

Caracterização de materiais através de ultrassons

Marta Silva

Departamento de Física e Astronomia
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

11 de Novembro de 2021*

Resumo

Neste trabalho foi estudada a caracterização de materiais a partir de ultra-sons. Começou-se por estudar três cilindros de acrílico de alturas distintas e, utilizando dois transdutores de frequências 1 MHz e 2 MHz mediu-se o tempo entre o impulso gerado pela sonda e a onda refletida. Através de um ajuste linear, obteve-se para a sonda de 1 MHz, que $v_{som} = (2,71 \pm 0,02) \times 10^3 m/s$ e que para a sonda de 2 MHz, $v_{som} = (2,75 \pm 0,01) \times 10^3 m/s$. Para o transdutor de menor frequência obteve-se também que $t_{2L} = (1,2 \pm 0,4) \mu s$ e para o de maior frequência $t_{2L} = (1,4 \pm 0,1) \mu s$. Foi, também, estudada a atenuação dos ultrassons para as duas frequências referidas e obteve-se $k = (2,92 \pm 0,05) dBcm^{-1}$ para 1 MHz e $k = (4,1 \pm 0,5) dBcm^{-1}$ para 2 MHz. Por último, utilizou-se um fantoma de acrílico de forma a estudar o poder de resolução dos dois transdutores, tendo-se concluído que a sonda de 2 MHz tem um melhor poder de resolução enquanto que a sonda de 1 MHz tem um melhor poder de penetração.

1 Introdução

Os ultrassons são ondas mecânicas de alta frequência comumente usadas em diversas áreas distintas. Aparelhos ultrassónicos são usados essencialmente para detetar objetos e medir distâncias.

A sua utilização é imprescindível na medicina, em técnicas de ecografia, mas também na indústria para limpar, misturar e acelerar processos químicos ou mesmo detetar falhas em produtos.

1.1 Determinação da velocidade ultrassónica

Um transdutor piezo-elétrico gera impulsos periodicamente e, após cada impulso, passa a modo de escuta, convertendo ondas de pressão recebidas em sinais de tensão elétrica.

*Experiência realizada no dia 29 de Outubro com a colega Inês Nogueira.

O tempo de voo, t , entre o início do impulso no transmissor e a detecção do respectivo eco, relaciona-se com a velocidade do som, c , e com a distância entre o transdutor e a face-fronteira refletora, s , pela equação:

$$c = \frac{2s}{t} \quad (1)$$

No entanto, os transdutores são geralmente constituídos por uma camada protetora na superfície ativa, pelo que temos que ter em conta o tempo que a onda acústica demora a percorrê-la (t_{2L}). Logo, o tempo de voo é dado por:

$$t = t_{2L} + \frac{2s}{c} \quad (2)$$

De modo a evitar a interferência deste termo no nosso resultado e de forma a minimizar os erros resultantes da reflexão na interface de entrada no material, onde o sinal é mais forte, podemos utilizar duas medidas t_1 e t_2 correspondentes a comprimentos s_1 e s_2 :

$$c = \frac{2(s_2 - s_1)}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

1.2 Interação das ondas acústicas com o meio

Uma onda sonora a propagar-se num meio perde energia, uma vez que sofre reflexões, processos de absorção e espalhamento. Deste modo, a amplitude da onda de pressão vai sendo atenuada de acordo com a seguinte lei:

$$A = A_0 e^{-\mu s} \quad (4)$$

onde s é o caminho no meio e μ é a constante de atenuação, característica do meio, que apresenta dependência com a frequência ultrassónica ($\mu \propto f^n$).

Esta relação também pode ser escrita em termos de energia:

$$I = I_0 e^{-ks} \quad (5)$$

onde I_0 é a intensidade de excitação e $k = 2\mu$ é o coeficiente de extinção.

1.3 Poder de Resolução

O poder de resolução é a distância mínima entre dois pontos cujos ecos possam ser distinguidos. A resolução espacial resulta da geometria da sonda, do seu raio e do comprimento de onda, λ . Com efeito, a extensão do impulso ultrassónico e o comprimento de onda limitam a resolução axial, enquanto que a resolução transversal é limitada pela geometria acústica do transdutor ultrassónico.

1.4 Modos de inspeção ultrassónica

A título de exemplo de modos de inspeção ultrassónica temos os modos *A-scan* e *B-scan*:

A-scan: representa o vetor de valores de intensidade do eco ultrassónico em função da profundidade e pode ser identificado como um varrimento axial.

B-scan: fornece uma imagem representativa de um corte seccional da amostra em teste e é formado pela agregação sequencial de um conjunto de *A-scans* recolhidos sequencialmente no espaço.

1.5 Objetivos

Este trabalho teve como principais objetivos:

- Familiarizarmo-nos com a utilização de ultrassons na caracterização de materiais;
- Através de duas sondas diferentes estudarmos a influência da frequência do sinal na:
 - Determinação da velocidade do som no acrílico;
 - Determinação da constante de atenuação do acrílico;
 - Determinação do poder de resolução;
- Recolher e interpretar *A-Scans* e *B-scans*.

Esta experiência foi realizada no âmbito da disciplina de laboratórios de Física III, lecionada no laboratório 0.17 no Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, com o auxílio do professor José Luís Santos.

