

T7 - Caracterização de materiais através de ultrassons

Maria Helena Nunes da Silva

Dezembro 2023

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

Resumo

Recorrendo a dois transdutores piezo-elétricos de frequências acústicas 1 e 2 MHz acoplados a amostras de acrílico de diferentes dimensões, determinou-se o *time shift* resultante da propagação dos sinais na camada protetora como $1.4 \mu s$ para 1 MHz e $0.9 \mu s$ para 2 MHz (incertezas de $0.1 \mu s$) e a velocidade ultrassónica no acrílico como 2734 m/s (incerteza de 0.2% e erro de 0.04%). Concluiu-se, usando A-scans, tanto em modo *Time of flight* como *Depth*, e B-scans, que para uma maior frequência, o transdutor possui um maior poder de resolução e o sinal propagado no meio material sofre uma maior atenuação. Determinou-se o coeficiente de atenuação no acrílico como 1.7 dB/cm para 1 MHz (erro de 24% e incerteza de 9%) e 2.8 dB/cm para 1 MHz (erro de 1% e incerteza de 5%).

1 Objetivos

- Compreensão do funcionamento de transdutores piezo-elétricos para a geração e captação de ondas sonoras, realização de medidas de tempo de voo e estudo das propriedades acústicas de materiais;
- Interpretação de varrimentos A-scan e B-scan;
- Avaliação da atenuação de ultrassons em materiais e da sua dependência com a frequência acústica;
- Avaliação do poder de resolução em função da frequência acústica.

2 Introdução [1]

Ultrassons (US) são sons (ondas de pressão) com frequências superiores a 20 kHz, isto é, fora do espectro audível pelo ser humano. Na propagação de um impulso ultrassônico por meios materiais, este pode sofrer **reflexão** na presença de uma descontinuidade do meio, isto é, a existência de algum defeito ou fissura, ou uma diferença na **impedância acústica** do meio, Z :

$$Z = \rho v \quad (1)$$

onde ρ é a densidade do meio e v a velocidade de propagação do som nesse mesmo meio.

Além de reflexão, numa interface entre dois meios o impulso pode também sofrer **transmissão** e perder energia quer por espalhamento, quer por pequenas imperfeições do meio que atravessa, logo a amplitude A da onda de pressão vai se atenuando ao longo da propagação. Tal atenuação é descrita por uma relação exponencial:

$$A = A_0 e^{-\mu(2s)} \quad (2)$$

onde $2s$ é o **caminho no meio acústico** (aumenta com o número de reflexões realizadas) e μ a **constante de atenuação** da onda, proporcional a f^n , sendo f a frequência da onda ultrassônica e $n \in [1, 2]$. Linearizando esta expressão obtém-se:

$$\ln(A) = -\mu(2s) + \ln(A_0) \quad (3)$$

O coeficiente de atenuação está expresso, nas equações anteriores, em cm^{-1} ; contudo, é usual ser exprimido em dB/cm, isto é, decibéis por centímetro. A unidade decibel relaciona duas potências tal que:

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{A_0}{A} \right)^2 = 10^{\frac{\text{dB}}{10}}$$

ou seja

$$\log_{10} \left(\frac{A_0}{A} \right) = \frac{\text{dB}}{20}$$

Recorrendo a regras de logaritmos, tem-se:

$$\text{dB} = \frac{20}{\ln(10)} (\ln(A_0) - \ln(A))$$

logo, tendo em conta a equação 3, a conversão de unidades do coeficiente de atenuação dá-se por:

$$\mu(\text{em dB/cm}) = \frac{20}{\ln(10)} \mu(\text{em cm}^{-1}) \quad (4)$$

A fração de energia refletida na interface entre dois materiais de impedâncias Z_1 e Z_2 , para um impulso que incide normalmente à superfície, é:

e pelo princípio de conservação de energia tem-se que a fração de energia transmitida é dada por:

2.1 Transdutor piezo-elétrico



3

Nesta experiência o transdutor (ou sonda) será acoplado à amostra com uma camada fina de água. Este passo pode ser justificado analisando as impedâncias do acrílico, do ar e da água:

	c (m/s)	ρ (kg/m ³)	Z (10 ⁶ kg/(s m ²))
acrílico	2730	1185	3.2351
ar (aprox. 20°C)	343.1	1.207	0.0004
água (aprox. 20°C)	1480	998.2	1.4774

Figura 2: Valores de velocidade do som[3][4] e densidade[5][6] tabelados para acrílico, ar e água, com respetiva impedância a partir da equação 1.

A partir da equação 5 determinou-se que a refletância água-acrílico é de aproximadamente 0.139, enquanto a refletância ar-acrílico é de aproximadamente 0.999. Assumindo que a impedância do material da camada protetora do transdutor é semelhante à do acrílico, pode-se estimar, recorrendo à equação 6, que a percentagem de energia transmitida para o acrílico no caminho transdutor >> água >> acrílico é cerca de 74%, em oposição à 0.1% de energia que seria transmitida no caminho transdutor >> ar >> acrílico. Assim, verifica-se que a água é um meio que diminui a porção do sinal refletido na interface com o acrílico, permitindo que grande parte da onda ultrassónica seja propagada para este meio.

2.2 Modos de inspeção US

2.2.1 A-scan

É abreviatura de *Amplitude scan*, isto é, este modo representa o vetor de valores de intensidade do eco, em função da profundidade do eco. Assim, consiste num varrimento axial. O programa tem diferentes modos de aquisição em A-scan:

- **HF** - apresenta simplesmente o sinal ultrassónico medido;
- **Amp** - apresenta apenas a envolvente extraída do sinal através de cálculos do programa (visto que o sinal é no fundo uma oscilação modulada em amplitude).

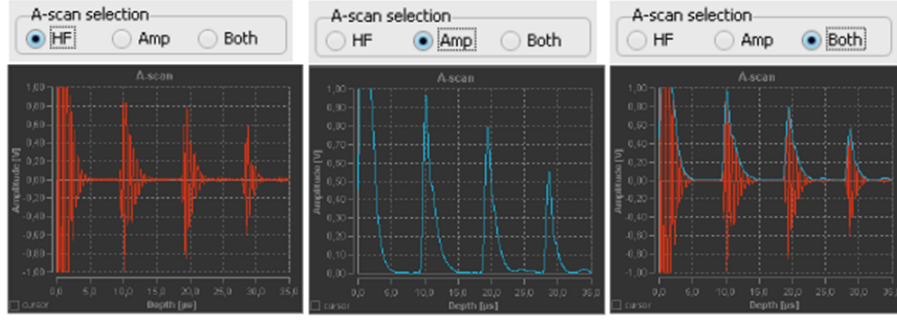


Figura 3: Exemplo de sinal US medido em A-scan para os diferentes modos de aquisição [7] (nota: altura do maior pico ultrapassa dimensões da janela, mas na realização da experiência garantiu-se que isto não ocorreu).

