

T7 - Caracterização de materiais através de ultrassons

Laboratórios de Física 3

Daniela Oliveira Santos

Novembro 2021

Abstract

Nesta atividade experimental foi estudada a emissão/recepção de sinais ultrassônicos. Com estes foi possível caracterizar um 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 bem como os coeficientes de atenuação, porém foi apenas possível estimar o primeiro desses valores ($t_{2L} = 2.6\mu s$).

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

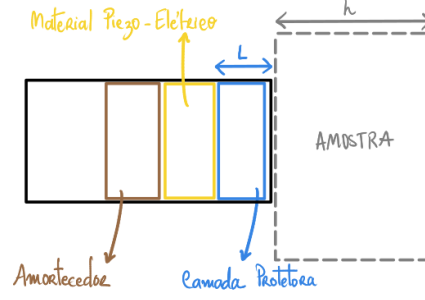


Figure 1: Esquema simplificado de um transdutor piezo-elétrico

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

Outro fenómeno relevante é a atenuação da amplitude da onda devido a fenómenos 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 ultrassónica - frequências maiores apresentam maior coeficiente de atenuação [1].

É usual exprimir o coeficiente de atenuação em unidades de $dB.cm^{-1}$ (μ'). 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 deteção de ultrassons são feitas recorrendo a um transdutor piezo-elétrico, como aquele apresentado na Figure 1, cuja utilidade se baseia na capacidade de transformar um sinal mecânico num sinal elétrico.

Ao aplicar uma tensão elétrica ao material cerâmico piezo-elétrico, são geradas ondas mecânicas a uma frequência ultrassónica 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 Resoluções 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.

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 Figure 2 à direita. Porém, esse mesmo aumento

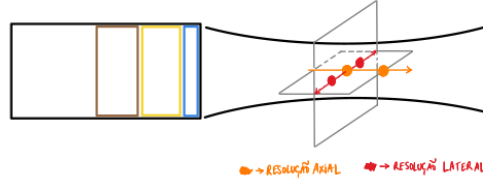


Figure 2: Resoluções axial e lateral

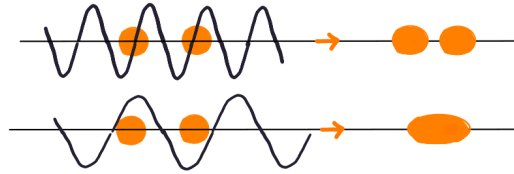


Figure 3: Efeito da frequência na resolução lateral

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

$$\Delta t = t_{2h} + t_{2l}$$

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

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 Figure 4).

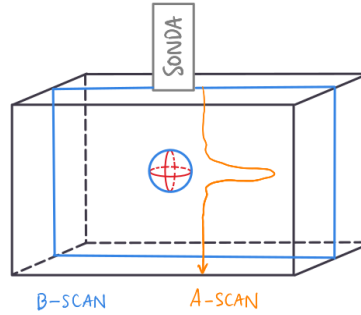


Figure 4: Representação dos modos de inspeção A-Scan e B-Scan

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

Em todo o decorrer da atividade foi utilizado um controlador e software PHYWE e duas sondas ultrassónicas 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 (no modo *FULL* - $200\mu\text{s}$)
2. Medições com os três cilindros para a sonda 2 (no modo *HALF-FULL* - $100\mu\text{s}$)

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.

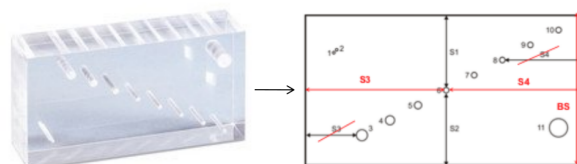


Figure 5: Fantoma de acrílico

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 (figura 3).

Nas duas situações foram sempre colocadas gotas 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 ¹ com impedâncias acústicas iguais a:

$$Z_{ar} = 410.0 \frac{kg}{m^2s}$$

$$Z_{agua} = 1.478 \times 10^6 \frac{kg}{m^2s}$$

$$Z_{acri} = 3.26 \times 10^6 \frac{kg}{m^2s}$$

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 cai 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.

