

T7 - Caracterização de materiais através de ultrassons

Laboratórios de Física 3

Daniela Oliveira Santos

Novembro 2021

Abstract

Nesta atividade experimental foi estudada a emissão/receção de sinais ultrassônicos. Com este foi possível caracterizar o fantoma de acrílico, nomeadamente a sua morfologia e velocidade de propagação do sinal ($v_{acri} = (2731 \pm 3)ms^{-1}$). Visava-se determinar o tempo de atraso característico de duas sondas ultrassónicas, sendo que apenas se estimou esse valor ($t_{2L} = 2.6\mu s$). Foi ainda estudado e observado o fenómeno de atenuação no fantoma, não tendo sido possível quantificá-lo.

1 Introdução

Apesar dos grandes avanços tecnológicos em áreas de medicina, diagnóstico e testagem, métodos como sonografia continuam a ser fortemente utilizados, mesmo sendo baseados em princípios físicos bastante simples, como é o caso da propagação de ondas sonoras.

Uma ecografia faz uso de sinais ultrassónicos que se propagam linearmente pelo meio. A relação entre a velocidade desses sinais e o tempo de voo no meio em questão permitem inferir a que distância se encontra o objeto/defeito que provocou a reflexão. Outras medições como a dimensão do obstáculo podem ser conseguidas usando várias direções de incidência.

1.1 Ondas acústicas e o meio

A energia dos sinais ultrassónicos é repartida pelos vários fenómenos que ocorrem na interface acústica, nomeadamente reflexão e transmissão. Essa repartição é quantificada pelos coeficientes de reflexão e transmissão, os quais têm em conta a impedância acústica (Z) dos meios envolvidos na interface.

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2, \quad (1)$$

onde

$$Z = \rho v \quad (2)$$

com $\rho \equiv$ densidade e $v \equiv$ velocidade de propagação no meio e R corresponde à refletância, ou seja, a porção do sinal que é refletido na interface entre os dois meios.

Por conseguinte, uma maior impedância acústica resulta numa menor propagação da onda sonora no meio e, de (1), percebemos que interfaces com uma maior diferença na impedância acústica resultam numa maior quantidade de sinal refletido.

Quanto à potência transmitida, relaciona-se com R através da expressão $T = 1 - R$, em que T é designado por transmitância.

Outro fenômeno relevante é a atenuação da amplitude da onda devido a fenômenos de absorção ou a imperfeições do meio. Essa atenuação é dada por:

$$A = A_0 e^{-\mu s}, \quad (3)$$

onde μ corresponde ao coeficiente de atenuação característico do material. Porém, este valor é dependente da frequência ultrassônica - frequências maiores apresentam maior coeficiente de atenuação [Gam].

É usual exprimir o coeficiente de atenuação em unidades de $dB.cm^{-1}$ (μ') e, uma vez que experimentalmente esse valor é obtido em cm^{-1} , a conversão é dada por:

$$\mu' = \frac{20}{\ln(10)}\mu \quad (4)$$

1.2 Transdutor piezo-elétrico e medições

A produção e detecção de ultrassons são feitas recorrendo a um transdutor piezo-elétrico, como aquele apresentado na Fig. 1, cuja utilidade se baseia na capacidade de transformar um sinal mecânico num sinal elétrico.

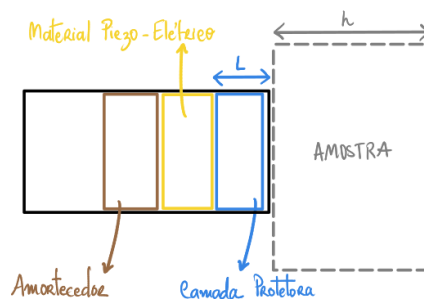


Fig.1: Esquema simplificado de um transdutor piezo-elétrico

Ao aplicar uma tensão elétrica ao material cerâmico piezo-elétrico, são geradas ondas mecânicas a uma frequência ultrassônica característica do material.

Após a emissão do sinal, o sensor entra em modo de escuta, convertendo a onda longitudinal de pressão variável (sinal mecânico) num sinal elétrico. Este processo de emissão/receção repete-se periodicamente à frequência f_{imp} .

Cada transdutor tem associado ao seu funcionamento características relevantes para o estudo dos sinais obtidos, nomeadamente resolução axial, resolução lateral e *time-delay*.

