Figura 15. Reflexões na chapa de 3.05mm.

Como é possível notar comparando os sinais recebidos utilizando as placas de 3.05mm e 2mm, com o sinal recebido através da placa de 20mm, se torna muito mais difícil implementar os cálculos feitos anteriormente nesta seção. Isso se deve à espessura muito pequena da placa, o que torna os sinais de reflexão cada vez mais 'acavalados'. Isso aumentaria o erro de medição pois não seria possível precisar qual pico de reflexão estaria sendo utilizado para os cálculos de velocidade e espessura.

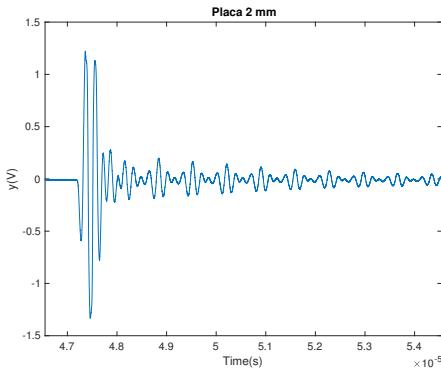


Figura 16. Reflexões na chapa de 2mm.

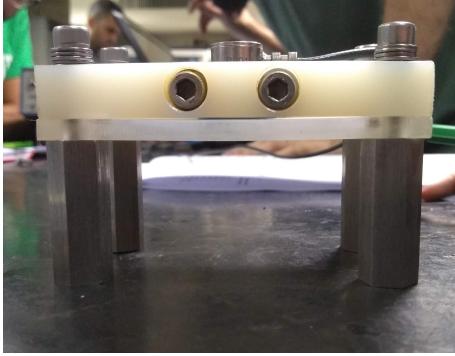


Figura 17. Chapa de acrílico em contato com o transdutor.

V. MÉTODO DA REFLEXÃO RELATIVA PARA MEDAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE UM MEIO DESCONHECIDO

Neste experimento, uma chapa de acrílico é colocada em contato direto com o transdutor. A figura 17 explica a estrutura do experimento. Na extremidade inferior dessa estrutura coloca-se uma chapa de aço de espessura 20mm. Desta forma, a chapa de acrílico compõe o meio 1, a chapa de aço o meio 3 e o meio 2 é o fluido comportado entre o meio 1 e 3, ou seja, entre o acrílico e o aço.

A aplicação do método da reflexão relativa para medição da impedância de um meio desconhecido consistiu em 2 etapas.

Na primeira etapa, o meio 2 é o ar. Uma vez que a impedância do ar é aproximadamente nula, a reflexão do meio 1 para o meio 2 é total e o coeficiente de reflexão é $R_{12|ar} = -1$. Assim, a equação 5 pode ser igualada à -1 e, por consequência, $A_0 = -A_{1|ar}$.

$$R_{12|ar} = \frac{A_{1|ar}}{A_0} \quad (5)$$

Na segunda etapa, o meio 2 é o meio desconhecido. E o coeficiente de reflexão dado pela equação 6.

$$R_{12|amostra} = \frac{A_{1|amostra}}{A_0} \quad (6)$$

Na primeira etapa foi determinado que $A_0 = -A_{1|ar}$. Então a equação 6 pode ser reescrita para equação 7. Assim,

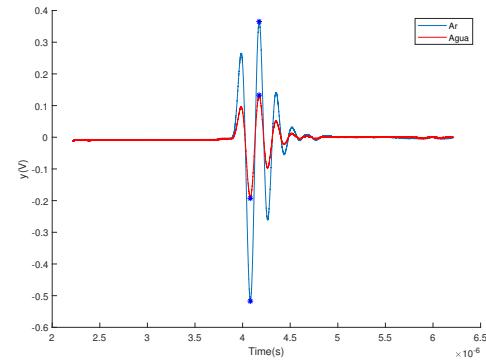


Figura 18. Primeiro eco para o ar como meio 2 e primeiro eco para a água como o meio 2.

determinar a impedância de um meio desconhecido se resume em determinar a razão entre as amplitudes máximas da amostra do meio desconhecido e do ar.

$$R_{12|amostra} = \frac{A_{1|amostra}}{-A_{1|ar}} \quad (7)$$

No ensaio, usou-se como meio desconhecido a água. A figura 18 mostra em azul a medida realizada no ar (primeira etapa) e em vermelho a medida realizada na água. Ambos são sinais do primeiro eco da reflexão.