3 Análise e discussão dos resultados

3.1 Parte A - Caracterização do acrílico

Os três cilindros que utilizámos tinham as seguintes dimensões:

Cilindro S	19.00 ± 0.05
Cilindro M	40.00 ± 0.05
Cilindro L	80.45 ± 0.05

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

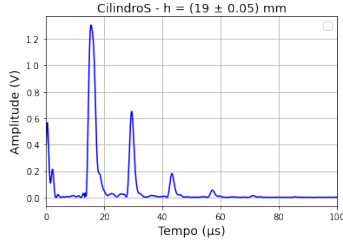
Os dados recolhidos com as sondas estão representados no gráficos abaixo, mantendo a correspondência de cores, os dados azuis são relativos à sonda $1MHz$ enquanto que os vermelhos à sonda $2MHz$.

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

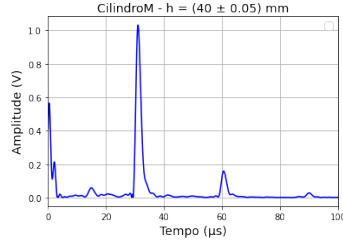
Um aspeto comum a todos os gráficos apresentados acima e que corrobora a explicação dada na secção (1.1) são os picos iniciais entre os $0\mu s$ e os $10\mu s$. Este sinal corresponde a reflexões na interface camada protetora-água, que, considerando a primeira como tendo uma impedância semelhante à do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

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

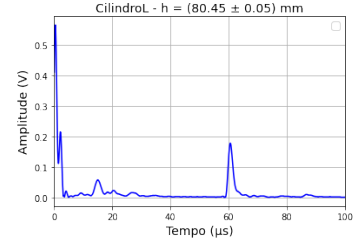
¹Valores utilizados neste cálculo encontram-se em anexo.