1.2.1 Resolução axial e longitudinal

A resolução axial é a capacidade de discernir dois pontos dispostos ao longo do eixo de propagação do sinal. Por outro lado, a resolução lateral é a capacidade de discernir dois pontos no plano transversal a esse mesmo eixo.

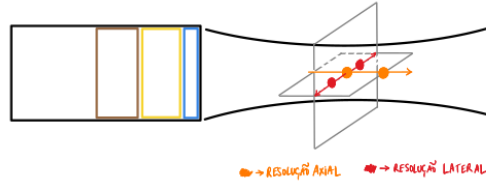


Fig.2: Resoluções axial e lateral

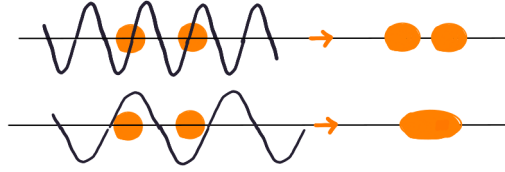


Fig.3: Efeito da frequência na resolução lateral

A frequência é o fator que condiciona estas medidas. Por um lado, a resolução lateral é favorecida pelo aumento da frequência, como podemos inferir da Fig. 3. Porém, esse mesmo aumento prejudica a resolução axial, como maiores frequências resultam num maior coeficiente de atenuação, é de esperar que não permitam penetrar tão bem no material.

1.2.2 Time-delay

A presença da camada protetora introduz um *time-delay* na propagação do sinal que deve ser tido em conta. O tempo de voo (ida e volta) do ultrassom é dado por

$$\begin{aligned} \Delta t &= t_{2h} + t_{2l} \\ \Leftrightarrow \Delta t &= \frac{2h}{v_{meio}} + t_{2L} \end{aligned} \quad (5)$$

O valor de t_{2L} , específico de cada transdutor, deve ser determinado de forma a poder calibrar medidas de profundidade ou outras que se venham a realizar.

1.3 Modos de inspeção de ultrassons

Os sinais gerados pelo transdutor podem ser processados de formas diferentes, o que permite visualizar a informação recolhida noutras perspetivas. São dois desses métodos o A-Scan e o B-Scan.

O primeiro consiste na aplicação de um sinal linear que retorna um eco quando algum obstáculo interfere com o seu caminho, sendo portanto uma modulação de amplitude a uma dimensão, neste caso a profundidade.

Quanto ao B-Scan, corresponde a uma representação do plano transversal do objeto fornecendo informação de profundidade, sendo portanto uma análise mais completa do A-Scan (ver Fig. 4).

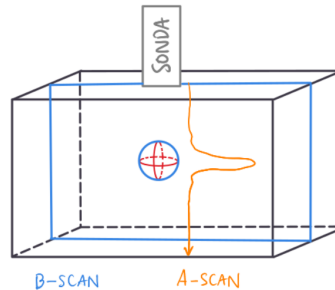


Fig.4: Representação dos modos de inspeção A-Scan e B-Scan

1.4 Objetivos

Neste trabalho, visámos recolher e analisar dados obtidos com transdutores piezo-elétricos, em particular:

- Caracterizar materiais, nomeadamente o acrílico, através de propriedades específicas como velocidade de propagação do som no meio, coeficiente de atenuação e morfologia;
- Avaliar o poder de resolução e a sua dependência com a frequência da sonda utilizada;
- Avaliar os modos de inspeção A-Scan e B-Scan

2 Materiais e métodos

A atividade foi preparada tendo por base o protocolo disponibilizado pelos docentes [Lab].

Em todo o decorrer da atividade foi utilizado um controlador e software PHYWE e duas sondas ultrassônicas de $1MHz$ e $2MHz$. Todas as medições de profundidades e diâmetros foram realizadas com o auxílio de uma craveira.

Numa primeira parte, estudámos a propagação do impulso ultrassonoro em três cilindros com alturas distintas feitos do mesmo material - acrílico - para as duas sondas, ou seja:

1. Medições com os três cilindros para a sonda 1 (modo *FULL* – $200\mu S$)
2. Medições com os três cilindros para a sonda 2 (modo *HALF* – *FULL* – $100\mu S$)

Este procedimento evitava termos de conectar/desconectar as sondas um número elevado de vezes. A recolha dos sinais foi feita utilizando uma das bases do cilindro encostada à sonda e a base oposta como interface de reflexão.