A impedância foi calculada considerando a razão da amplitude máxima dos dois ecos e também a razão pico-a-pico do sinal. Os pontos de pico-a-pico são representados no gráfico por asteriscos azuis.

Considerando apenas a amplitude máxima $R_{12|amostraMax} = -0.3640$. Considerando a amplitude pico-a-pico $R_{12|amostraPP} = -0.3690$.

Dado que para o acrílico $c = 2755.4\text{ m/s}$ e $\rho = 1217.3\text{ kg/m}^3$, então $Z_{acr} = 3.354\text{ MRayl}$. A Tabela IV foi construída considerando esses dados aplicados na equação 8.

$$Z_{água} = Z_{acr} \frac{1 + R_{12|amostra}}{1 - R_{12|amostra}} \quad (8)$$

Método	Z (MRayl)	Z esperado (MRayl)	Erro(%)
Max	1.564	1.484	5.39
Pico-a-pico	1.545	1.484	4.11

Tabela IV
ERRO PERCENTUAL NO CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DA ÁGUA.

VI. MEDAÇÃO DE VELOCIDADE E ATENUAÇÃO (PULSO-ECO)

A montagem desse experimento consiste em fixar o transdutor em uma extremidade do suporte, e na outra extremidade, uma placa de acrílico. Essa montagem é então submersa em água como na figura 19.

Esse experimento tem como intuito medir a atenuação da onda na chapa de acrílico, analisando o enfraquecimento do sinal causado pela propagação no material. É necessário levar



Figura 19. Montagem do experimento

em conta também, o enfraquecimento do sinal devido aos coeficientes de transmissão e reflexão dos meios envolvidos explicitado pela figura 20.

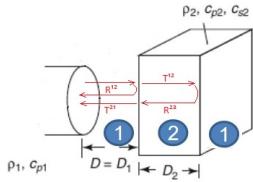


Figura 20. Coeficientes de transmissão e reflexão

O coeficiente de atenuação é então descrito pela equação 9.

$$\alpha = \frac{-1}{2D_2} \log\left(\frac{R_{12}}{R_{23}T_{12}T_{21}} \frac{pk - pk\{v_{back_eco}\}}{pk - pk\{front_eco\}}\right) \quad (9)$$

Sendo D_2 a largura da chapa de acetato, R_{xy} o coeficiente de reflexão do meio x para o meio y , , T_{xy} o coeficiente de transmissão do meio x para o meio y , $pk - pk\{back_eco\}$ a tensão pico a pico do sinal de eco de fundo do acrílico, $pk - pk\{front_eco\}$ a tensão pico a pico do sinal de eco da parede de acrílico.

Na figura 21, o primeiro sinal de eco corresponde ao eco da superfície e o segundo, ao eco do fundo do material. Os picos de amplitude, representados por um asterístico vermelho, foram aplicados na equação 9.

Analizando os tempos de pico na Figura 21 junto da figura 22, podemos calcular a velocidade da onda no acrílico, a equação 1, $c_{acrilico} = 2696.3m/s$. Este valor é muito próximo ao valor teórico, apresentando um erro de 1.23%.

A resolução desta equação nos deu uma atenuação de $66.7294Np/m$ ou $579.61dB/m$ para $c_{acrilico}=$,

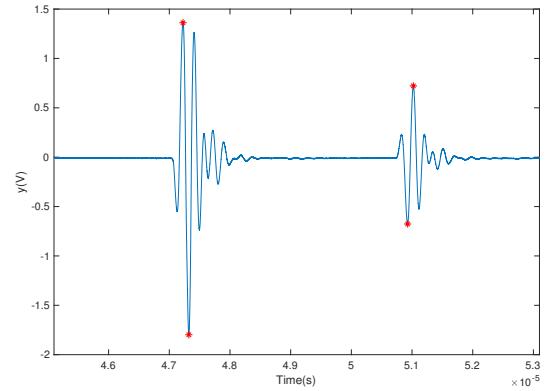


Figura 21. Eco da superfície e eco do fundo da peça no domínio do tempo.