(a) Medida com o cilindro S

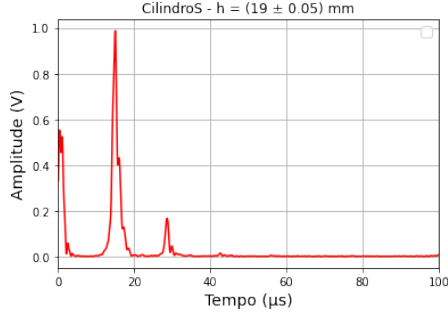


(b) Medida com o cilindro M

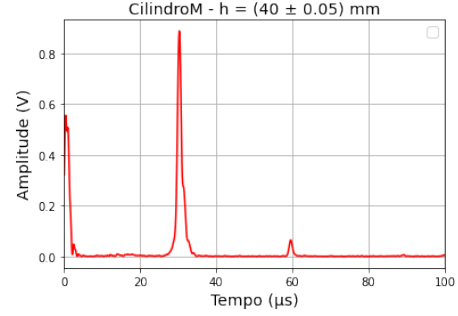


(c) Medida com o cilindro L

Figure 6: Sonda 1MHz

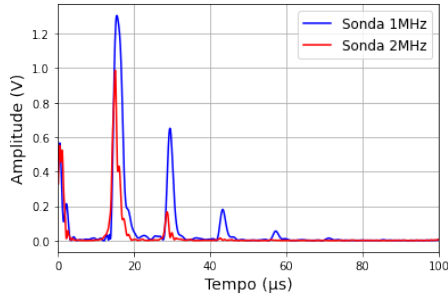


(a) Medida com o cilindro S

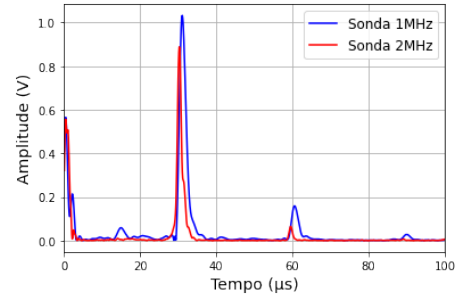


(b) Medida com o cilindro M

Figure 7: Sonda 2MHz



(a) Medida com o cilindro S



(b) Medida com o cilindro M

Figure 8: Sondas 1MHz e 2MHz

- O número de picos 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 menor implique maior número de reflexões, conforme observado.
- A diminuição dos picos de amplitude valida a atenuação do sinal por processos de absorção e reflexão.
- Os gráficos da Figure 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* (Table 2 & 3) que servem de medida da resolução espacial das sondas [3], 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

Table 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

Table 3: Valores de *Full Width Half Maximum* do cilindro M

Para determinar o time-delay introduzido 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 obtém os valores mais precisos.

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 eram suficientes para uma boa estatística, decidimos juntar todos os valores retirados com a mesma sonda.

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 valores:

Cilindro S		Cilindro M	
Δt (μs)	v_{acri} (ms^{-1}) ± 6	Δt (μs)	v_{acri} (ms^{-1}) ± 4
13.9	2733	29.4	2721
13.8	2733	29.5	2712
13.8	2733	X	X

Table 4: Dados da sonda 1MHz

Cilindro S		Cilindro M	
Δt (μs)	v_{acri} (ms^{-1}) ± 11	Δt (μs)	v_{acri} (ms^{-1}) ± 5
13.5	2794	29.2	2716

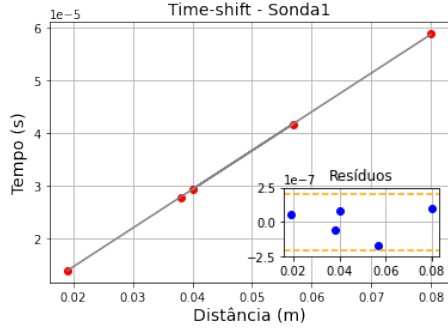
Table 5: Dados da sonda 2MHz

Não foi possível obter mais do que um pico para o cilindro L e portanto não podíamos concluir nada. Ainda assim, com estes valores, construímos os seguintes gráficos:

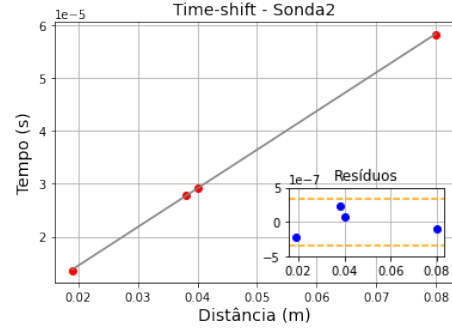
Do declive conseguimos extrair a velocidade de propagação do sinal no acrílico²:

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

²O valor de referência utilizado foi retirado de [2]



(a) Determinação do time-shift introduzido pela sonda 1MHz com parâmetros de ajuste $m = (7.37 \pm 0.03) \cdot 10^{-4}$, $b = (-2 \pm 1) \cdot 10^{-7}$ e $r^2 = 0.99995$



(b) Determinação do time-shift introduzido pela sonda 2MHz com parâmetros de ajuste $m = (7.29 \pm 0.05) \cdot 10^{-4}$, $b = (-6 \pm 3) \cdot 10^{-8}$ e $r^2 = 0.9998$

- 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.
- Problema do software. No final das medições, numa tentativa de emendar estes valores reparámos que por vezes as sondas eram lidas como tendo 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:

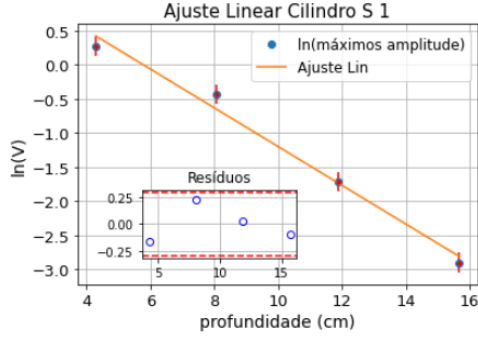
$$\ln(A) = -\mu s + \ln(A_0) \quad (6)$$