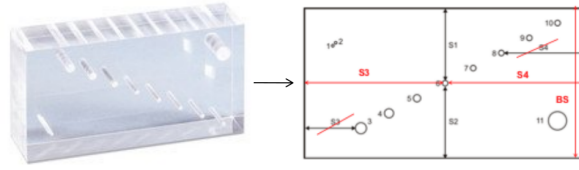


Fig.5: Fantoma de acrílico

Na segunda parte da atividade, procedemos à análise das medidas de A-Scan e B-Scan utilizando um fantoma de acrílico como amostra de estudo (Fig. 5)

Nas duas situações foi sempre colocada uma gota de água entre a sonda e o acrílico. Este cuidado tem como motivação o conceito de impedância acústica discutida na secção (1.1). Os três meios relevantes nesta atividade foram o ar, água e acrílico com impedâncias acústicas iguais a $Z_{ar} = 410.0 \frac{kg}{m^2 s}$, $Z_{água} = 1.478 \times 10^6 \frac{kg}{m^2 s}$ e $Z_{acri} = 3.26 \times 10^6 \frac{kg}{m^2 s}$.¹ Aplicando estes valores na equação (1), temos que a refletância **ar** → **acrílico** é de 0.995, enquanto que a refletância **água** → **acrílico** é de 0.1414, ou seja, o uso de água reduz significativamente a porção da onda que é refletida, resultando numa maior porção de energia transmitida. Este é o mesmo princípio pelo qual são aplicados géis nas ecografias!

NOTA: Uma das funcionalidades do software era o TGC - Time Gain Compensation. Uma vez que o sinal ultrassónico é atenuado à medida que se propaga, o equipamento vai amplificando o sinal à medida que o tempo passa de forma a compensar essa atenuação. A forma como o TGC é aplicado ao sinal deve ser estudada e alterada consoante a aplicabilidade à experiência. No nosso caso, tivemos este detalhe em falta.

¹Valores utilizados neste cálculo encontram-se em anexo.

3 Análise dos resultados

3.1 Parte A - Caracterização do acrílico

Os três cilindros que utilizámos tinham as seguintes dimensões:

Cilindro S	(19.00 ± 0.05) mm
Cilindro M	(40.00 ± 0.05) mm
Cilindro L	(80.45 ± 0.05) mm

Tabela 1: Alturas dos três cilindros em mm medidos com uma craveira

Os dados recolhidos com as sondas estão representados nos gráficos abaixo, mantendo a correspondência de cores, os dados azuis relativos à sonda $1MHz$ enquanto que os vermelhos à sonda $2MHz$.

