

T7: Caracterização de materiais através de ultrassons

Alexandre Mouriz Correia

Dep. Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

1. Introdução:

Neste trabalho, estudamos a utilidade de ultrassons. Para compreender os ultrassons é importante revermos o que é som em geral.

Som é a propagação de uma onda mecânica acústica, uma onda longitudinal que se propaga de forma radial, apenas em meios materiais como os sólidos, líquidos ou gasosos. Ondas sonoras comportam-se de muitas maneiras como ondas eletromagnéticas correspondentes à luz. Tal como a luz, o som quando incide numa superfície entre dois meios acústicos pode ser refletido, transmitido ou absorvido ou uma combinação de todos estes fenómenos; isto dependerá dos valores de impedância acústica dos meios em causa (equação 1):

$$Z = \rho v$$

Onde ρ corresponde à massa específica (massa por volume) e v à velocidade de propagação do som no meio acústico.

Os seres humanos são capazes de ouvir um espectro de frequências sonoras, chamada de espectro audível, que se estende entre 20 Hz e 20 KHz, aproximadamente. Os sons de frequências menores que 20 Hz são chamados de infrassons, enquanto os sons de frequências superiores a 20000 Hz são chamados de ultrassons. Ultrassons são mais conhecidos pela sua utilização em ecografias baseadas na formação de imagens em tempo real de órgãos e de estruturas internas do corpo. No contexto desta disciplina vamos estudar especificamente a utilização de ultrassons na deteção de objetos e medição de distâncias. Qualquer que seja o campo de aplicação, o princípio de funcionamento parte da utilização de ondas mecânicas através de meios acústicos (sólidos ou líquidos) e a receção em condições controladas do sinal refletido/transmitido na forma de um ecograma.

Quando o som se propaga por um meio material, sofre uma atenuação da sua intensidade, quer por transferência de energia da onda para o meio (processos de absorção), quer por espalhamento em pequenas imperfeições. Dependendo do material, um impulso ultrassónico pode ser totalmente absorvido pelo material ou pode passar facilmente com pouca resistência oferecida pelo meio acústico. Esta atenuação é descrita pela lei (equação 2):

$$A = A_0 \exp(-\mu \cdot s)$$

Em que s corresponde à distância percorrida pelo meio acústico e μ ao coeficiente de atenuação do meio.

Ao longo da sua propagação num certo material, o som vai perdendo a sua intensidade seguindo a seguinte lei:

$$I = I_0 \exp(-k \cdot s)$$

2. Objetivos do estudo:

- Compreender e utilizar transdutores piezoelétricos na geração e captação de ondas sonoras;
- Avaliar a atenuação de ultrassons em materiais e avaliar a sua dependência com a frequência acústica;
- Avaliar o poder de resolução, em função da frequência de ultrassons;
- Interpretar a informação de varrimentos “A-Scan” e “B-Scan” ultrassónicos.

3. Material:

- Controlador Echoscope (PHYWE) ligado ao computador do laboratório com o respetivo software PHYWE necessário;
- Sondas ultrassónicas a 1 MHz e 2 MHz;
- Cilindros de acrílico;
- Fantoma de acrílico;
- Craveira;
- Conta gotas com água;
- Toalhas de papel.

4. Métodos Experimentais:

a) Determinação da velocidade de propagação do impulso ultrassônico:

É possível medir a velocidade de propagação da onda sonora num sólido de faces paralelas, acoplado o transdutor numa face, e recolhendo os ecos resultantes da reflexão na face oposta. Sendo s - a distância entre o transdutor e a face-fronteira refletora, t - o tempo que passa desde a emissão do impulso ultrassônico até a sua captação e c - a velocidade de propagação do ultrassom no sólido (equação 3):

$$t = \frac{2s}{c}$$

b) Determinação do coeficiente de atenuação do acrílico:

Fazendo uma simples linearização da equação anterior podemos chegar á expressão do coeficiente de atenuação (equação 4):

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

5. Resultados e análise:

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

- Sonda 1MHz:**

- a) Para começar a nossa experiência, medimos a altura dos três menores cilindros de acrílico disponíveis no laboratório com uma craveira (menor divisão possível de medição = 0,0001m):

Cilindro	Altura (m)	Incerteza da medição (m)
1	0,02	0,00005
2	0,04	0,00005
3	0,08	0,00005

Ligou-se o Echoscope da PHYWE e ajustou-se o valor de TGC (Time Gain Control) para o seu mínimo no âmbito de se poder visualizar o sinal real. O ganho usado para as primeiras medições foi de 3 dB.