Convertendo os valores recolhidos de tempo para profundidade obtemos os seguintes gráficos:

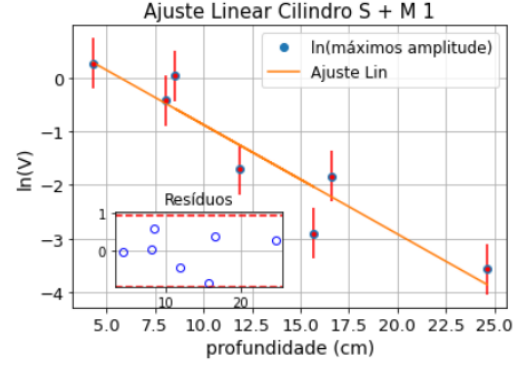
Fazendo a conversão dada pela expressão (4) obtemos valores para o coeficiente de atenuação:

- Dados de 'S1': $\mu = (2.5 \pm 0.2) \frac{dB}{cm}$
- Dados de 'S + M1': $\mu = (1.8 \pm 0.3) \frac{dB}{cm}$
- Dados de 'S + M2': $\mu = (2 \pm 0.1) \frac{dB}{cm}$
- Dados de 'S + M + L1': $\mu = (1.7 \pm 0.2) \frac{dB}{cm}$

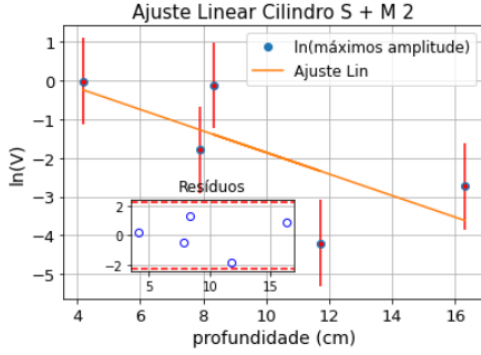
Baseado-nos nos valores de referência para a sonda de 1MHz e 2MHz de [1], apenas o valor de μ com a sonda 1MHz no cilindro S se aproximou do esperado. Porém, esta discrepância não nos permite atribuir confiança aos valores obtidos.



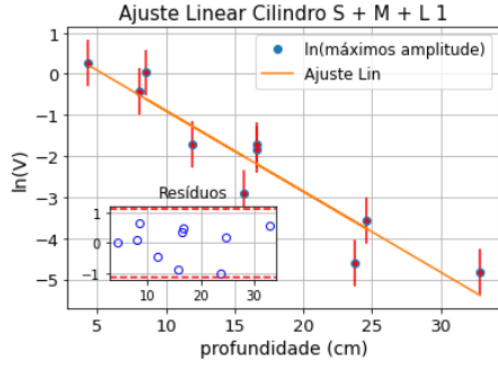
(a) Determinação do coeficiente de atenuação cilindro S sonda 1MHz; Parâmetros de ajuste $m = (-0.28 \pm 0.02)$, $b = (1.6 \pm 0.3)$, $r^2 = 0.986$ e $u(y) = 0.1$



(b) Determinação do coeficiente de atenuação cilindros S e M sonda 1MHz; Parâmetros de ajuste $m = (-0.20 \pm 0.03)$, $b = (1.2 \pm 0.5)$, $r^2 = 0.881$ e $u(y) = 0.5$



(a) Determinação do coeficiente de atenuação cilindros S e M sonda 2MHz; Parâmetros de ajuste $m = (-0.2 \pm 0.1)$, $b = (1 \pm 1) \cdot 10^{-7}$, $r^2 = 0.510$ e $u(y) = 1.1$



(b) Determinação do coeficiente de atenuação cilindro S, M e L sonda 1MHz; Parâmetros de ajuste $m = (-0.19 \pm 0.02)$, $b = (1.1 \pm 0.4) \cdot 10^{-7}$, $r^2 = 0.895$ e $u(y) = 0.6$

Figure 11: Linearização da amplitude em função da profundidade

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 buracos do fantoma, medimos a que profundidade se encontrava e colocámos o valor do time-shift que retornava esse profundidade acuradamente, esse valor era $t_{2L} = 2.6\mu s$.