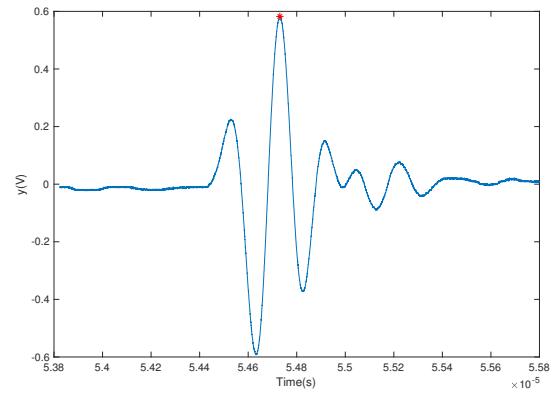


Figura 22. Segundo eco da peça de alumínio.

$\rho_{acrilico}=1180kg/m^3$ e $c_{água} = 1480m/s$, $\rho_{água} = 1000kg/m^3$. Comparando essa atenuação obtida experimentalmente com o valor tabelado de 570 dB/m tem-se um erro de 1.69%.

Para obter a atenuação no domínio da frequência, a razão entre os valores pico-a-pico dos sinais de eco na equação 9, foi substituída pela razão da transformada de fourier desses sinais. A figura 23 mostra o sinal do eco da superfície, em azul, e o sinal do eco de fundo, em vermelho, no domínio da frequência. Como esperado, o sinal do eco de fundo tem amplitude reduzida devido a atenuação que o sinal sofre ao se propagar no acrílico.

É esperado que a atenuação no domínio da frequência na frequência central 5 MHz seja igual à atenuação calculada no domínio do tempo Na figura 24 a atenuação no domínio do tempo é mostrada. Note que na frequência central tem-se 598.4db/m de atenuação para frequência central. Isto representa 3.24% de erro em comparação ao valor da atenuação no domínio do tempo, 579.61dB/m. Um valor aceitável ao considerar os erros de amostragem e as imprecisões experimentais.

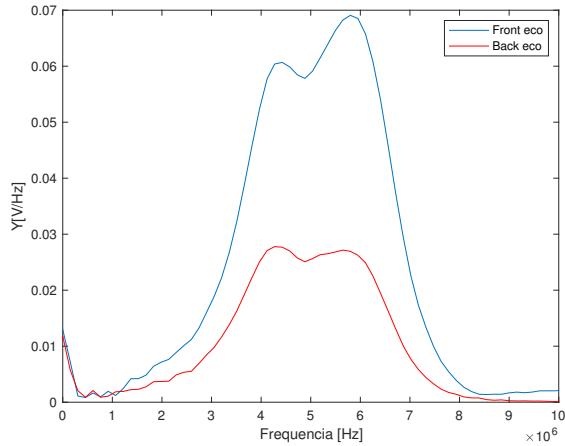


Figura 23. Eco da superfície e eco do fundo da peça no domínio da frequência.

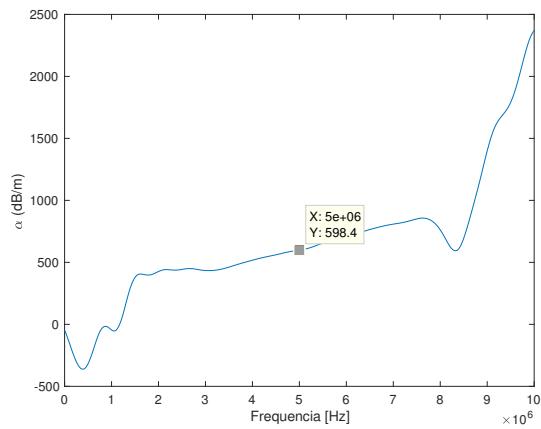


Figura 24. Atenuação no domínio da frequência na banda 0-10 MHz.

VII. CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou como as diferentes técnicas de inspeção por ultrassom relatadas acima são extremamente úteis e precisas a fim de determinar diversos parâmetros desconhecidos dos materiais estudados, além de outras importantes informações como posição e tamanho de falhas em placas e blocos analisados.

Revisando todos os resultados, o maior erro encontrado foi em torno de 16%, isso mostra que os experimentos, junto aos cálculos feitos através deles, corroboram com a teoria dada em sala.

REFERÊNCIAS

- [1] CHEEKE, J. D. N. *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. CRC Press , Second Edition, 2017.
- [2] SCHMERR JR., L. W. *Fundamentals of Ultrasonic Non destructive Evaluation: A Modeling Approach*. Springer, Second Edition, 2016.
- [3] IROSE, J. L. *Ultrasonic waves in solid media*. Cambridge University Press, 1999.
- [4] ANDREUCCI, R. *Ensaio não destrutivo por ultrassom*. Ed. Jan/2011.