Decidiu-se começar a medição do tempo de voo dos impulsos ultrassónicos com o cilindro de 2cm de altura, então colocou-se uma gota de água sob uma das faces planas do cilindro e encostou-se a sonda de 1 MHz.

Experimentaram-se vários métodos de medição do tempo de voo: mediu-se o ponto HF mais alto entre picos e fazendo a diferença de tempo, mediu-se a partir do início dos picos. Conclui-se que o primeiro método é mais eficiente pois por vezes seria complicado determinar o início do impulso refletido devido ao ruído elétrico registado pelo transdutor.

Os transdutores ultrassónicos têm, normalmente, uma camada protetora sobre a superfície ativa. O tempo que a onda sonora demora a percorrer esta camada protetora vai interferir a nossa medição do tempo de voo, ou seja, ia-se manifestar num erro sistemático. Para corrigir este erro ter-se-ia de determinar o tempo que o impulso demora a percorrer essa camada e subtrair esse valor ao valor de tempo obtido experimentalmente. O valor teórico da velocidade do som em acrílico foi retirado do protocolo experimental ($c_{teórico} = 2700 \text{ m/s}$).

Valor teórico do tempo de voo do impulso ultrassónico:

$$t_{teórico} = \frac{2s}{c} = 14,8 \mu\text{s}$$

Valor experimental obtido (medindo o tempo entre o zero e a base do primeiro impulso refletido lido no PHYWE):

$$t_{experimental} = 15 \mu\text{s}$$

Designando o tempo de voo na camada protetora por t_{2L} :

$$t_{2L} = t_{experimental} - t_{teórico} = 0,2 \mu\text{s}$$

Segue-se o gráfico relativo às medições do tempo de voo do impulso ultrassónico em relação à sua distância percorrida no cilindro de acrílico utilizando a sonda de 1MHz:

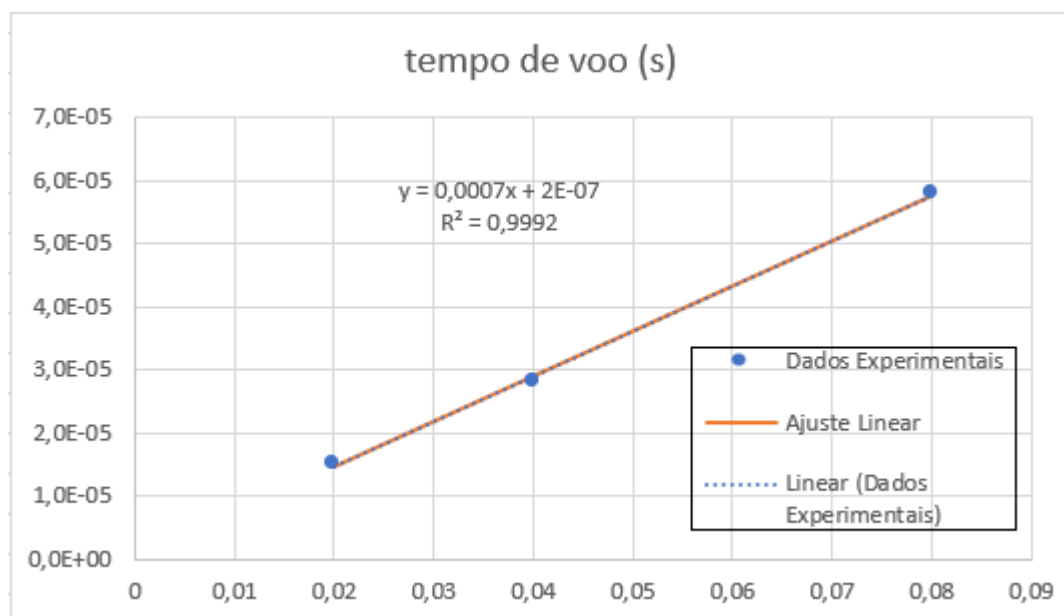


Fig. 1: Gráfico relativo ao tempo de voo em função da distância percorrido pelo ultrassom utilizando a sonda 1.