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

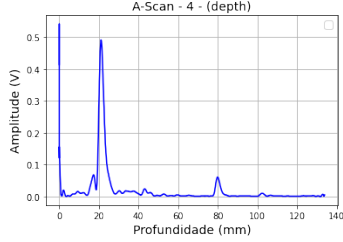
Colocando a sonda de 2MHz na base do fantoma mais próxima do buraco 11(ver Figure 4) recolhemos do software os dados que permitiram construir os seguintes gráficos:

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

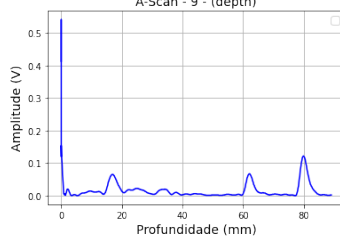
- Em (a), verifica-se um pico inequívoco aos $(21.1 \pm 0.1)mm$, ou seja, um erro relativo de 3.2%;

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

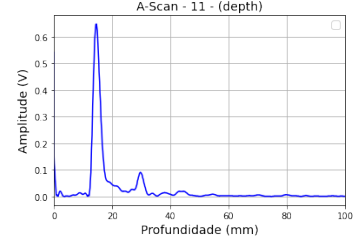
Table 6: Profundidade dos buracos e altura do fantoma medidas em mm



(a) A-Scan do defeito 4 - Amplitude vs. Profundidade



(b) A-Scan do defeito 9 - Amplitude vs. Profundidade



(c) A-Scan do defeito 11 - Amplitude vs. Profundidade

Figure 12: Dados do A-Scan

- Em (b), verifica-se a reflexão provocada pelo buraco 9 aos $(62.0 \pm 0.1)mm$ com um erro relativo de 4.0%. Para além disso, tal como podemos observar na Figure 4, o buraco 11 encontra-se parcialmente sobreposto ao 9, sendo as dimensões deste inferiores à do 11. Estávamos, portanto, à espera de registar reflexões, não necessariamente perpendiculares ao eixo de propagação da sonda, provenientes do buraco 11, o que foi de facto observado aos $\approx 15, 16mm$;
- Em (c), vê-se claramente a reflexão referente ao buraco 11 ao $(14.5 \pm 0.1)mm$;
- Comum aos sinais (a) e (b) é o pico aos $(79.9 \pm 0.1)mm$ 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.

3.2.2 B-Scan

As imagens obtidas do B-Scan estão apresentadas na Figures 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 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 do impulso. Claramente, a imagem obtida com a sonda $1MHz$ apresenta uma melhor resolução axial, na medida em que os buracos apresentam dimensões no eixo 'AXIAL' (ver Figure 13) mais próximas do real. Por outro lado, para essa mesma sonda, os buracos mais próximos da base não apresentam uma resolução lateral tão boa quanto a imagem da sonda $2MHz$.