Para compensar a atenuação exponencial do sinal, este pode ser amplificado por **TGC** - *Time Gain Compensation*: ganho como uma função do *time of flight* (tempo de voo) entre as várias reflexões.

2.2.2 B-scan

Consiste na agregação de A-scans recolhidos sequencialmente no espaço, que constituem uma imagem representativa de um corte seccional da amostra em teste. O programa converte a amplitude da envolvente dos ecos de cada A-scan para uma escala de cores artificiais.

2.3 Velocidade ultrassónica

Para uma amostra com um transdutor acoplado a uma das suas faces, a velocidade de propagação do impulso ultrassónico no material que constitui a amostra, c , é dada por:

$$c = \frac{2s}{t} \quad (7)$$

onde s é a distância entre o transdutor e a face-fronteira refletora e t o tempo de voo, sendo $2s$ o percurso do sinal US na amostra.

No entanto, como representado na figura 1, cada transdutor possui uma camada protetora característica com uma dada espessura L , que introduz um tempo adicional ao tempo de voo da amostra que é necessário ter em conta. Assim, corrigindo a equação 7 obtém-se:

$$t = \frac{2s}{c} + t_{2L} \quad (8)$$

de onde se deduz

$$t_{2L} = \frac{2L}{c} \quad (9)$$

pois, nesta experiência, assume-se que a camada protetora e o acrílico têm impedâncias semelhantes.

3 Método Experimental

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

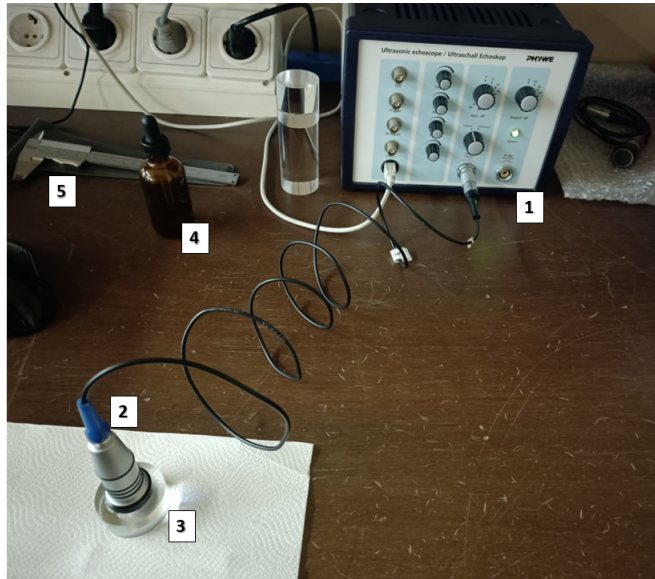


Figura 4: Montagem utilizada nesta parte da experiência: 1 - controlador *Ecoscope PHYWE* ligado a computador via USB; 2 - sonda ultrassônica; 3 - cilindro de acrílico; 4 - conta gotas com água; 5 - craveira.

- Com a craveira, mediram-se as alturas h dos 3 cilindros de acrílico disponíveis (C1, C2 e C3);
- Ao controlador *Ecoscope PHYWE* ligou-se a sonda de 1 MHz (azul) à entrada *Probe (Reflection)* e posicionou-se o seletor em *Reflection*;
- Acoplou-se a sonda ao menor cilindro (C1) com uma pequena gota de água;

- No software *Measure UltraEcho* desativou-se a opção *time shift enabled* no menu *options > parameters*, e ajustou-se o parâmetro *Gain dB* (ganho fixo do sinal) de forma a que a altura do pico ocupasse aproximadamente 75% da amplitude da janela. Este ganho não foi alterado até ao fim da experiência;
- Visualizou-se os sinais em modo *HF+Amp*;
- Visualizou-se o sinal apenas em modo *Amp* e, usando cursores, registou-se o tempo de atraso da sonda, t_{2L} , no vale entre os dois picos iniciais, e a diferença entre o tempo de voo total para cada reflexão t_n (cada pico n após os dois picos iniciais) e o tempo medido no 2º pico inicial;
- Repetiu-se o procedimento anterior para os outros dois cilindros (C2 e C3) e com a sonda de 2 MHz (vermelha);
- Recorrendo à equação 8 estimou-se, para cada sonda, a velocidade do som no acrílico c .

3.2 Avaliação do desempenho dos transdutores, a partir de A-scans e B-scans

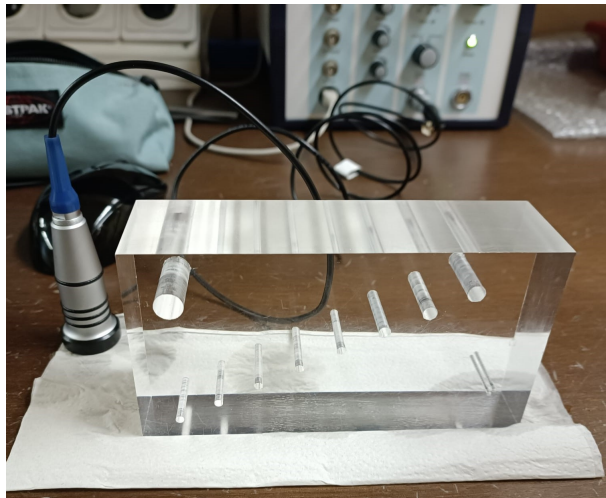


Figura 5: Montagem utilizada nesta parte da experiência: apenas se substituem os cilindros pelo fantoma de acrílico apresentado.

- Repetiu-se o passo anterior para a outra face longa do fantoma de forma a detetar todos os orifícios;
- Repetiu-se o procedimento para a sonda de 2 MHz.

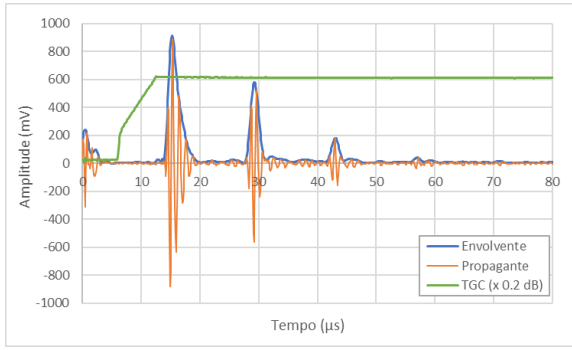
4 Análise e Discussão de Resultados

4.1 Propriedades acústicas do acrílico a partir de sinais A-scan

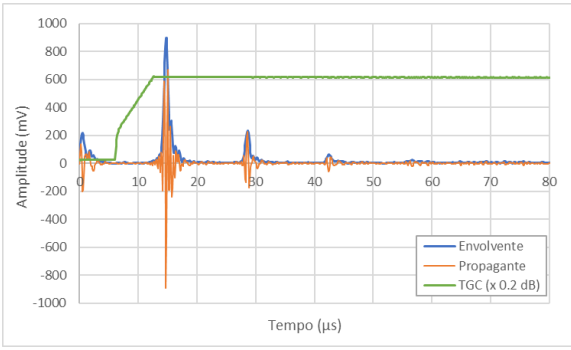
4.1.1 Determinação da velocidade ultrassónica no acrílico c e do *time shift* t_{2L} de cada sonda