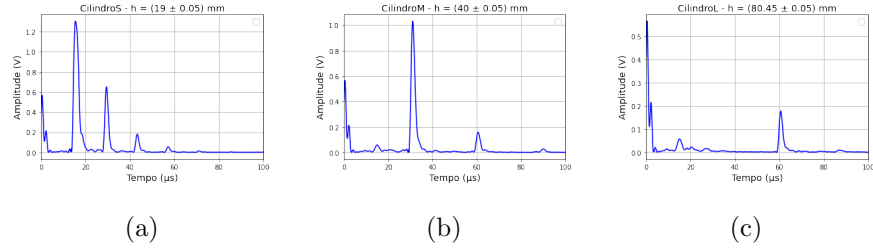


Fig. 6: Medidas com a sonda $1MHz$ para os cilindros: (a) S, (b) M e (c) L

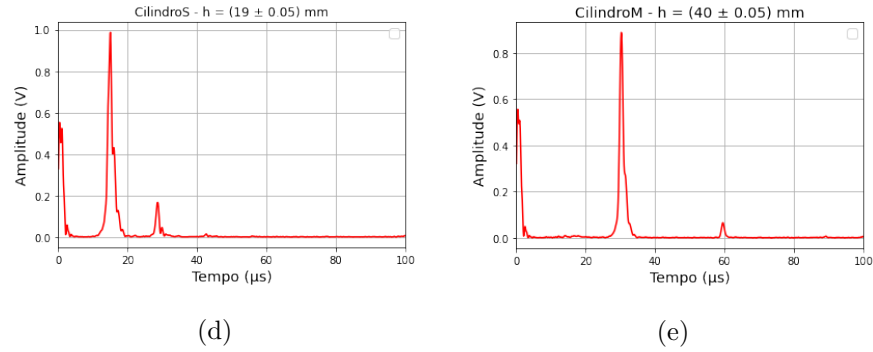


Fig. 7: Medidas com a sonda $2MHz$ para os cilindros: (d) S e (e) M

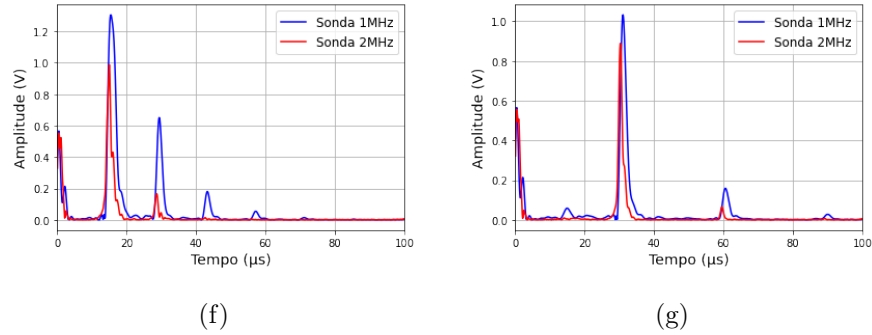


Fig. 8: Medidas de ambas as sondas para os cilindros: (d) S e (e) M

Na análise dos dados obtidos do software PHYWE, decidimos trabalhar apenas com a envolvente para uma leitura clara dos sinais.

Um aspeto comum a todos os gráficos apresentados acima e que corrobora a explicação dada na secção (1.1) são os picos iniciais entre os $0\mu s$ e os $10\mu s$. Este sinal corresponde a reflexões na interface camada protetora-água, que, considerando a primeira como tendo uma impedância semelhante à do acrílico, espera-se alguma reflexão mas reduzida ($R = 0.1414$).

Outros aspetos relevantes a depreender da análise qualitativa dos gráficos são:

- O número de picos, correspondentes a reflexões, lidos pelo transdutor diminui com o aumento de $h \equiv$ altura do cilindro. Para a mesma frequência, isto é, para a mesma sonda, a velocidade de propagação do som no acrílico é constante. Portanto, é de esperar que lendo o sinal na mesma janela de tempo, um percurso maior implique um maior número de reflexões, conforme observado.
- A diminuição dos máximos de amplitude valida a atenuação do sinal por processos de absorção e reflexão.
- Os gráficos da Fig. 8 mostram que a largura dos picos da sonda $1MHz$ é maior que a largura dos picos da sonda $2MHz$. Esta observação pode ser quantificada com valores de *Full Width Half Maximum* (Tabelas 2 e 3) que servem de medida da resolução espacial das sondas [Med], validando o que foi discutido na secção (1.2.1)

	Sonda 1MHz	Sonda 2MHz
Pico 1	2.6	1.3
Pico 2	1.7	1.0
Pico 3	1.6	X
Pico 4	1.5	X

Tabela 2: Valores de Full Width Half Maximum do cilindro S

	Sonda 1MHz	Sonda 2MHz
Pico 1	2.0	1.2
Pico 2	1.9	1.1
Pico 3	1.9	X

Tabela 3: Valores de Full Width Half Maximum do cilindro M

Para determinar o *time-delay* produzido pela camada protetora recolhemos os valores da distância percorrida ($\Delta s \equiv 2mh$) e tempo de voo correspondente (Δt). Este último corresponde à diferença entre dois pontos '*em fase*', que, no nosso caso, optámos por usar os picos. Noutra oportunidade, teríamos optado por outros pontos uma vez que os picos são os locais mais afetados pela atenuação e portanto não serão aqueles com os quais se obtêm os valores mais precisos [PHY].

Tomando os pares conjugados ($\Delta s, \Delta t$), obtém-se o comportamento linear descrito pela equação (5) onde o declive obtido é $m = \frac{2}{v_{acri}}$ e a ordenada na origem o valor que pretendemos determinar $b = \Delta t_{2L}$.

Atendendo a que o número de pontos para cada cilindro não era suficiente para uma boa estatística, decidimos juntar todos os valores retirados com uma mesma sonda, analisando-os conjuntamente.

NOTA: O *time-delay* depende da sonda que estamos a usar portanto a sua determinação deve ser feita para cada sonda.