m	0,00072	2E-07	b
u(m)	2E-05	1E-06	u(b)
r^2	0,99924	8,6E-07	u(y)

Fig. 2: Matriz de ajuste relativa ao gráfico da figura 1

Como o valor do declive do ajuste linear corresponde a $m = 2/c$:

$$c_{experimental} = 2788,84 \text{ m/s}$$

Então:

$$Erro(\%) = \frac{|c_{experimental} - c_{teórico}|}{c_{teórico}} * 100 \approx 3,29\%$$

Cálculo da incerteza:

$$u(c) = \sqrt{\left(\frac{\partial c}{\partial m}\right)^2 u^2(m)} = \frac{4}{m^2} * u(m) \approx 154,31 \text{ m/s}$$

$$\%u(c) = \frac{154,31}{2788,84} * 100 \approx 0,06\%$$



Fig. 3: Resíduos relativos aos resultados obtidos representados no gráfico da figura 1.

Devido ao facto do valor do fator R ser muito próximo de 1 e do gráfico de resíduos apresentar um comportamento aleatório concluiu-se que o método dos mínimos quadrados é uma função de ajuste apropriada para a análise dos resultados obtidos.

- b) Para calcular o coeficiente de atenuação do acrílico mediu-se a evolução da amplitude dos impulsos refletidos ao longo do tempo. Segue-se um gráfico da amplitude da onda de pressão A em função da distância percorrida:

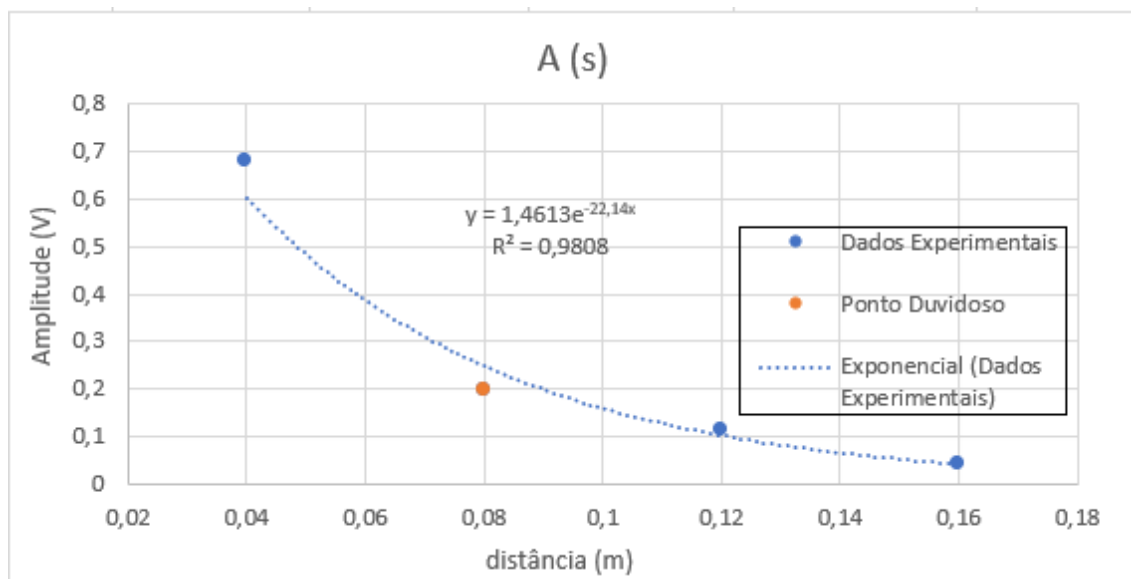


Fig. 4: Gráfico da amplitude do impulso ultrassónico (V) em função da distância percorrida (m) utilizando a sonda 1.