2 Materiais e métodos experimentais

2.1 Elementos da experiência

Neste trabalho utilizou-se um Ecoscópio ultrassónico (PHYWE [2]) dotado de dois transdutores que operam às frequências de 1 MHz e 2 MHz e, de um controlador que configura a instrumentação e executa a aquisição de sinal. Este estava conectado a um computador com o software *UltraEcho* que permite o ajuste de determinados parâmetros e a visualização dos sinais resultantes.

Foram estudadas três amostras cilíndricas de acrílico de 4 cm de diâmetro, com comprimentos de, aproximadamente, 2, 4 e 8 cm e um fantoma de acrílico, esquematizado na Figura 2.

Na operação é essencial a conexão dos transdutores no modo deteção em reflexão, que é responsável pela emissão e deteção das ondas ultrassónicas nas amostras em estudo.

Apesar de não estarem representados na Figura 1, também foi utilizada uma craveira para medir o comprimento dos cilindros e um conta gotas com água, para facilitar o acoplamento do transdutor à amostra em estudo.

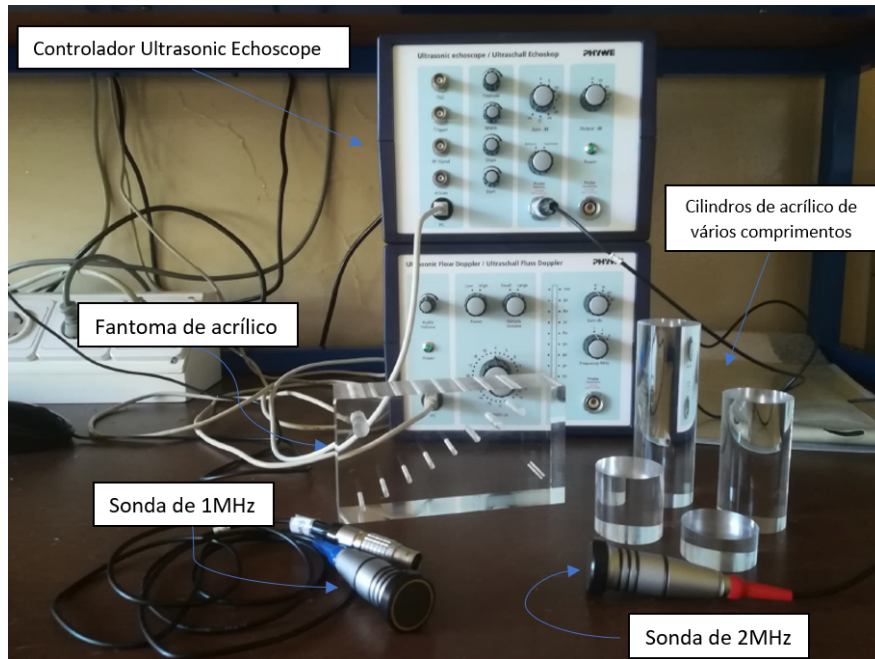


Figura 1: Material utilizado na experiência.

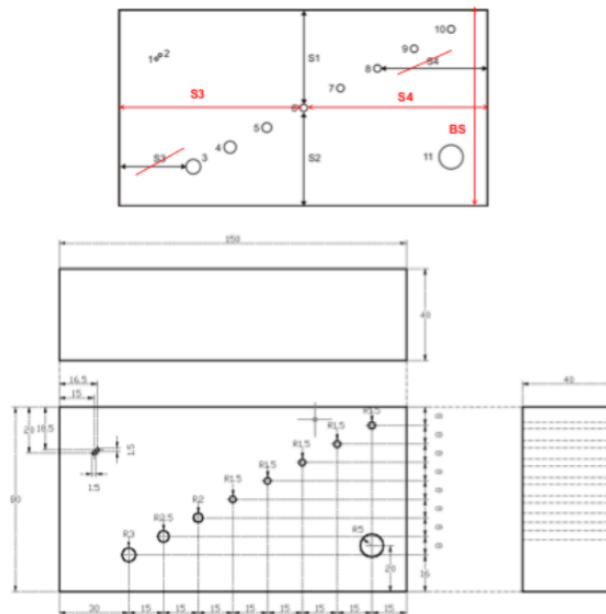


Figura 2: Esquema do fantoma de acrílico. [1]

2.2 Procedimento experimental

2.2.1 Propriedades acústicas do acrílico a partir de sinais *A-scan*

Começou-se por medir o comprimento dos cilindros com uma craveira, tendo-se efetuado três medições para cada cilindro. De seguida, ligou-se a sonda de 1 MHz ao *Echoscope* na entrada

Probe(Reflection) e assegurou-se que o software estava a atuar no modo *A-scan*. Através do conta gotas, acoplou-se o transdutor ultrassónico ao cilindro mais pequeno com uma gota de água. Posteriormente, variou-se a potência dos impulsos e a amplificação de forma a ajustar o sinal observado, maximizado a altura e o número de picos visíveis. Finalmente, mediu-se os tempos de voo através do posicionamento dos cursores nos picos de cada onda e guardou-se os dados num documento de texto para análise posterior. Este procedimento foi repetido para a sonda de 2 MHz e para os dois cilindros restantes.

2.2.2 Avaliação do desempenho dos transdutores a partir de *A-scans*

Através das equações 2 e 3, estimou-se o tempo de atraso e a velocidade de propagação do som no acrílico, respetivamente. Estes valores foram introduzidos no software e alterou-se o modo de medição de tempo (*Time*) para profundidade (*Depth*).