Registaram-se os seguintes valores²:

Cilindro S		Cilindro M	
$\Delta t(\mu s)$	$v_{acri}(ms^{-1}) \pm 6$	$\Delta t(\mu s)$	$v_{acri}(ms^{-1}) \pm 6$
13.9	2733	29.4	2721
13.8	2733	29.5	2712
13.8	2733	X	X

Tabela 4: Dados da sonda 1MHz

²A expressão utilizada para o cálculo da incerteza dos valores da velocidade no acrílico encontra-se em anexo

Cilindro S		Cilindro M	
$\Delta t(\mu s)$	$v_{acri}(ms^{-1}) \pm 11$	$\Delta t(\mu s)$	$v_{acri}(ms^{-1}) \pm 5$
13.5	2794	29.2	2716

Tabela 5: Dados da sonda 2MHz

Não foi possível obter mais do que um pico para o cilindro L. Esta limitação deve-se ao facto de que para distâncias percorridas sucessivamente maiores, ter uma frequência maior reduz significativamente o tempo de reflexão e implica uma maior atenuação do sinal. Há, portanto, neste caso em particular, uma altura do cilindro limite para a qual não se observarão reflexões, onde os efeitos mencionados são significativos.

Com os dados acima, construímos os seguintes gráficos:

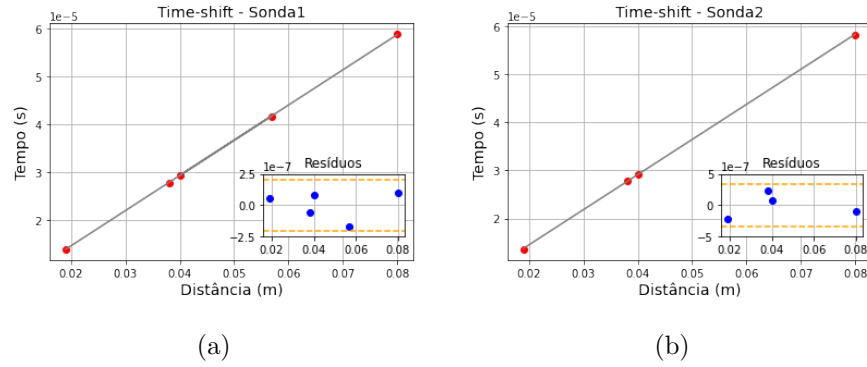


Fig. 9: Determinação do time-shift introduzido pelas sondas 1MHz (à esquerda) e 2MHz (à direita). Os parâmetros de ajuste são: (a) $m = (7.37 \pm 0.03) \cdot 10^{-4}$, $b = (-2 \pm 1) \cdot 10^{-7}$ e $r^2 = 0.99995$; (b) $m = (7.29 \pm 0.05) \cdot 10^{-4}$, $b = (-6 \pm 3) \cdot 10^{-8}$ e $r^2 = 0.9998$

Do declive conseguimos extrair a velocidade de propagação do sinal no acrílico³:

- Sonda 1MHz: $v_{acri} = (2713.773549 \pm 2 \times 10^{-6}) ms^{-1}$, com %erro = 1.3%
- Sonda 2MHz: $v_{acri} = (2741.782211 \pm 5 \times 10^{-6}) ms^{-1}$, com %erro = 0.3%

Porém, a ordenada na origem não correspondia ao esperado, apresentando uma ordem de grandeza inferior ao μs . Tendo em conta a exatidão dos valores obtidos para a velocidade, este desvio apenas pode ser explicado por:

- Descuido na configuração do software. Uma vez que os valores de b são tão reduzidos podemos presumir que o software tivesse já algum valor de *time-delay* inserido.

³O valor de referência utilizado foi retirado de [Too]

- Problema de software. No final das medições, numa tentativa de emendar estes valores, reparámos que por vezes as sondas não eram lidas devidamente, apresentando valores diferentes de frequência.

A média ponderada dos valores das velocidades das duas sondas é

$$v_{acri} = (2731 \pm 3)ms^{-1}$$

Para estudar o fenómeno de atenuação, linearizámos a expressão (3) da seguinte maneira:

$$\ln(A) = -\mu s + \ln(A_0) \quad (6)$$

Convertendo os valores recolhidos de tempo para profundidade obtemos os gráficos das Figs. 10 e 11.