À medida que o ultrassom percorreu o material acrílico devido às reflexões contínuas, a sua amplitude de onda diminuiu como era esperado. Consegue-se observar o comportamento exponencial decrescente da amplitude do som descrito pela equação 2. De acordo com a equação 4, calculando o declive da função $-\ln(A/A_0)$ em função da distância (s) chegamos ao valor do coeficiente de atenuação (μ):

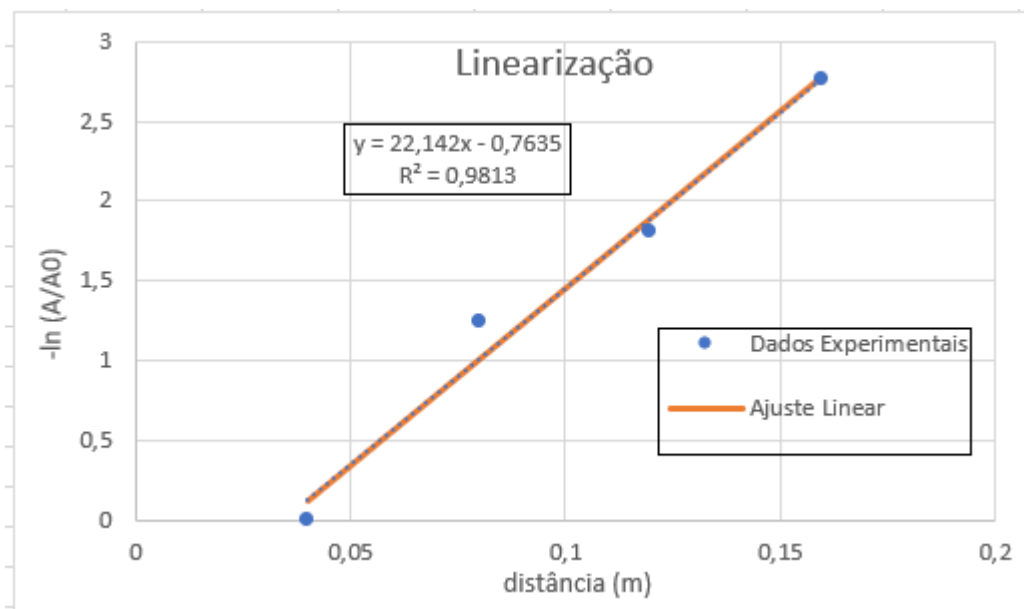


Fig. 5: Gráfico de $-\ln(A/A_0)$ em função da distância (m) utilizando a sonda 1.

m	22,1421	-0,76353	b
sm	2,1617	0,2368	sb
r2	0,98129	0,19335	sy

Fig. 6: Matriz de ajuste relativa ao gráfico da figura 5.

$$\mu_{\text{experimental}} = m = (22,14 \pm 2,16) \text{ cm}^{-1}$$

$$k_{\text{experimental}} = 2 \mu_{\text{experimental}} = (44,28 \pm 4,32) \text{ cm}^{-1}$$

O valor elevado de incerteza deve-se à existência de um ponto (ponto duvidoso) com um grande desvio do comportamento linear que o resto dos pontos apresentam. Má leitura da amplitude do impulso refletido no software, a interferência da medição mexendo na mesa do laboratório podem ser razões pela qual tiramos este ponto duvidoso.

- **Sonda 2MHz:**

- Repetiram-se os mesmos procedimentos utilizando a sonda que emite ondas sonoras com 2 MHz de frequência. Seguem-se as medições feitas do tempo de voo do ultrassom em função da distância percorrida:

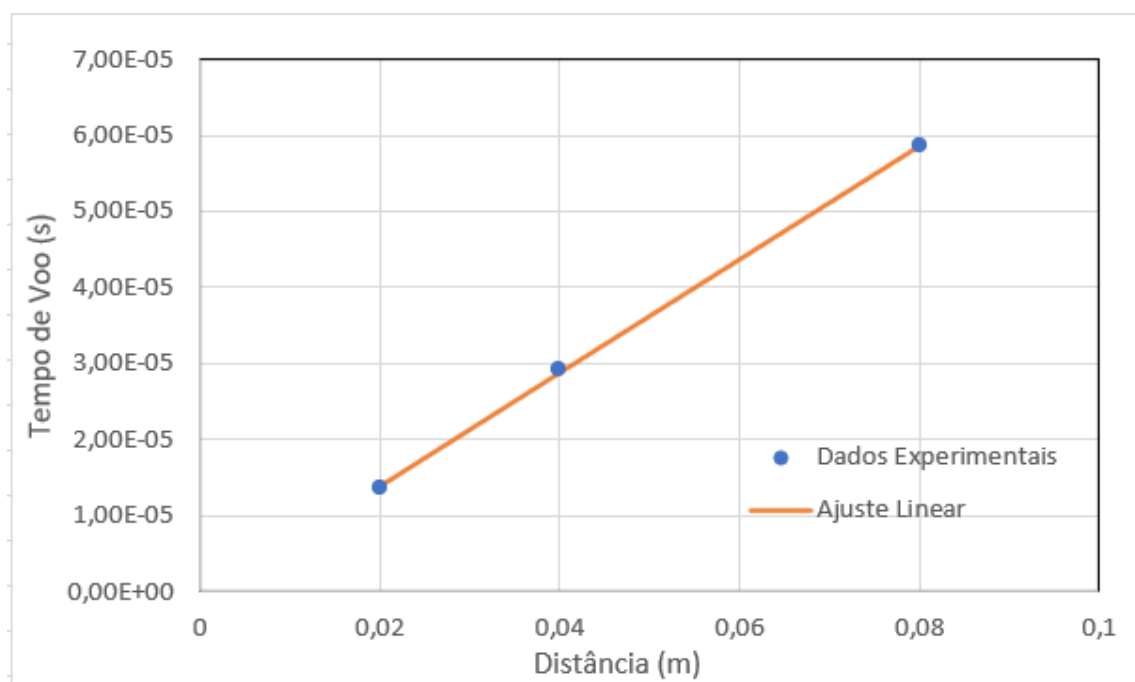


Fig. 7: Gráfico relativo ao tempo de voo em função da distância.

m	0,0007479	-0,0000011	b
u(m)	1,113E-05	5,89188E-07	u(b)
r^2	0,9997784	4,8107E-07	u(y)

Fig. 8: Matriz de ajuste relativa ao gráfico da figura 7.

A partir da matriz de ajuste do gráfico obtemos o valor da velocidade de propagação do som no acrílico:

$$c_{experimental} = \frac{2}{m} \approx 2674,31 \text{ m/s}$$

$$Erro (\%) = \frac{|c_{experimental} - c_{teórico}|}{c_{teórico}} * 100 \approx 1\%$$

Cálculo da incerteza:

$$u(c) = \sqrt{\left(\frac{\partial c}{\partial m}\right)^2 u^2(m)} = \frac{4}{m^2} * u(m) \approx 79,63 \text{ m/s}$$