	h (± 0.05 mm)
C1	18.90
C2	40.00
C3	80.40

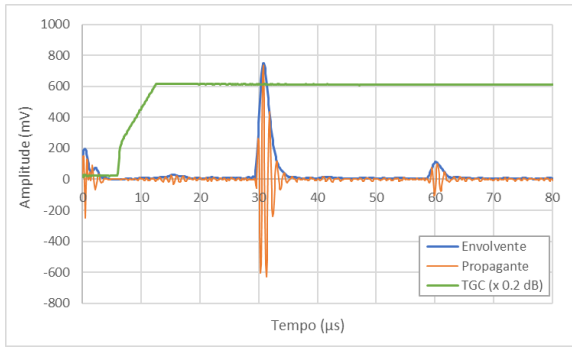
Figura 7: Tabela com alturas dos cilindros medidas com craveira.



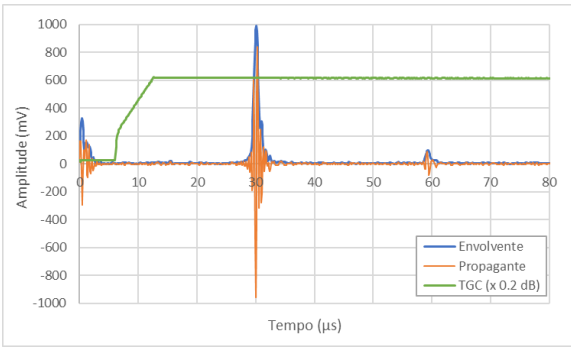
(a) C1 - 1 MHz



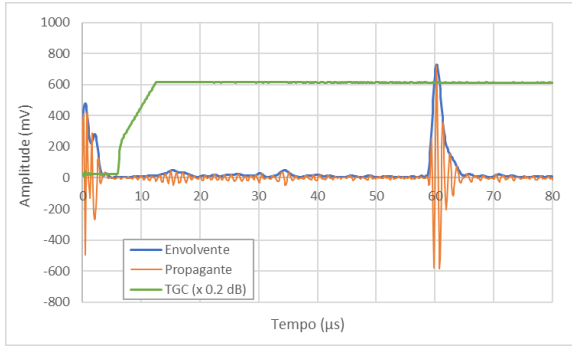
(b) C1 - 2 MHz



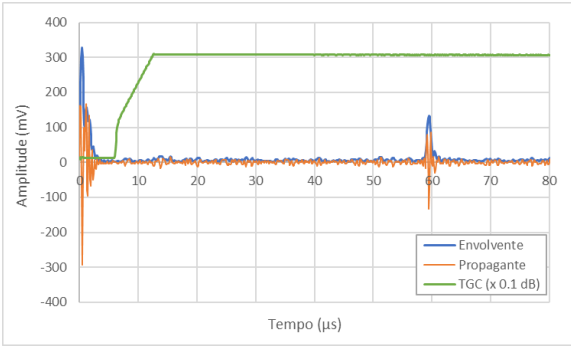
(c) C2 - 1 MHz



(d) C2 - 2 MHz



(e) C3 - 1 MHz



(f) C3 - 2 MHz

Figura 8: Sinais *HF* (propagante) e *Amp* (envolvente) e ganho dinâmico (TGC) para cada cilindro e cada sonda.

Em todos os gráficos da figura 8 observam-se dois picos iniciais até 5 μs . Estes correspondem ao impulso inicial emitido pelo transdutor (que atravessa a camada protetora) e à consequente reflexão deste impulso na interface camada protetora-água (este segundo pico é inferior ao primeiro, como previsto, dada a fraca refletância desta interface, estudada na introdução teórica).

Tendo em conta a equação 8, e numa tentativa de calcular t_{2L} a partir do ajuste, em vez de utilizar os registos de aula (diferença entre tempo de voo total de cada reflexão e tempo registado no 2º pico inicial), a partir dos dados gravados retirou-se apenas o tempo de voo total t_n para cada reflexão n , ou seja, sem subtrair o tempo no 2º pico inicial:

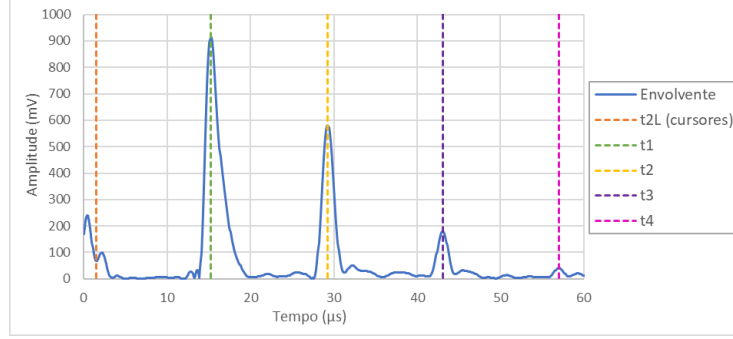


Figura 9: Exemplificação do registo de t_{2L} (em aula com cursor) e dos tempos de voo para cada reflexão (a partir dos dados gravados) com o sinal envolvente transmitido em C1 com a sonda de 1 MHz.

Desta forma, mediu-se para todos os cilindros ($\pm 0.1 \mu s$):

- t_{2L} (cursors - 1 MHz) = $1.4 \mu s$
- t_{2L} (cursors - 2 MHz) = $0.9 \mu s$

e

			1 MHz	2 MHz
	s (mm)	u(s) (mm)	t ($\pm 0.1 \mu s$)	
C1	18.90	0.05	15.3	14.8
	37.80	0.10	29.3	28.6
	56.70	0.15	43.3	42.5
	75.60	0.20	57.0	56.6
C2	40.00	0.05	30.8	30.1
	80.00	0.10	60.2	59.3
	120.00	0.15	89.6	-
C3	80.40	0.05	60.3	59.5

Figura 10: Tabela com tempos de voo de todos os picos (reflexões) observadas, para os 3 cilindros e para as 2 sondas, e respectivas distâncias s entre o transdutor e a face refletora, obtidas através de $s = nh$, onde h é a altura da amostra e $n \in \{1, 2, 3, 4\}$ o número da reflexão correspondente. As equações de incerteza encontram-se em anexo.