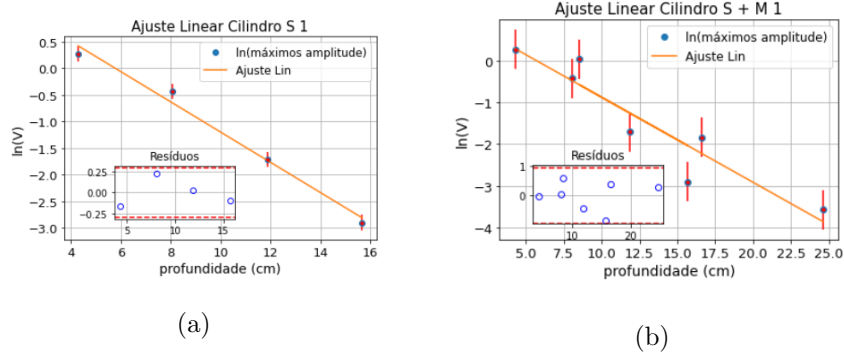


Fig.10: Determinação do coeficiente de atenuação pelas sondas $1MHz$ com o cilindro S (à esquerda) e $1MHz$ com os cilindros S e M (à direita). Os parâmetros de ajuste são: (a) $m = (-0.28 \pm 0.02) \cdot 10^{-4}$, $b = (1.6 \pm 0.3)$, $r^2 = 0.986$ e $u(y) = 0.1$; (b) $m = (-0.20 \pm 0.03)$, $b = (1.2 \pm 0.5)$, $r^2 = 0.881$ e $u(y) = 0.5$

Fazendo a conversão dada pela expressão (4) obtemos os valores para o coeficiente de atenuação:

- Dados de 'S1': $\mu = (2.5 \pm 0.2) \frac{dB}{cm}$
- Dados de 'S + M1': $\mu = (1.78 \pm 0.3) \frac{dB}{cm}$
- Dados de 'S + M2': $\mu = (2 \pm 1) \frac{dB}{cm}$
- Dados de 'S + M L1': $\mu = (1.7 \pm 0.2) \frac{dB}{cm}$

Baseando-nos nos valores de referência para as sondas $1MHz$ e $2MHz$ de [Gam], apenas o valor de μ com a sonda $1MHz$ no cilindro S se aproximou do esperado. Porém, esta discrepância não nos permite atribuir confiança aos valores obtidos.

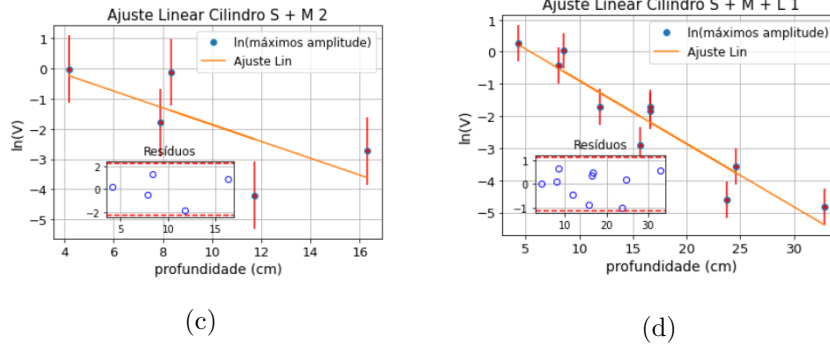


Fig. 11: Determinação do coeficiente de atenuação pelas sondas $2MHz$ com o cilindro S e M (à esquerda) e $1MHz$ com os cilindros S, M e L (à direita). Os parâmetros de ajuste são: (a) $m = -0.2 \pm 0.1$, $b = (1 \pm 1) \cdot 10^{-7}$, $r^2 = 0.510$ e $u(y) = 1.1$; (b) $m = -0.19 \pm 0.02$, $b = (1.1 \pm 0.4) \cdot 10^{-7}$, $r^2 = 0.895$ e $u(y) = 0.6$

3.2 Parte B - Modos de inspeção A-Scan e B-Scan

3.2.1 A-Scan

Em consequência de não termos conseguido determinar o *time-shift* associado a cada uma das sondas, ajustámos esse valor no software manualmente. Tendo em mente os valores obtidos por outros colegas e, usando um dos orifícios do fantoma, medimos a que profundidade se encontrava e colocámos o valor do *time-shift* que retornava essa profundidade acuradamente, esse valor era $t_{2L} = 2.6\mu s$.