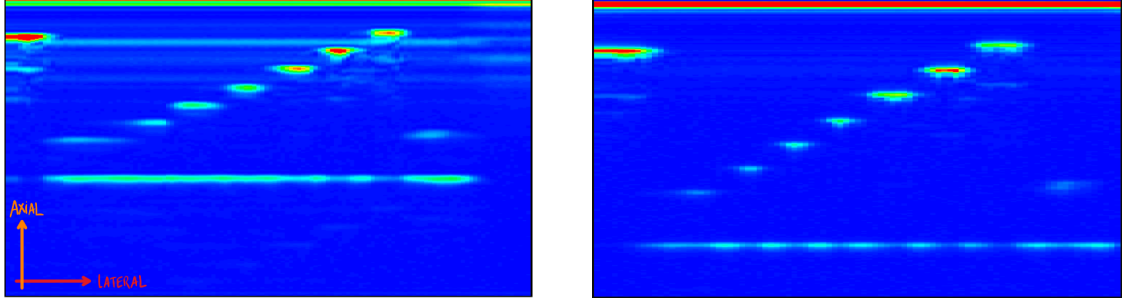


Figure 13: B-Scan do fantoma deacrílico - RGB; A figura da esquerda corresponde à sonda $1MHz$ e a da direita à sonda $2MHz$

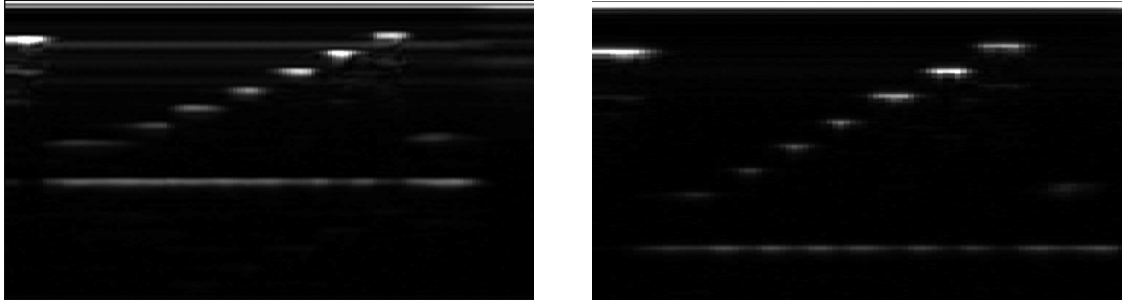


Figure 14: B-Scan do fantoma deacrílico - BW; A figura da esquerda corresponde à sonda $1MHz$ e a da direita à sonda $2MHz$

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

Numa tentativa de quantificar esta observação, tomámos os valores dos coeficientes de atenuação ([1]) 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 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 deve ser demasiado reduzida para se observar uma diferença significativa, ainda que, percebe-se que o sinal da sonda $1MHz$ é mais intenso, ie, maior amplitude, o que se pode relacionar com esta característica.

4 Conclusões

- Foi calculada a velocidade de propagação do som no acrílico $v_{acri} = (2731 \pm 3)ms^{-1}$ com %erro= 0.30%.
- 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, apenas pudémos estimá-lo $t_{2L} = 2.6\mu s$.

- Observou-se o fenómeno de atenuação na diminuição dos valores da amplitude do sinal com a profundidade.
- Verificou-se que frequências maiores permitem uma maior resolução lateral, enquanto que frequências menores favorece uma melhor resolução axial.

References

- [1] 1. *Dependência do coeficiente de atenuação com a frequência*. URL: <https://www.gampt.de/en/product/phy03-acoustic-attenuation-in-solids/>. (acedido a 13.11.2021).
- [2] 2. *Parâmetros dos meios ar, água e acrílico*. URL: <https://www.engineeringtoolbox.com/>. (acedido a 13.11.2021).
- [3] 3. *Full with half maximum and resolution*. URL: <http://www.medimaging.gr/cd/pages/par2.htm>. (acedido a 14.11.2021).

5 Anexo

5.1 Valores para o cálculo das impedâncias, refletância e transmitância

A impedância acústica foi calculada utilizando a equação (2) [2].

- **Ar:** $v_{ar} = 346.3ms^{-1}$; $\rho_{ar} = 1.184kgm^{-3}$
- **agua:** $v_{agua} = 1481ms^{-1}$; $\rho_{agua} = 998.21kgm^{-3}$
- **Acrílico:** $v_{acri} = 2750ms^{-1}$; $\rho_{acri} = 1.19gm^{-3}$