Verifica-se que, quanto maior o caminho acústico do sinal ultrassónico (isto é, quanto maior for a altura do cilindro), maior é a quantidade de energia dissipada no meio

acrílico quer por espalhamento, quer por absorção, e, conseqüentemente, menor é o número de reflexões na interface do cilindro com a toalha de papel/mesa, ou seja, menor é o número de picos detetados. Por este mesmo facto, decidiu-se realizar um ajuste do tempo de voo t em função da distância $s = nh$ entre o transdutor e a face refletora, de acordo com a equação 8, com *todos* os pontos registados para cada sonda:

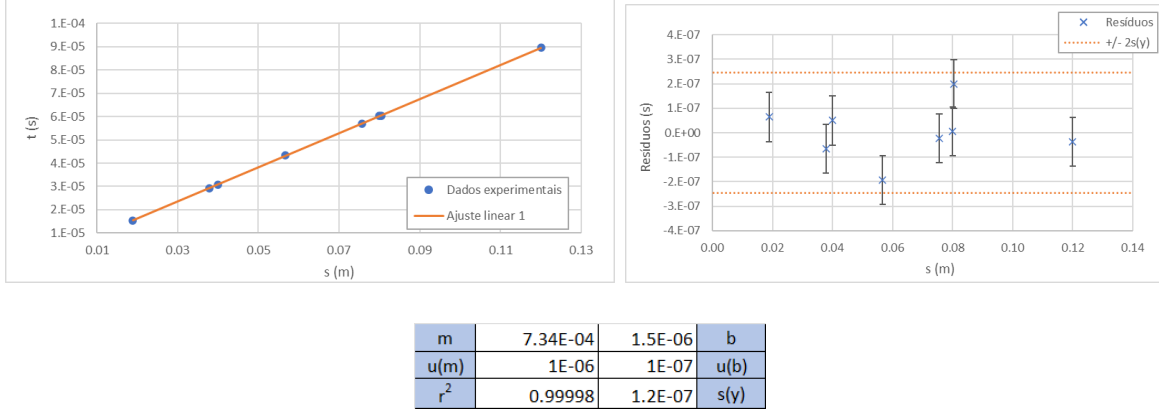


Figura 11: Gráfico do tempo de voo em função do caminho acústico para a sonda de 1 MHz com respetivo ajuste, parâmetros de ajuste e gráfico de resíduos.

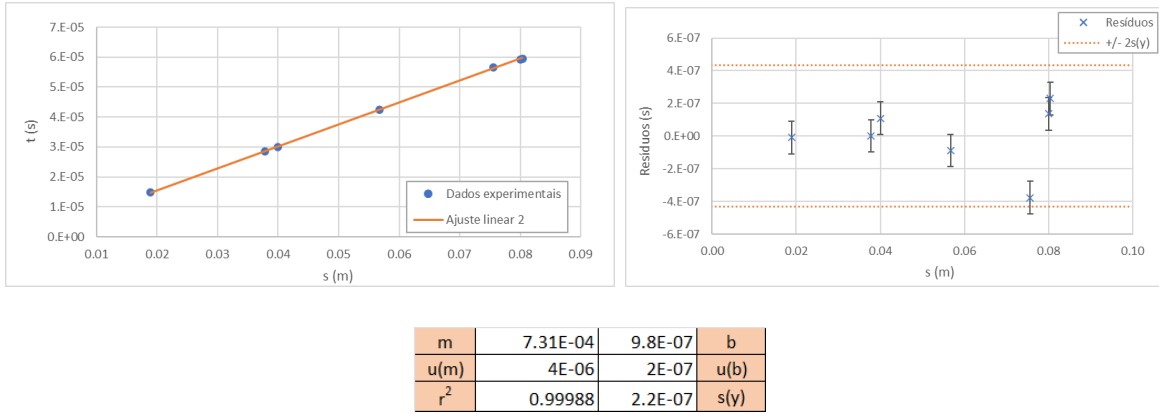


Figura 12: Gráfico do tempo de voo em função do caminho acústico para a sonda de 2 MHz com respetivo ajuste, parâmetros de ajuste e gráfico de resíduos.

Ambos os resíduos são aleatórios; contudo, observando as barras de erro verifica-se alguma incerteza associada aos ajustes. A partir da equação 8 determina-se a velocidade ultrassónica no acrílico pela expressão:

$$c = \frac{2}{m} \quad (10)$$

onde m é o declive do ajuste. Quanto a t_{2L} , este corresponde à ordenada na origem b .

		Valor	Incerteza	Incerteza (%)	Erro (%)
1MHz	c (m/s)	2725	5	0.2%	-0.2%
	t _{2L} (ajuste) (μs)	1.5	0.1	7%	7%
2MHz	c (m/s)	2737	14	0.5%	0.3%
	t _{2L} (ajuste) (μs)	1.0	0.2	22%	9%

Figura 13: Tabela com valores de c e t_{2L} determinados com incerteza e erro. Os valores de c experimentais foram comparados à velocidade de referência mencionada na introdução (2730 m/s) e os valores de t_{2L} do ajuste foram comparados com os valores obtidos com os cursores.

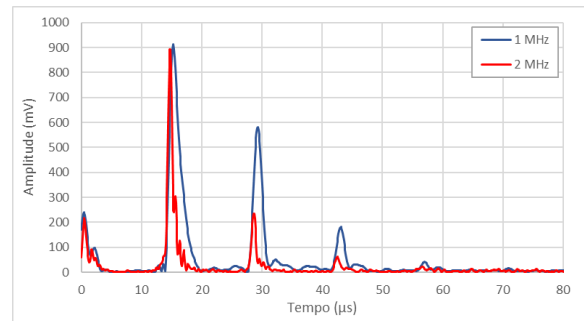
A velocidade ultrassônica no acrílico foi determinada com grande precisão e exatidão para ambas as sondas. Realizando a média das duas velocidades, obtém-se como valor final:

$$\bar{c} = (2731 \pm 4) \text{ m/s}$$

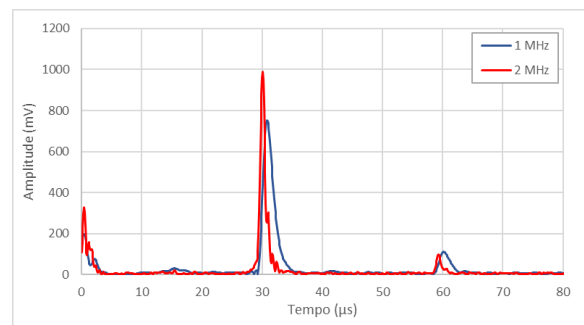
ou seja, tem uma incerteza de 0.2% e um erro de 0.04%.

Observando a figura 13 de novo, verifica-se que t_{2L} , comparativamente aos valores de c , foi determinada com relativamente menor exatidão, mas também menor precisão. Tal indica, mais uma vez, a incerteza associada ao ajuste, que poderá ser justificada pelo espaçamento não uniforme dos pontos. Ainda assim, um fator a ter em conta é que a própria incerteza de medição dos tempos de voo no software é de $0.1 \mu\text{s}$, pelo que, em comparação, estes tempos de atraso foram determinados com incertezas razoáveis, além de que é necessário considerar que os valores de referência foram medidos experimentalmente com cursores e, por isso, poderão não ser exatos.