$$\%u(c) = \frac{79,63}{2700} * 100 \approx 2,95 \%$$

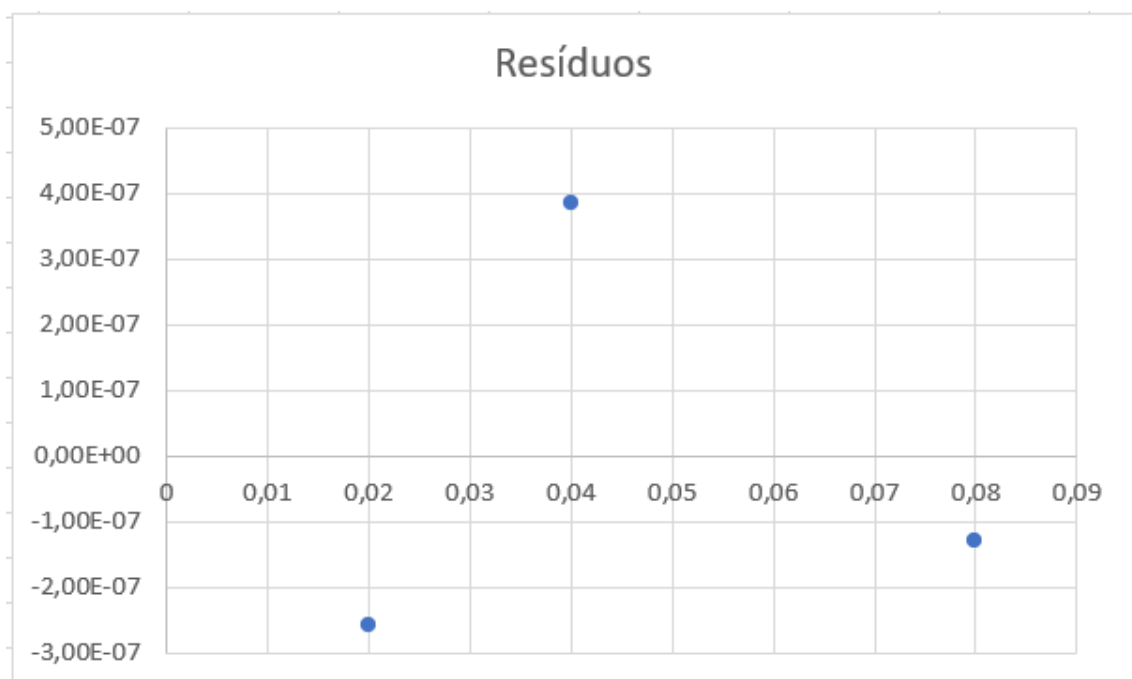


Fig. 9: Gráfico de resíduos relativo à medição do tempo de voo em função da distância.

- b) Repetimos o mesmo processo para o cálculo do coeficiente de atenuação do acrílico. Ajustámos o ganho TGC para 30 dB para conseguirmos distinguir corretamente a pico de amplitude dos impulsos refletidos do ruído elétrico. As medições que se seguem foram feitas usando o cilindro de 2cm de altura.