Para o estudo deste modo de inspeção, seleccionámos os orifícios 4, 9 e 11. Antes de proceder ao estudo destes, medidos com uma craveira a profundidade a que se encontravam:

Orifício 4	21.80 ± 0.05 mm
Orifício 9	65.45 ± 0.05 mm
Orifício 11	45.00 ± 0.05 mm
Altura do fantoma	80.70 ± 0.05 mm

Tabela 6: Profundidade dos orifícios e altura do fantoma

A análise destes sinais permite inferir a estrutura do fantoma, nomeadamente:

- Em (a), verifica-se um pico inequívoco aos $(21.1 \pm 0.1)mm$, ou seja, um erro relativo de 3.2%
- Em (b), verifica-se a reflexão provocada pelo orifício 9 aos $(62.1 \pm 0.1)mm$ com um erro relativo de 4.0%. Para além disso, tal como podemos observar na Fig. 5, o orifício 11 encontra-se parcialmente sobreposto ao 9,

sendo as dimensões destes inferiores à do 11. Estávamos, portanto, à espera de registar reflexões, não necessariamente perpendiculares ao eixo de propagação da sonda, provenientes do orifício 11, o que foi de facto observado aos $\approx 15/16mm$;

- Em (c), vê-se claramente a reflexão referente ao orifício 11 aos $(14.5 \pm 0.1)mm$;
- Comum aos sinais (a) e (b) é o pico $(79.9 \pm 0.1)mm$ que corresponde à reflexão na base do fantoma, com um erro relativo de 1.1%;
- Quanto mais perto estiver o obstáculo, maior é a intensidade do sinal lido, o que podemos inferir comparando (a) e (c) com (b). Esta observação reforça a existência do fenómeno de atenuação da onda.

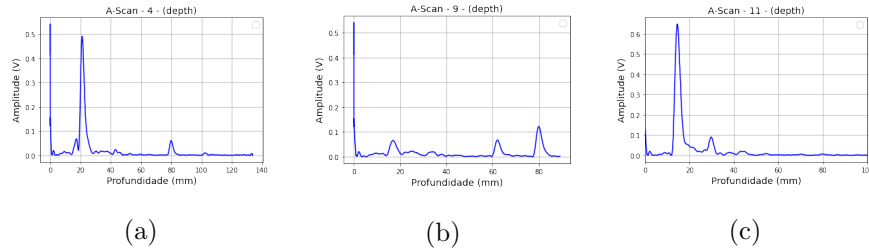


Fig. 12: Dados do A-Scan - Amplitude vs. Profundidade; (a) A-Scan do orifício 4, (b) A-Scan do orifício 9, (c) A-Scan do orifício 11

3.2.2 B-Scan

As imagens obtidas do B-Scan estão apresentadas nas Figs. 13 e 14. A preto e branco temos apenas a identificação do obstáculo no plano transversal estudado, enquanto que as outras duas apresentam um código de cores, onde o vermelho corresponde a um máximo de amplitude e o azul ao mínimo. Em ambas, alterámos o valor do contraste no software até obter a melhor qualidade de imagem possível.

Interpretando os dois conjuntos de imagens podemos inferir e verificar as características associadas aos transdutores e a sua dependência na frequência.

Por um lado, é possível confirmar a relação entre a resolução lateral e o comprimento de onda/frequência de impulso. Claramente, a imagem obtida com a sonda $1MHz$ apresenta uma melhor resolução axial, na medida em que os orifícios apresentam dimensões no eixo 'AXIAL' (ver Fig. 13) mais próximas do real. Por outro lado, para essa mesma sonda, os orifícios mais próximos da base não apresentam uma resolução lateral tão boa quanto a imagem obtida pela sonda $2MHz$.

Para além disto, é fácil ver que a resolução da imagem é inversamente proporcional à profundidade, aliás, depende também da frequência.