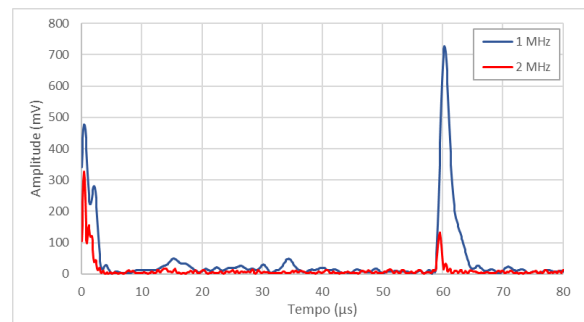
4.1.2 Determinação do coeficiente de atenuação no acrílico μ para cada sonda



(a) C1



(b) C2



(c) C3

Figura 14: Sinal em modo de aquisição *Amp* para cada cilindro e cada sonda.

			1 MHz	2 MHz
	s (mm)	u(s) (mm)	A (± 1 mV)	
C1	18.90	0.05	913	894
	37.80	0.10	580	235
	56.70	0.15	181	63
	75.60	0.20	42	23
C2	40.00	0.05	751	988
	80.00	0.10	111	98
	120.00	0.15	19	-
C3	80.40	0.05	727	133

Figura 15: Tabela com amplitudes de todos os picos (reflexões) observadas, para os 3 cilindros e para as 2 sondas, e respectivas distâncias s entre o transdutor e a face refletora.

Nota: observando-se os gráficos da figura 8, verifica-se que o ganho dinâmico TGC aplicado é praticamente constante para os picos causados pelas reflexões e também praticamente idêntico para as duas sondas. Como referido no método, dado que o ganho fixo também não foi modificando ao longo da experiência, pode-se concluir que os valores de amplitudes apresentados na figura 14 não são reais, mas estão amplificados por um ganho aproximadamente igual.

A partir dos gráficos da figura 14 já é possível concluir que, para uma maior frequência, ocorre uma maior atenuação do sinal. Em todos os gráficos é observável também que a largura dos picos é menor para 1 MHz do que para 2 MHz. Para verificar este facto, determinou-se a largura do pico a meia altura do 1º pico de cada sonda e cilindro. Para tal, calculou-se a metade da amplitude deste pico e determinou-se a diferença Δt entre os tempos correspondentes às amplitudes mais próximas da metade da amplitude máxima:

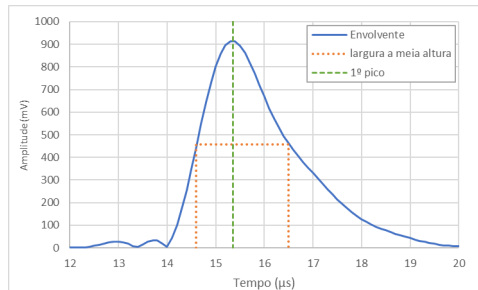


Figura 16: Exemplificação do registo de Δt para o 1º pico usando o sinal envolvente transmitido em C1 com a sonda de 1 MHz.

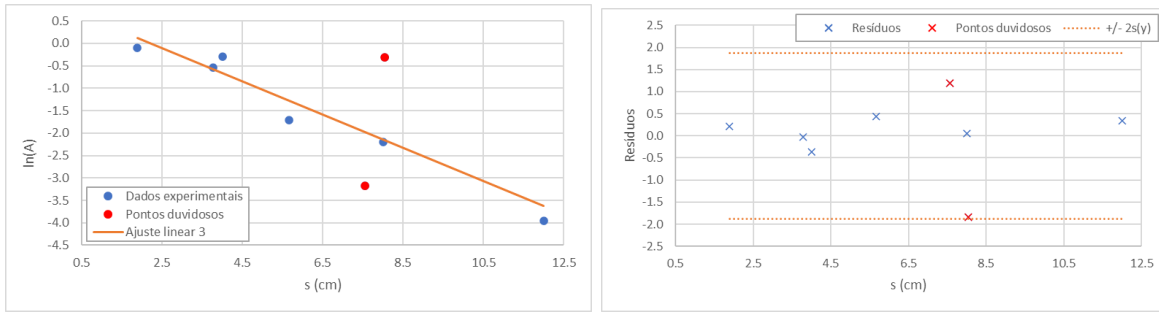
Deste modo, obteve-se os seguintes resultados:

$\Delta t (\pm 0.1 \mu s)$	1 MHz	2 MHz
C1	1.9	0.8
C2	1.9	0.9
C3	1.9	0.8

Figura 17: Tabela com valores de largura do pico a meia altura determinados para cada sonda e cada cilindro.

Como se presumiu, para uma menor frequência há uma maior largura dos picos do sinal registado. Assim, conclui-se que a sonda de 2 MHz deteta os impulsos gerados pelas reflexões com maior precisão, ou seja, tem maior resolução temporal do que a sonda de 1 MHz.

Recorrendo aos valores registados na figura 15, realizou-se um ajuste com todas as amplitudes registadas para a sonda de 1 MHz com base na equação 3:

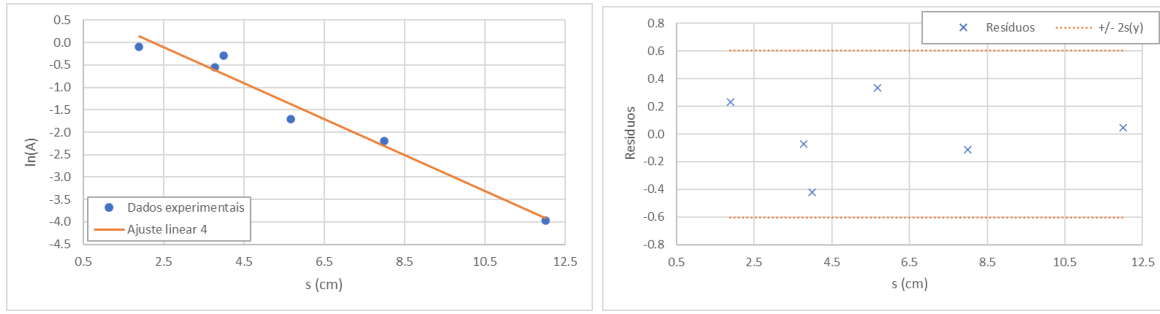


m	-0.4	0.8	b
$u(m)$	0.1	0.8	$u(b)$
r^2	0.65	0.94	$s(y)$

Figura 18: Gráfico do logaritmo da amplitude em função do caminho acústico para a sonda de 1 MHz com respetivo ajuste, parâmetros de ajuste e gráfico de resíduos.