Para os orifícios 3,4,6 e 10, mediu-se, com a régua, a distância ao topo e ao fundo do orifício, bem como a distância destes ao fundo do paralelepípedo. De seguida, posicionou-se a sonda de 2 MHz em cima de cada um dos 4 orifícios e guardou-se os dados num documento de texto, de forma a comparar, posteriormente, as distâncias.

Repetiu-se este processo para a sonda de 1 MHz.

2.2.3 Avaliação do desempenho dos transdutores a partir de *B-scans*

No software *MeasureUltraEcho* selecionou-se o modo de aquisição *B-scan* e colocou-se algumas gotas de água no fantoma de modo a acoplá-lo com a sonda de 1 MHz. De seguida, iniciou-se a aquisição de dados e moveu-se a sonda ao longo do fantoma de forma estável e controlada até atingir o extremo da amostra, onde a aquisição foi interrompida. Este processo foi repetido para a sonda de 2 MHz.

3 Resultados experimentais e Análise ¹

Os comprimentos obtidos para cada cilindro encontram-se na Tabela 1. Os valores considerados na análise correspondem às médias das 3 medições com o auxílio da craveira.

	\bar{s} (mm)	$u(\bar{s})/\text{mm}$
Cilindro 1	18,80	0,06
Cilindro 2	40,02	0,03
Cilindro 3	80,45	0,06

Tabela 1: Comprimento dos cilindros.

¹As fórmulas para o cálculo de incertezas encontram-se em anexo. Os dados analisados neste trabalho possuem um número muito elevado de pontos pelo que não podem ser representados em anexo.

3.1 Propriedades acústicas do acrílico a partir de sinais *A-scan*

Os *A-scans* recolhidos com as sonda de 1 MHz e 2 MHz para cada um dos cilindros, encontram-se representados na Figura 3. É de notar que em todos os gráficos, o primeiro pico corresponde à reflexão inicial na superfície do acrílico pelo que não será contabilizado na análise.

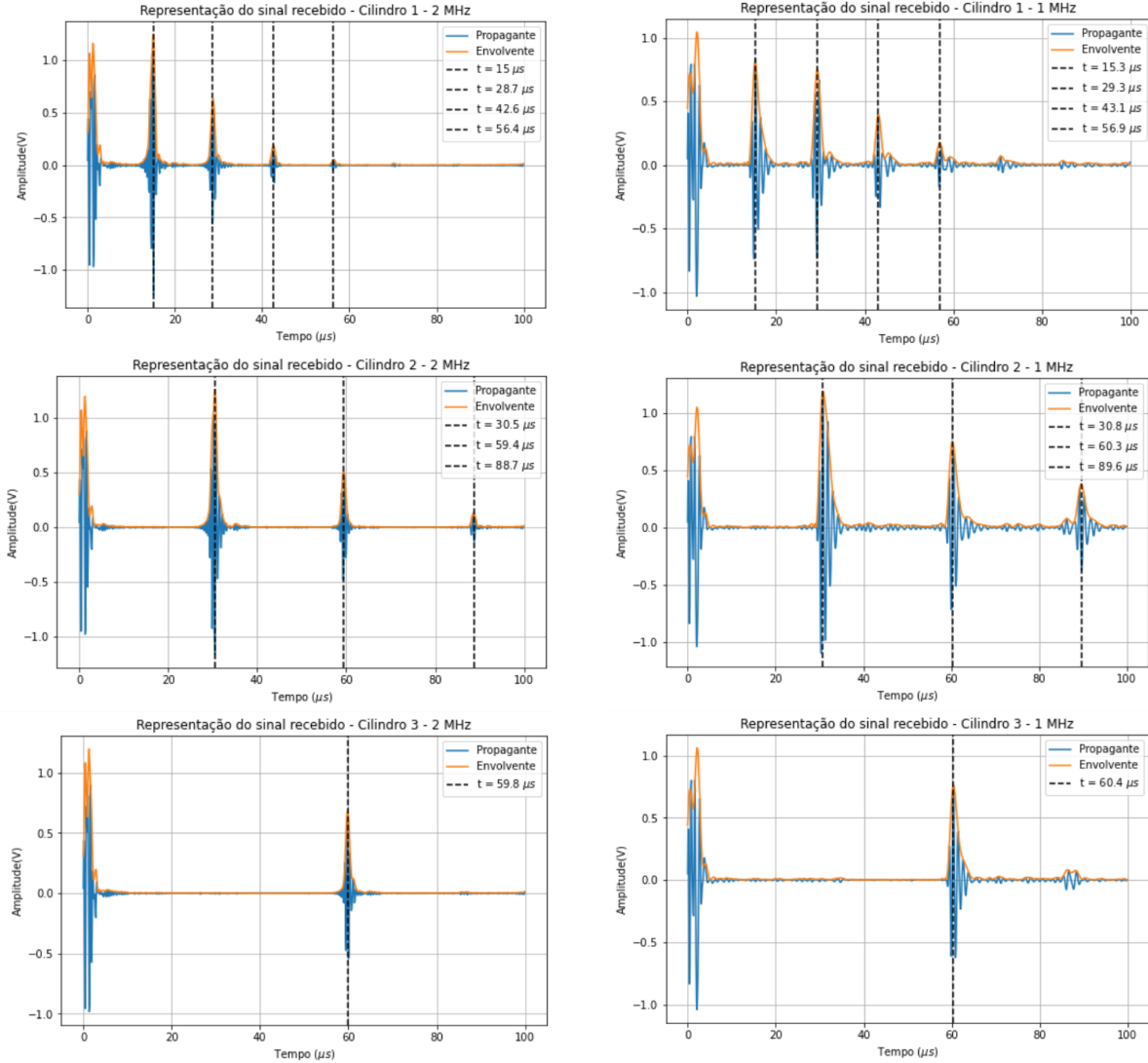


Figura 3: Gráficos representativos do sinal visualizado para cada cilindro em ambas as frequências. As linhas verticais correspondem aos valores dos picos medidos com os cursores.