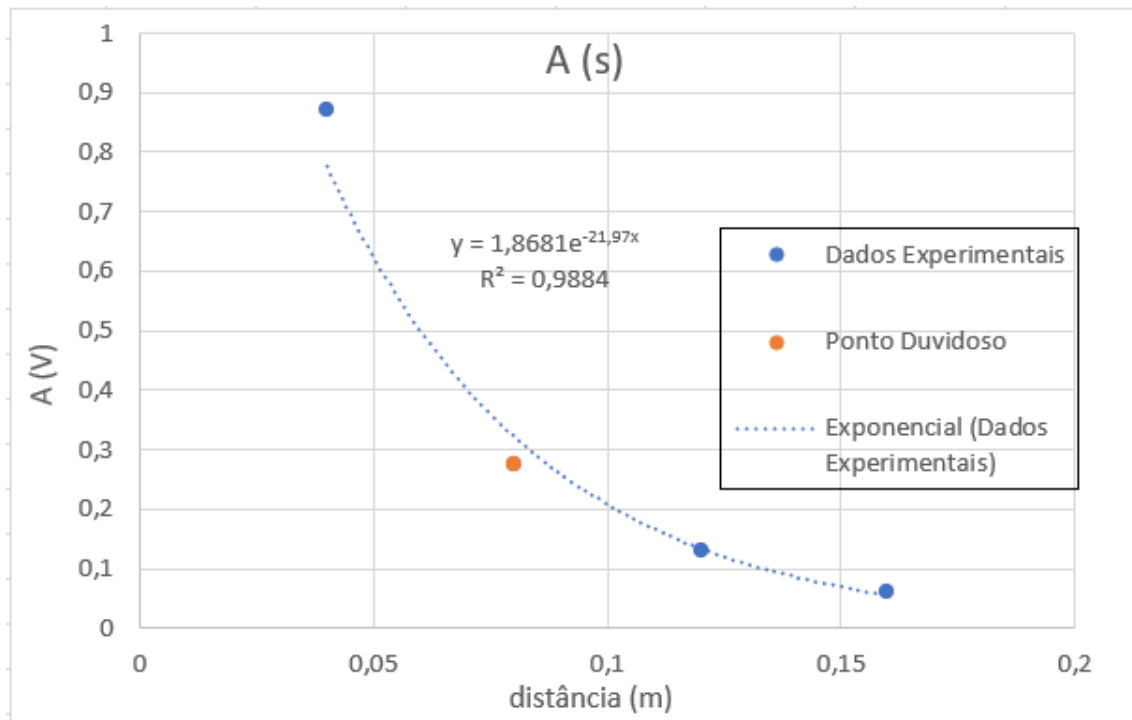


Fig. 10: Gráfico da amplitude do impulso ultrassónico (V) em função da distância percorrida (m) utilizando a sonda 2.

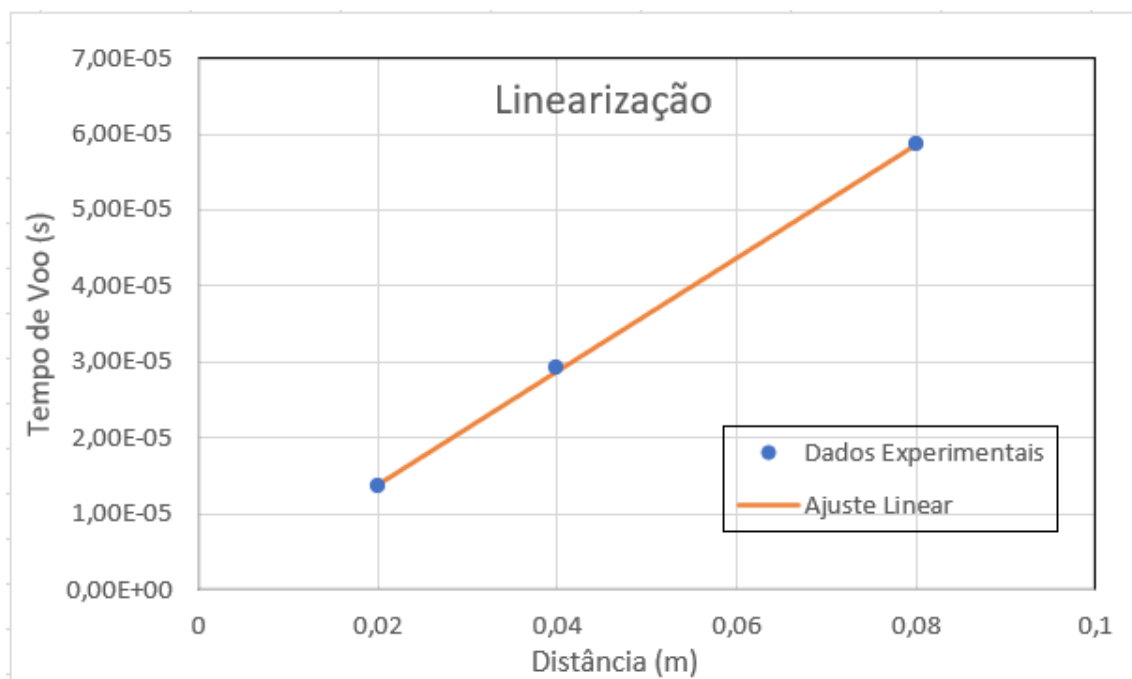


Fig. 11: Gráfico de $-\ln(A/A_0)$ em função da distância (m) utilizando a sonda 2.

m	19,0757	-0,37763	b
u(m)	0,035214	0,004379	u(b)
r^2	0,999997	0,001992	u(y)

Fig. 12: Matriz de ajuste relativamente ao gráfico da fig. 11.

$$\mu_{experimental} = m \approx (19,08 \pm 0,04) \text{ cm}^{-1}$$
$$k_{experimental} = 2 \mu_{experimental} = (38,16 \pm 0,08) \text{ cm}^{-1}$$

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

Durante a execução experimental apenas tivemos tempo para explorar B-scan's analisando os defeitos de um fantoma de acrílico (paralelepípedo de acrílico com defeitos cilíndricos que percorrem o paralelepípedo de uma face lateral à outra):