Como se pode observar, o ajuste não tem qualidade, identificando-se claramente, tanto pelo gráfico de ajuste como pelo gráfico de resíduos, dois pontos duvidosos. Um dos pontos corresponde à única reflexão detetada em C3 (cilindro que proporciona o maior caminho acústico), e o outro ponto corresponde à 4ª e última reflexão ocorrida em C1, apontando para alguma falta de exatidão na deteção da amplitude após um longo caminho acústico/após sucessivas reflexões, e consequente falta de exatidão na amplificação do sinal por parte do software, dado que a onda já perdeu bastante energia na propagação no acrílico.

Assim, realizou-se um novo ajuste sem os pontos duvidosos:



m	-0.40	0.9	b
u(m)	0.04	0.3	u(b)
r^2	0.97	0.30	s(y)

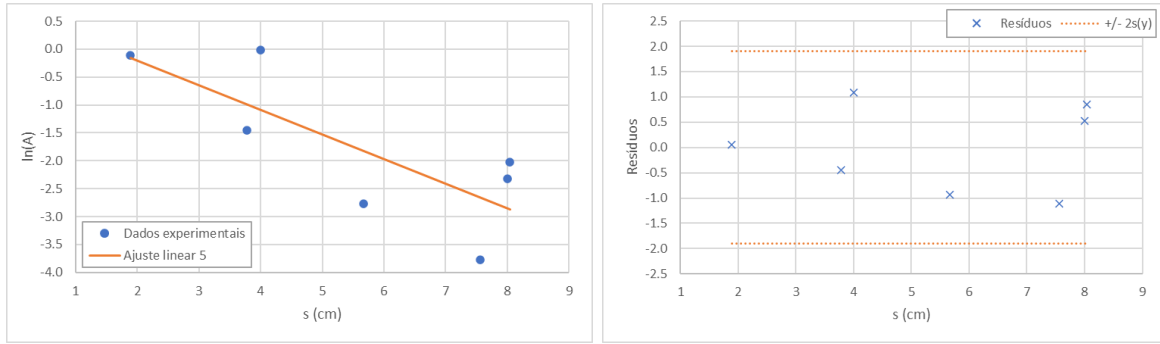
Figura 19: Gráfico do logaritmo da amplitude em função do caminho acústico para a sonda de 1 MHz com respetivo ajuste, parâmetros de ajuste e gráfico de resíduos, sem pontos duvidosos.

Verifica-se uma melhoria clara na qualidade do ajuste, dada a aleatoriedade dos resíduos, pelo que é este o ajuste a utilizar para o cálculo de μ . A partir da equação do ajuste determina-se o coeficiente de atenuação no acrílico pela expressão:

$$\mu = \frac{20}{\ln(10)} \left(\frac{m}{2} \right) \quad (11)$$

onde se recorre à equação 4 de conversão para as unidades dB/cm.

Quanto à sonda de 2 MHz, procedeu-se a uma análise análoga, tentando realizar um ajuste com todas as amplitudes registadas:

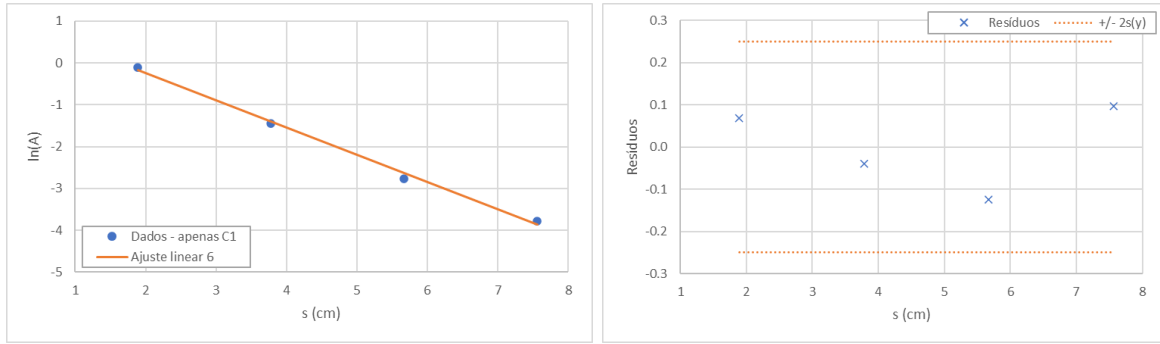


m	-0.4	0.7	b
u(m)	0.2	1.0	u(b)
r^2	0.60	0.95	s(y)

Figura 20: Gráfico do logaritmo da amplitude em função do caminho acústico para a sonda de 2 MHz com respetivo ajuste, parâmetros de ajuste e gráfico de resíduos.

Ao contrário da análise para a sonda de 1 MHz, não é possível identificar pontos duvidosos; contudo, observa-se uma tendência linear para 4 pontos tanto no gráfico do ajuste como no gráfico de resíduos. Estes correspondem às reflexões registadas em C1, pelo que se decidiu realizar um ajuste linear apenas com estes pontos. A impossibilidade do uso de mais pontos, comparativamente aos ajustes para 1 MHz, justifica-se com o aumento da atenuação para maior frequência, como se concluiu na análise dos picos dos gráficos da figura 14, resultando em menores amplitudes que o software não amplifica com exatidão suficiente, como referido anteriormente.

Procedeu-se então ao ajuste referente apenas ao cilindro 1:



m	-0.65	1.0	b
u(m)	0.03	0.2	u(b)
r^2	0.996	0.12	s(y)

Figura 21: Gráfico do logaritmo da amplitude em função do caminho acústico para a sonda de 2 MHz apenas com C1 com respetivo ajuste, parâmetros de ajuste e gráfico de resíduos.

Os resíduos apresentam uma ligeira tendência parabólica; contudo, todos os pontos encontram-se dentro do intervalo $\pm 2s(y)$, pelo que se considerou que o ajuste possui qualidade suficiente para proceder ao cálculo de μ . Deste modo, tem-se como resultados finais:

	1 MHz	2 MHz
	μ (dB/cm)	
Valor experimental	1.7	2.8
Incerteza	0.2	0.1
Incerteza (%)	9%	5%
Valor referência	1.4	2.8
Erro (%)	24%	1%

Figura 22: Tabela com valores do coeficiente de atenuação no acrílico determinados experimentalmente com respetiva incerteza e erro percentual em relação aos valores de referência.

Como esperado, o coeficiente de atenuação é superior para a sonda de 2 MHz. Verifica-se também que o μ da sonda de 1 MHz foi calculado com relativamente menor precisão e exatidão. Isto justifica-se pelo facto do ajuste para 1 MHz recorrer a amplitudes de dois cilindros, ou seja, os pontos não estão igualmente espaçados. Para além disso, como já visto, a sonda de 1 MHz tem menor resolução temporal, isto é, os picos detetados têm menor precisão.