Através da análise destes gráficos, verificou-se que quanto maior o comprimento do cilindro, menor era o número de picos visíveis e menor a sua intensidade. De facto, foi preciso aumentar o ganho no estudo dos cilindros 2 e 3 de forma a obter uma melhor visualização dos picos. Estes resultados vão de encontro ao esperado, uma vez que quanto maior a altura do cilindro

maior é o tempo de voo e, conseqüentemente, maior é a dissipação de energia no meio material.

Observou-se, também, ligeiras diferenças temporais entre os transdutores, na detecção dos impulsos refletidos no cilindro que podem estar associadas à resolução de cada uma das sondas, mas também aos diferentes tempos de voo na camada protetora. Estas diferenças encontram-se representadas na Tabela 2.

Sonda de 1MHz				Sonda de 2MHz			
	$t_{(médio)} / \mu s$	$u(t_{(médio)}) / \mu s$	$u(t_{(médio)}) \%$		$t_{(médio)} / \mu s$	$u(t_{(médio)}) / \mu s$	$u(t_{(médio)}) \%$
Cilindro 1	14,2	0,4	3	Cilindro 1	14,1	0,3	2
Cilindro 2	29,9	0,5	2	Cilindro 2	29,6	0,5	2
Cilindro 3	60,4	0,3	0,5	Cilindro 3	59,8	0,3	0,5

Tabela 2: Tempos de voos nos vários cilindros para ambas as sondas.

De modo a determinar a largura a meia altura, ampliou-se cada um dos gráficos na zona referente à primeira reflexão, visto que esta está associada a uma menor atenuação, como consequência da menor distância percorrida. Os gráficos obtidos estão representados na Figura 3.