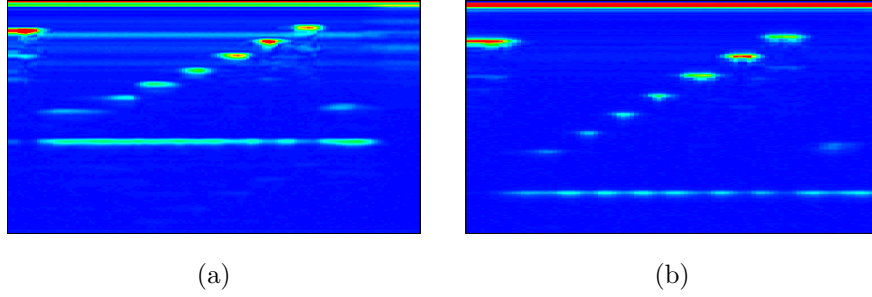


Fig. 13: B-Scan do fantoma de acrílico - RGB; A figura (a) corresponde à sonda $1MHz$ e a (b) corresponde à sonda $2MHz$

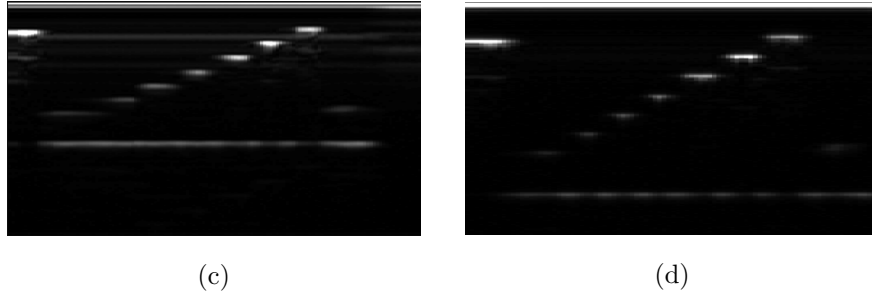


Fig. 14: B-Scan do fantoma de acrílico - BW; A figura (c) corresponde à sonda $1MHz$ e a (d) corresponde à sonda $2MHz$

Numa tentativa de quantificar esta observação, tomámos os valores dos coeficientes de atenuação ($[Gam]$) para cada frequência no acrílico e analisámos, por exemplo, a distância que o impulso tem de percorrer até que a amplitude inicial seja reduzida de um fator de x_0 , isto é, $A = x_0 A_0$, dada por:

$$s = \frac{\ln(x_0)}{\mu} \quad (7)$$

Concluimos que a sonda $1MHz$ terá um maior poder de penetração do que a sonda $2MHz$. No entanto, a dimensão do fantoma é demasiado reduzida para que se observe uma diferença significativa entre as duas sondas, ainda que, percebe-se que o sinal da sonda $1MHz$ é mais intenso, isto é, tem uma maior amplitude, o que se pode relacionar com esta característica.

4 Conclusões

Neste trabalho, foi calculada a velocidade de propagação do som no acrílico $v_{acri} = (2731 \pm 3)ms^{-1}$ com $\%erro = 0.30\%$. Para além disso, foi estudado o impacto da impedância acústica de diferentes materiais na qualidade de recolha

de sinais com ultrassons, concluindo-se que a utilização de água (ou géis) a favorece.

Não foi possível determinar o *time-delay* com o qual as sondas afetam as medições, pudémos apenas estimá-lo, $t_{2L} = 2.6\mu s$

Foi verificado e avaliou-se, qualitativamente, o fenómeno de atenuação na diminuição dos valores de amplitude do sinal com a profundidade e ainda que frequências maiores permitem uma maior resolução lateral, enquanto que frequências menores favorece uma melhor resolução axial.

5 Anexo

References

- [Gam] Gampt. *Dependência do coeficiente de atenuação com a frequência*. URL: <https://www.gampt.de/%20en/product/phy03-acoustic-attenuation-in-solids/>. (acedido a 13.11.2021).
- [Lab] Docentes de Laboratórios de Física 3. “Protocolo - Caracterização de materiais através de ultrassons”. In: ().
- [Med] Medimaging. *Full with half maximum and resolution*. URL: <http://www.medimaging.gr/cd/pages/par2.%20htm>. (acedido a 14.11.2021).
- [PHY] TESS PHYWE. “Student’s sheet - Velocity of ultrasound in solid state materials”. In: ().
- [Too] Engineering Toolbox. *Parâmetros dos meios ar, água e acrílico*. URL: <https://www.engineeringtoolbox.com/>. (acedido a 13.11.2021).

5.1 Incertezas e Fórmulas

- Incerteza da velocidade de propagação do acrílico (Tabelas 4 e 5):

$$u(v) = \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 u^2(L) + \left(-\frac{L}{\Delta t^2}\right)^2 u^2(\Delta t)}$$

- Média ponderada:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

- w_i :

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$$