4.2 Avaliação do desempenho dos transdutores, a partir de A-scans e B-scans

4.2.1 Medidas em A-scan

Nota: Os valores de c introduzidos no software durante esta parte da experiência foram determinados em aula a partir do ajuste da equação 8, mas recorrendo a t correspondente à diferença entre tempo de voo total de cada reflexão e tempo registado no 2º pico inicial, como se descreveu na análise da 1ª parte da experiência. Desta forma, os valores introduzidos no software foram 2719.4 m/s para 1 MHz e 2718.1 m/s para 2 MHz, sendo ligeiramente diferentes dos determinados na análise com a equação já corrigida.

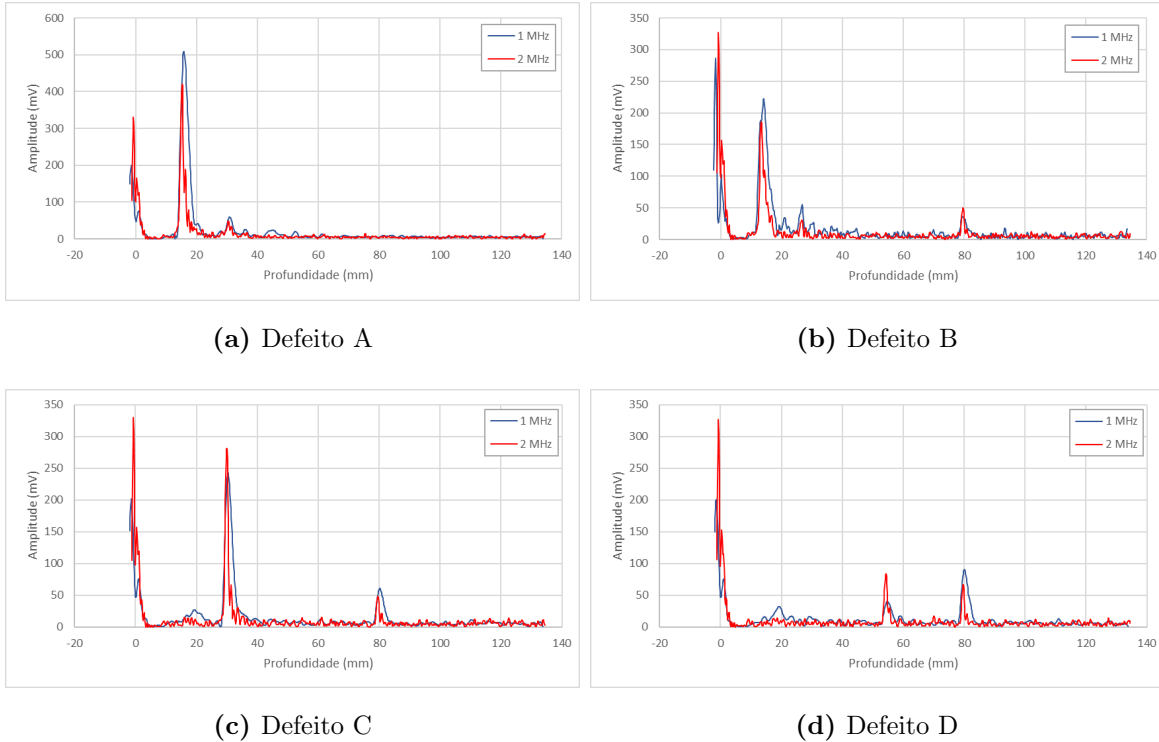


Figura 23: Sinal Amp (envolvente) para cada defeito do fantoma de acrílico e para cada frequência.

Primeiramente, pode se constatar que, como esperado, os picos detetados pela sonda de 2 MHz têm menor largura, comprovando a maior resolução temporal deste transdutor. Pode-se verificar também que, analogamente à parte anterior da experiência, existem 2 picos iniciais (até ≈ 5 mm) que correspondem ao impulso inicial emitido pela sonda e à reflexão do mesmo na interface da camada protetora com a água. No

entanto, estes gráficos apresentam valores negativos de profundidade sensivelmente até ao vale entre os dois picos iniciais, que coincide com a posição onde, na primeira parte da experiência, se mediu o *time shift* com os cursores. Assim, os valores negativos devem se referir à propagação na camada protetora de espessura L . De modo a fundamentar esta hipótese, calculou-se, para cada sonda, a diferença da média destes valores em relação à espessura determinada, a partir da equação 9, por:

$$L = \frac{c \cdot t_{2L}(\text{cursores})}{2} \quad (12)$$

recorrendo ao *time shift* medido com os cursores e à velocidade determinada pelo ajuste de cada frequência.

Obteve-se os seguintes resultados:

	1 MHz	2 MHz
	L (mm)	
Valor calculado	1.9	1.2
Incerteza	0.1	0.1
Incerteza (%)	6%	9%
Média A-scan (± 0.1 mm)	2.0	1.2
Diferença (%)	5%	-3%

Figura 24: Tabela com valores de L determinados a partir da equação 12 e através da média dos registos de profundidade em A-scan, com respetivas incertezas e diferença relativa.

Verifica-se que as médias dos valores de A-scan têm diferenças muito reduzidas em relação aos valores determinados a partir da equação 12 e incertezas praticamente idênticas, pelo que é plausível afirmar que os valores negativos de profundidade correspondem à propagação na camada protetora L . Ainda assim, as diferenças podem se dever ao facto de os valores de c introduzidos no software na experiência serem diferentes dos determinados pelo ajuste e usados no cálculo de L .

Voltando aos gráficos da figura 23, observa-se, para os defeitos B, C e D (ou seja. os mais distantes do transdutor), um pico do sinal à profundidade de ≈ 80 mm. Esta distância corresponde à altura do fantoma, pelo que este pico corresponde a reflexões na interface do acrílico com a toalha de papel/mesa. Para o defeito D, verifica-se que este 2º pico é igual ou até maior do que o 1º pico, correspondente ao orifício (≈ 54 mm). Tal pode ser explicado por este ser o defeito mais distante do transdutor, logo o sinal tem o maior caminho acústico e, por sua vez, a maior atenuação.

Registando então, para cada sonda, a profundidade do 1º pico (reflexão no orifício) obteve-se como resultados:

	Medido (± 0.05 mm)	1 MHz (± 0.1 mm)	Erro (%)	2 MHz (± 0.1 mm)	Erro (%)	Média	Incerteza	Incerteza (%)	Erro (%)
h_A	15.60	15.8	1.3%	15.2	-2.6%	15.5	0.2	1%	-0.6%
h_B	13.30	13.6	2.3%	13.4	0.8%	13.5	0.1	0.5%	1.5%
h_C	30.00	30.3	1.0%	29.9	-0.3%	30.1	0.1	0.5%	0.3%
h_D	54.60	54.7	0.2%	54.1	-0.9%	54.4	0.2	0.4%	-0.4%

Figura 25: Tabela com alturas dos orifícios registadas para cada sonda com respetiva incerteza e erro em relação aos valores medidos com régua e craveira.