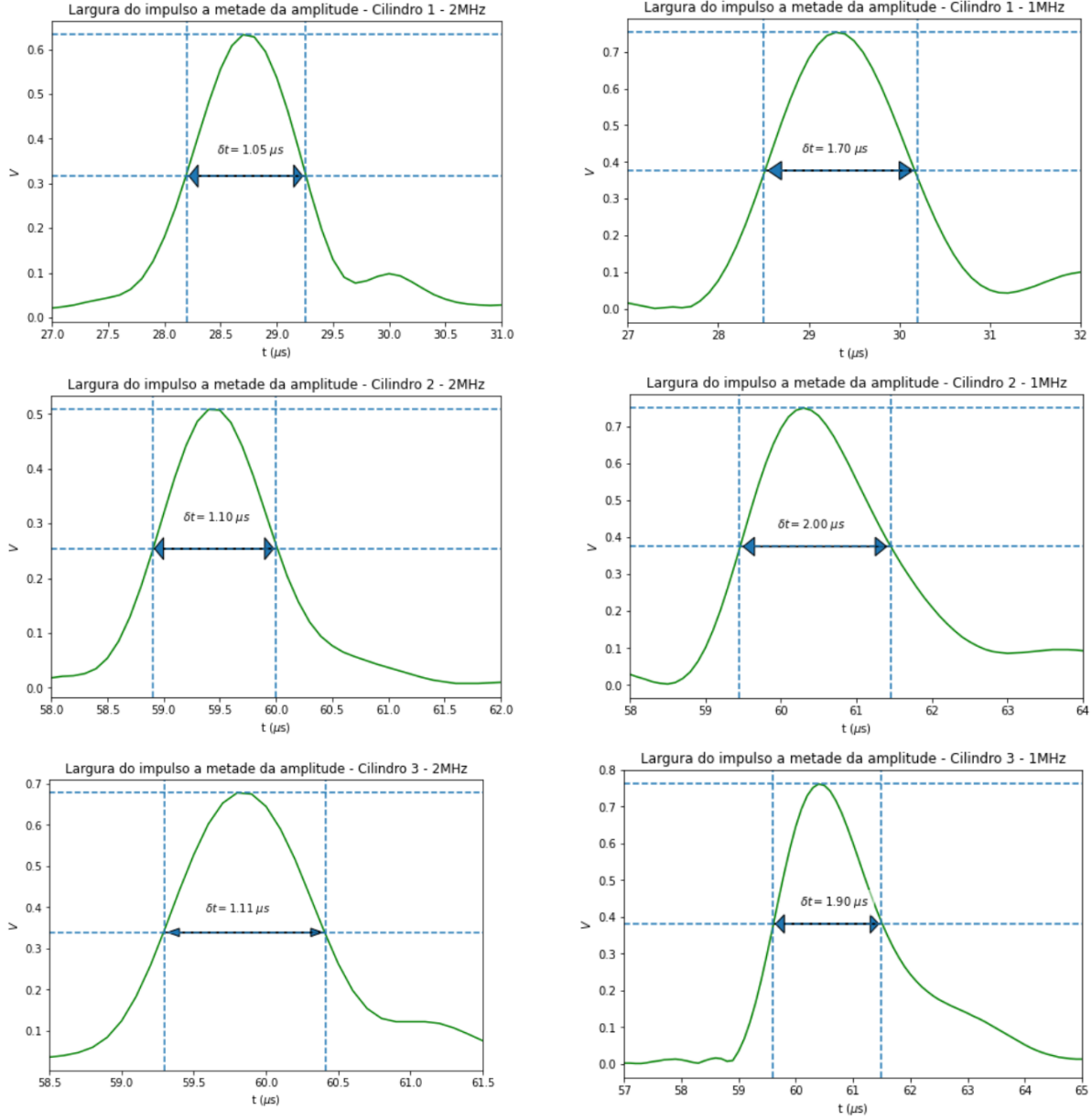


Figura 4: Gráficos representativos da largura a meia altura de um pico para cada cilindro em ambas as frequências.

Verificou-se que para o transdutor de 1MHz a largura do impulso médio foi

$$\bar{\delta t} = (1,87 \pm 0,09)\mu s$$

enquanto que para o de 2 MHz obteve-se:

$$\bar{\delta t} = (1,09 \pm 0,02)\mu s$$

Quanto maior a largura do impulso, maior é a incerteza associada à detecção do pico. Logo, como o transdutor de 2 MHz possui um δt menor, melhor é a sua resolução.

3.1.1 Determinação da velocidade do som

Nesta parte, considerou-se $0,3\mu s$ para a incerteza no tempo de voo, pois embora a menor divisão medida pelo software fosse $0,1\mu s$, um ligeiro movimento nos cursores resultava numa mudança significativa no tempo.

Os valores obtidos para a velocidade do som, calculados através da Eq. 3, encontram-se representados na Tabela 3.

Sonda de 1MHz				Sonda de 2MHz			
	c / ms^{-1}	$u(c) / ms^{-1}$	$u(c) \%$		c / ms^{-1}	$u(c) / ms^{-1}$	$u(c) \%$
Cilindros 1,2	2,74E+03	7E+01	3	Cilindros 1,2	2,75E+03	7E+01	3
Cilindros 2,3	2,73E+03	4E+01	1	Cilindros 2,3	2,76E+03	4E+01	1
Cilindros 3,1	2,73E+03	3E+01	0,9	Cilindros 3,1	2,75E+03	3E+01	0,9
c_{medio} / ms^{-1}	2,73E+03	2	0,06	c_{medio} / ms^{-1}	2,76E+03	2	0,08
Er(%)	0,7			Er(%)	1		

Tabela 3: Valores da velocidade do som calculados através da Eq. 3.

Através da Eq. 2 e a partir dos valores de c_{medio} , calculamos o *Time-Shift* (t_{2L}). Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.

Sonda de 1MHz				Sonda de 2MHz			
	$t_{2L} / \mu s$	$u(t_{2L}) / \mu s$	$u(t_{2L}) \%$		$t_{2L} / \mu s$	$u(t_{2L}) / \mu s$	$u(t_{2L}) \%$
Cilindro 1	1,8	0,2	9	Cilindro 1	1,6	0,2	14
Cilindro 2	1,7	0,2	10	Cilindro 2	1,4	0,1	10
Cilindro 3	1,6	0,3	19	Cilindro 3	1,4	0,1	7
$t_{2L(medio)} / \mu s$	1,68	0,06	4	$t_{2L(medio)} / \mu s$	1,47	0,05	3

Tabela 4: Valor médio dos tempos de atraso calculados através da Eq. 2.

Por último, determinou-se os valores de c e de t_{2L} através de um ajuste linear ao gráfico de $t(s)$ feito com o auxílio do *Jupyter Notebook*. Comparando com a Eq. 2, percebe-se que o declive é dado por $\frac{2}{c}$ e a ordenada na origem corresponde a t_{2L} . Os gráficos obtidos encontram-se na Figura 5.

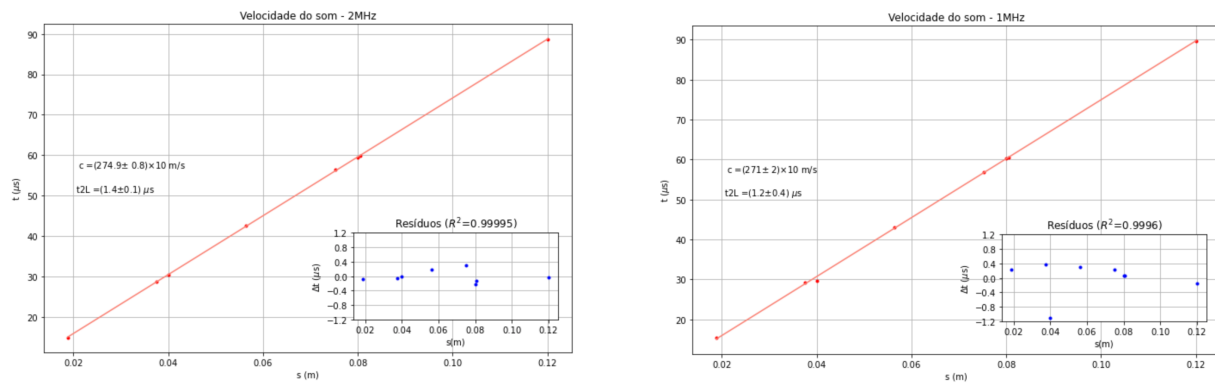


Figura 5: Gráficos de $t(s)$ com as respectivas retas de ajuste e gráficos de resíduos.