Para a sonda de 1 MHz, todas as alturas foram determinadas por excesso, revelando algum erro nos valores de t_{2L} e c introduzidos no software. Quanto à sonda de 2 MHz, apenas 3 alturas foram determinadas por defeito. Além disso, os erros da sonda de 2 MHz são, em geral, menores que os da sonda de 1 MHz, mais uma vez comprovando a melhor resolução da sonda de 2 MHz. Finalmente, também convém salientar que as médias das alturas têm erros tanto por excesso como por defeito, descartando-se a ocorrência de qualquer outro erro sistemático.

4.2.2 Medidas em B-scan

Para cada sonda, sobrepos-se as imagens registadas nas duas faces longas do fantoma, obtendo-se:

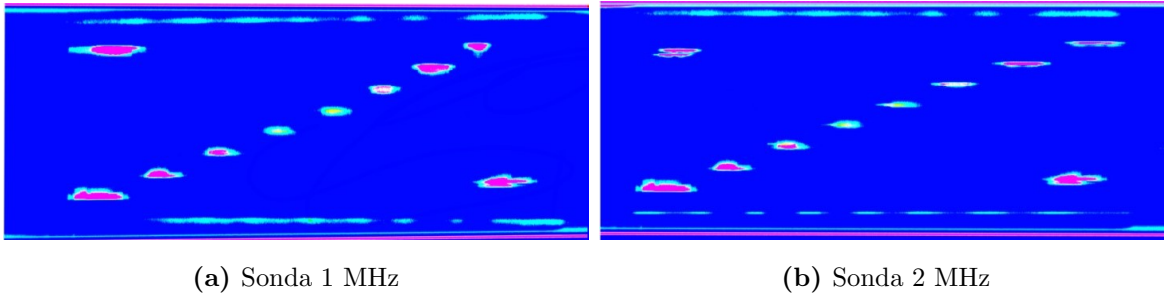


Figura 26: Imagens registadas em B-scan do fantoma de acrílico a escala de cores, para cada frequência.

Verifica-se mais uma vez que a sonda de 2 MHz tem maior resolução, dado que os orifícios têm um formato mais uniforme e distingue-se mais claramente os dois pequenos orifícios no canto superior esquerdo das imagens.

5 Conclusão

- Verificou-se que quanto maior for a dimensão da amostra que serve como meio acústico para o sinal, maior é a quantidade de energia dissipada no meio e, por sua vez, menor é o número de reflexões detetado pelo transdutor piezo-elétrico;
- Mediu-se o *time shift* resultante da propagação do sinal na camada protetora (com impedância semelhante à do acrílico) no interior do transdutor com os cursores do software, obtendo-se $t_{2L} = (1.4 \pm 0.1)\mu s$ para a sonda de 1 MHz e $t_{2L} = (0.9 \pm 0.1)\mu s$ para a sonda de 2 MHz. Determinou-se a velocidade ultrassônica no acrílico como $\bar{c} = (2731 \pm 4)$ m/s, com incerteza relativa de 0.2% e erro de 0.04%. Determinou-se o *time shift* também a partir dos tempos de voo totais (ajuste), tendo $t_{2L} = (1.5 \pm 0.1)\mu s$ para a sonda de 1 MHz e $t_{2L} = (1.0 \pm 0.2)\mu s$ para a sonda de 2 MHz, ou seja, com erros de 7% e 9% em relação aos respectivos valores medidos com os cursores e incertezas semelhantes;
- Verificou-se que a atenuação do sinal aumenta com a frequência, e determinou-se o coeficiente de atenuação no acrílico como $\mu = (1.7 \pm 0.2)$ dB/cm para a sonda de 1 MHz (erro de 24%, mas com incerteza significativa de 9%, parâmetros justificados pelo uso de registos de 2 cilindros para o ajuste e pela menor resolução temporal desta sonda) e como $\mu = (2.8 \pm 0.1)$ dB/cm para a sonda de 2 MHz (incerteza de 5% e erro de 1%);
- Determinou-se a espessura da camada protetora do transdutor como $L = (1.9 \pm 0.1)$ mm para 1 MHz e $L = (1.2 \pm 0.1)$ mm para 2 MHz;
- Mediu-se a profundidade de orifícios presentes num fantoma de acrílico recorrendo a A-scan com incertezas e erros não superiores a 2%, sendo que a sonda de 2 MHz permitiu melhores resultados;
- Em A-scan, tanto no modo *Time of flight* como no modo *Depth*, verificou-se que a largura dos picos detetados é menor na sonda de 2 MHz, comparativamente à sonda de 1 MHz, isto é, as reflexões detetadas são mais precisas. Em B-scan, a sonda de 2 MHz proporcionou uma imagem de melhor qualidade. Assim, como já referido, há um menor poder de resolução para uma menor frequência.

Referências

- [1] Responsáveis pela unidade curricular Laboratório de Física III. *T7 - Caracterização de materiais através de ultrassons*.
- [2] Philip Bloomfield, Wei-Jung Lo, and P.A. Lewin. Experimental study of the acoustical properties of polymers utilized to construct PVDF ultrasonic

- transducers and the acousto-electric properties of PVDF and P(VDF/TrFE) films. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions*, volume 47, pp. 1397-1405, dezembro 2000. https://www.researchgate.net/publication/3260885_Experimental_study_of_the_acoustical_properties_of_polymers_utilized_to_construct_PVDF_ultrasonic_transducers_and_the_acousto-electric_properties_of_PVDF_and_PVDFTrFE_films.
- [3] Olympus Corporation. *Material Sound Velocities*. <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/thickness-gauge/appendices-velocities/>.
- [4] National Weather Service. *Speed of Sound Calculator*. https://www.weather.gov/epz/wxcalc_speedofsound.
- [5] The Physics Hypertextbook. *Density of selected materials*. <https://physics.info/density/>.
- [6] TeamBest. *Acrylic & Polystyrene Phantom Materials*. http://www.teambest.com/CNMC_docs/dosimetry/slabPhantoms/CNMC_DP_AcrylicPolystyrene_PlasticSlab_12012015.pdf.
- [7] PHYWE. *Basic Set Ultrasonic Echography II - 13924-99*. https://www.phywe.com/biology/modern-imaging-methods-in-biology/basic-set-ultrasonic-echography-ii_2212_3143/.

A Anexo - Equações de incerteza

$$u(s) = nu(h)$$

$$u(c) = \frac{2u(m)}{m^2}$$

$$u(t_{2L}(\text{ajuste})) = u(b)$$

Incerteza da média

$$u(\bar{x}) = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$$

sendo σ o desvio-padrão dos valores e N o número de valores.

$$u(\mu) = \frac{20}{\ln(10)} \left(\frac{u(m)}{2} \right)$$

$$u(L) = \sqrt{\left(\frac{c \cdot u(t_{2L}(\text{cursors}))}{2} \right)^2 + \left(\frac{u(c) \cdot t_{2L}(\text{cursors})}{2} \right)^2}$$