Os resultados retirados a partir destes gráficos encontram-se nas Tabelas 5 e 6:

	c / ms^{-1}	$u(c) / \text{ms}^{-1}$	$u(c) \%$	Dif. Relativa	Er(%)
Sonda 1MHz	2,71E+03	2E+01	0,7	0,9	0,2
Sonda 2MHz	2,75E+03	1E+01	0,4	0,2	1

Tabela 5: Dados retirado do ajuste para a velocidade.

	$t_{2k} / \mu\text{s}$	$u(t_{2k}) / \mu\text{s}$	$u(t_{2k}) \%$	Dif. Relativa
Sonda 1MHz	1,2	0,4	33	40
Sonda 2MHz	1,4	0,1	7	5

Tabela 6: Dados retirados do ajuste para o tempo de atraso.

É de notar que, para ambas as sondas, o ajuste é coincidente com os dados experimentais e que o valor de R^2 é muito próximo de um, o que nos indica que s e t são grandezas diretamente proporcionais. Para além disso, os resíduos apresentam uma distribuição aleatória pelo que podemos afirmar que o ajuste foi bem feito.

No gráfico de resíduos relativo à sonda de 1 MHz é visível um ponto discrepante dos restantes. No entanto, como a diferença não é significativa ($\approx 0,1\%$), o ponto foi considerado na análise.

3.1.2 Determinação do coeficiente de atenuação.

De forma a determinar o coeficiente de atenuação da onda acústica no acrílico, efetuou-se uma linearização da Eq. 4, tendo-se obtido:

$$\ln\left(\frac{A}{A_0}\right) = -\mu s \quad (6)$$

Assim, traçando o gráfico do logaritmo da intensidade em função da distância, foi possível calcular o valor do coeficiente de atenuação a partir do declive. Os gráficos obtidos encontram-se representados na Figura 6.

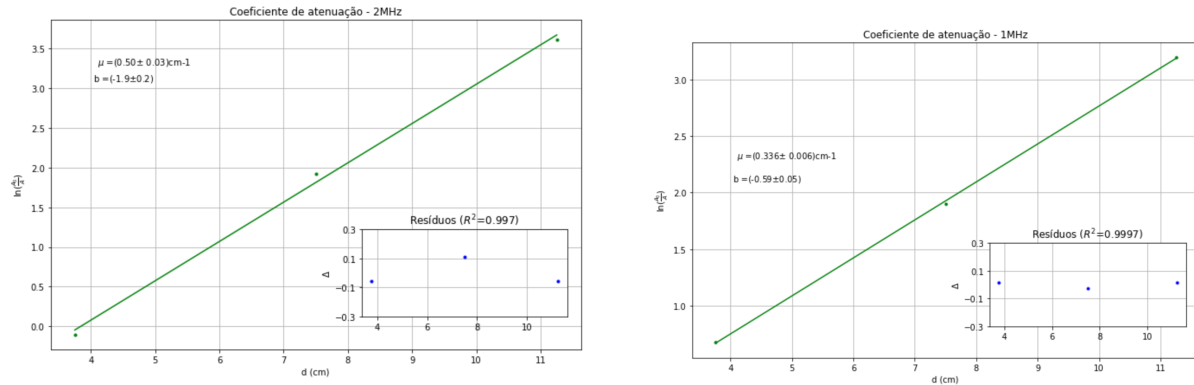


Figura 6: Gráficos de $\ln\left(\frac{A}{A_0}\right)(s)$ com as respetivas retas de ajuste e gráficos de resíduos.

Os resultados obtidos para o coeficiente de atenuação a partir do declive do gráfico encontram-se na Tabela 7.

	$f^n \times 10^9$	$\mu(\text{cm}^{-1})$	$\mu(\text{dB cm}^{-1})$	$\mu_{\text{teórico}}$	Er(%)
Sonda 1MHz	63,10	$0,336 \pm 0,006$	$2,92 \pm 0,05$	3,15	7
Sonda 2MHz	219,71	$0,5 \pm 0,03$	$4,1 \pm 0,5$	4,15	4

Tabela 7: Coeficientes de atenuação para ambas as sondas.

Para ambas as sondas, o ajuste é coincidente com os dados experimentais e o valor de R^2 é muito próximo de um. Para além disso, os resíduos apresentam uma distribuição aleatória pelo que podemos afirmar que o ajuste foi bem feito.

Os resultados obtidos estão de acordo com o esperado, uma vez que para a sonda de 2 MHz o coeficiente de atenuação é maior, resultando num poder de penetração menor.

É de notar que os erros relativos são significativos. Isto pode ser explicado pelo facto de a Eq. 4 não ter em consideração a fração de energia dissipada fora do meio em estudo como, por exemplo, na mesa onde se pousam os cilindros ou até mesmo a água utilizada no acoplamento.

3.2 Avaliação do desempenho dos transdutores a partir de *A-scans*

Os dados recolhidos para os orifícios 3,4,6 e 10 encontram-se representados na Figura 7.

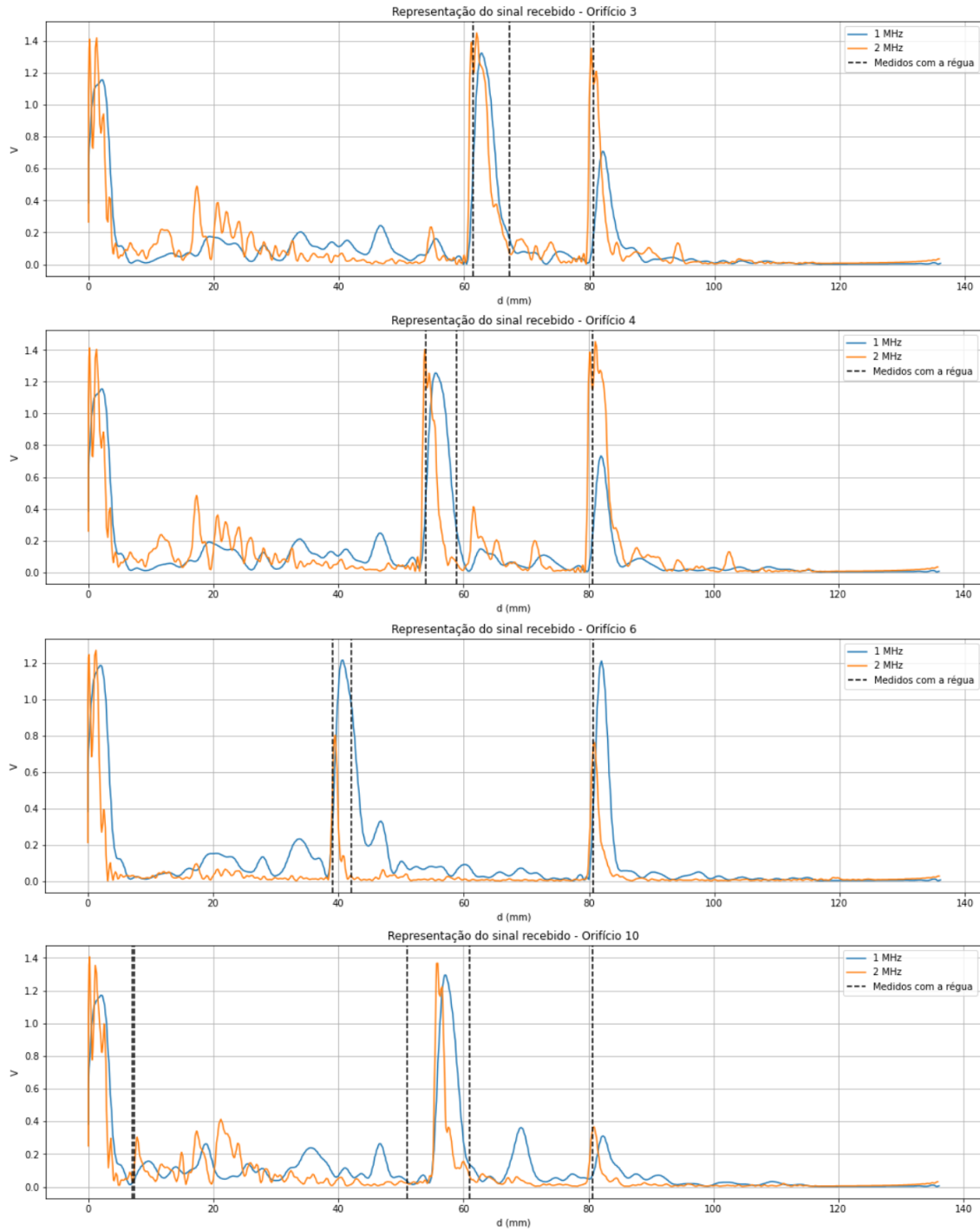


Figura 7: Gráficos representativos do sinal visualizado para cada orifício com ambas as sondas. As linhas verticais correspondem às medidas efetuadas com a régua.

Pela análise destes gráficos, notou-se que nenhum dos dois transdutores mede os valores de forma exata. Isto pode estar relacionado com os valores da velocidade do som e do tempo de atraso introduzidos no software. Outro fator é a existência de inúmeros picos de menor amplitude resultantes de outras reflexões no meio.

No entanto, é de notar que os valores obtidos pela sonda de 2 MHz estão muito mais próximos da realidade, havendo alguns picos que coincidem com o medido com a régua.

Desta forma, podemos concluir que, tal como visto anteriormente, o transdutor de maior frequência, têm um melhor poder de resolução.

3.3 Avaliação do desempenho dos transdutores a partir de *B-scans*

Após se alterar o software para o modo de visualização *B-scan*, obteve-se duas imagens representativas da estrutura do fantoma, representadas na Figura 8.

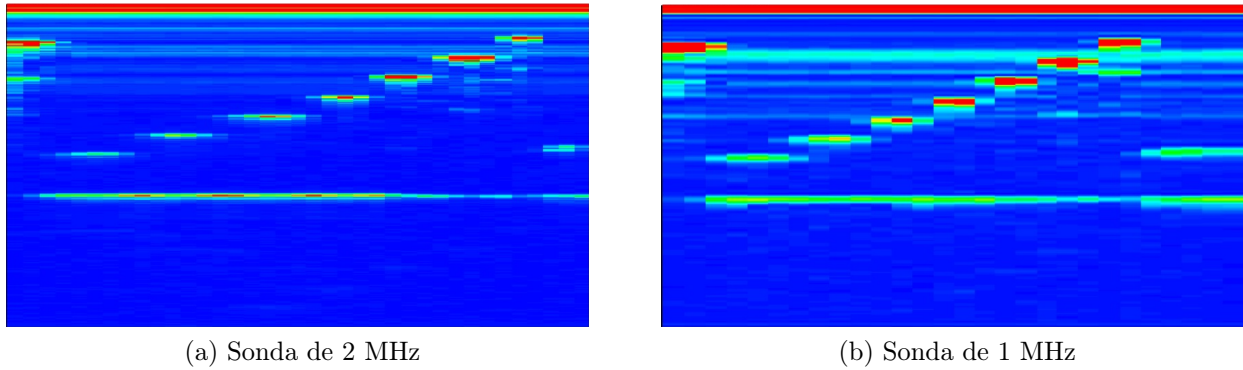


Figura 8: Imagens representativas do fantoma obtidas através do modo de inspeção *B-scan*.

Analisando estas imagens, verificou-se que a sonda de 2 MHz apresenta um melhor poder de resolução, uma vez que os orifícios, em geral, possuem melhor nitidez e foi possível detetar os orifícios 1 e 2. No entanto, a sonda de menor frequência apresenta um melhor poder de penetração, visto que permite uma maior nitidez para os orifícios mais afastados. Estes resultados são concordantes com os analisados nas secções anteriores.

4 Conclusão

Na primeira parte deste trabalho, a partir de *A-Scans* de três cilindros de acrílico, realizou-se um ajuste linear que permitiu calcular a velocidade de propagação do som no acrílico e o tempo de atraso de cada transdutor. Obteve-se, para a sonda de 1 MHz, que $v_{som} = (2,71 \pm 0,02) \times 10^3 m/s = (2,71 \times 10^3 \pm 0,7\%)$ e que para a sonda de 2 MHz, $v_{som} = (2,75 \pm 0,01) \times 10^3 m/s = (2,75 \times 10^3 \pm 0,7\%)$. Os erros percentuais foram de 0,2% e 1% o que indica uma boa exatidão. Para o transdutor de menor frequência obteve-se também que $t_{2L} = (1,2 \pm 0,4)\mu s$ e para o de maior frequência $t_{2L} = (1,4 \pm 0,1)\mu s$.

Estudou-se, também, a atenuação dos ultrassons nas amostras para as duas frequências referidas e obteve-se $k = (2,92 \pm 0,05) dBcm^{-1}$ para 1 MHz e $k = (4,1 \pm 0,5) dBcm^{-1}$ para 2 MHz, verificando-se um aumento da atenuação com o aumento da frequência. Ainda na primeira parte, notou-se que a largura a meia altura dos impulsos gerados pelo transdutor de 2 MHz era inferior à de 1 MHz, como era previsto.

Na segunda parte do trabalho, estudou-se a resolução ultrassônica para ambas as frequências. Nomeadamente, pela visualização dos ecos provenientes das múltiplas estruturas no interior do fantoma, verificou-se que os valores medidos com a sonda de 2 MHz eram mais próximos dos medidos com a régua e, conseqüentemente, que a sonda de maior frequência possuía um maior poder de resolução.

No modo de inspeção *B-scan* verificou-se um maior poder de penetração para a sonda de menor frequência e uma melhor resolução axial para o transdutor de maior frequência.

Em suma, os objetivos deste trabalho foram cumpridos e obteve-se resultados com boa exatidão e precisão, pelo que a experiência foi bem sucedida.

Referências

- [1] Docentes da unidade curricular Laboratório de Física III. Caracterização de materiais através de ultra-sons, 2021.
- [2] PHYWE. Attenuation and velocity of ultrasound in solidstate materials (transmission). tess expert, 2019.

A Cálculo de incertezas

A.1 Desvio padrão

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

A.2 Incerteza e erro percentual

$$u(x)(\%) = \frac{u(x)}{x} \times 100 \quad (8)$$

$$\text{erro}(\%) = \frac{|x_{exp} - x_{ref}|}{x_{ref}} \times 100 \quad (9)$$

A.3 Incerteza na média

$$u(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (10)$$

onde s é o desvio padrão e N o número de amostras.

A.4 Incerteza na velocidade do som $c = 2 \frac{s_1 - s_2}{t_1 - t_2}$

$$u(c) = \frac{2}{t_1 - t_2} \sqrt{(1 - s_2)^2 u^2(s_1) + (s_1 - 1)^2 u^2(s_2) + \left(\frac{s_2 - s_1}{t_1 - t_2}\right)^2 u^2(t_1) + \left(\frac{s_1 - s_2}{t_1 - t_2}\right)^2 u^2(t_2)} \quad (11)$$

A.5 Incerteza no tempo de atraso $t_{2L} = t - \frac{2s}{c}$

$$u(t_{2L}) = \sqrt{\left(1 - \frac{2s}{c}\right)^2 u^2(t) + \left(t - \frac{2}{c}\right)^2 u^2(s) + \left(t + \frac{2s}{c^2}\right)^2 u^2(c)} \quad (12)$$