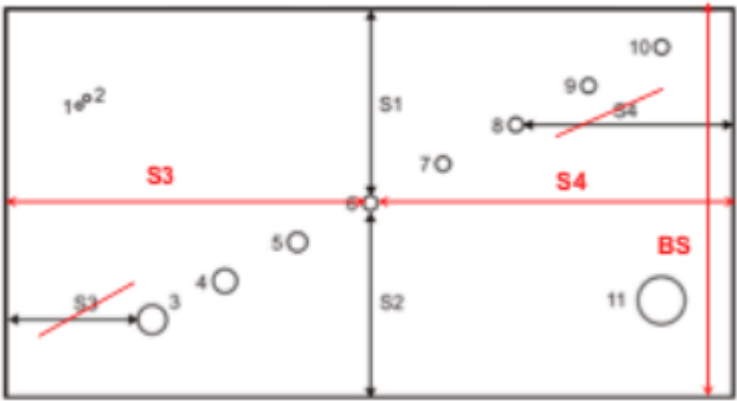


Fig. 13: Fantoma de acrílico na perspectiva da face lateral.

Escolhemos os defeitos 3, 6, 10 do fantoma para estudar a funcionalidade de B-scans. O objetivo seria descobrir a dimensão dos defeitos varrendo a face superior do fantoma com uma sonda emissora de ultrassons e posteriormente analisando o ecograma obtido. Utilizou-se a sonda emissora de sons de 2MHz de frequência e obteve-se o seguinte B-Scan:

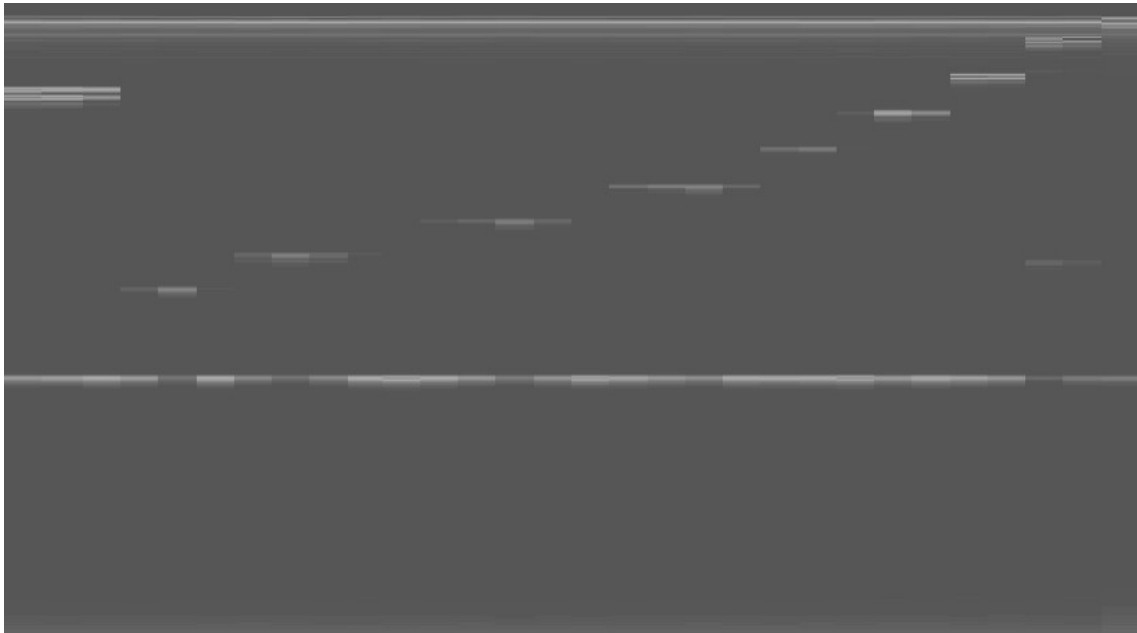


Fig. 14: B-Scan relativo à deteção dos defeitos do paralelepípedo de acrílico.

Ativou-se a cor na imagem e ajustou-se o brilho e contraste de forma a facilitar a visualização do registo dos defeitos do fantoma:

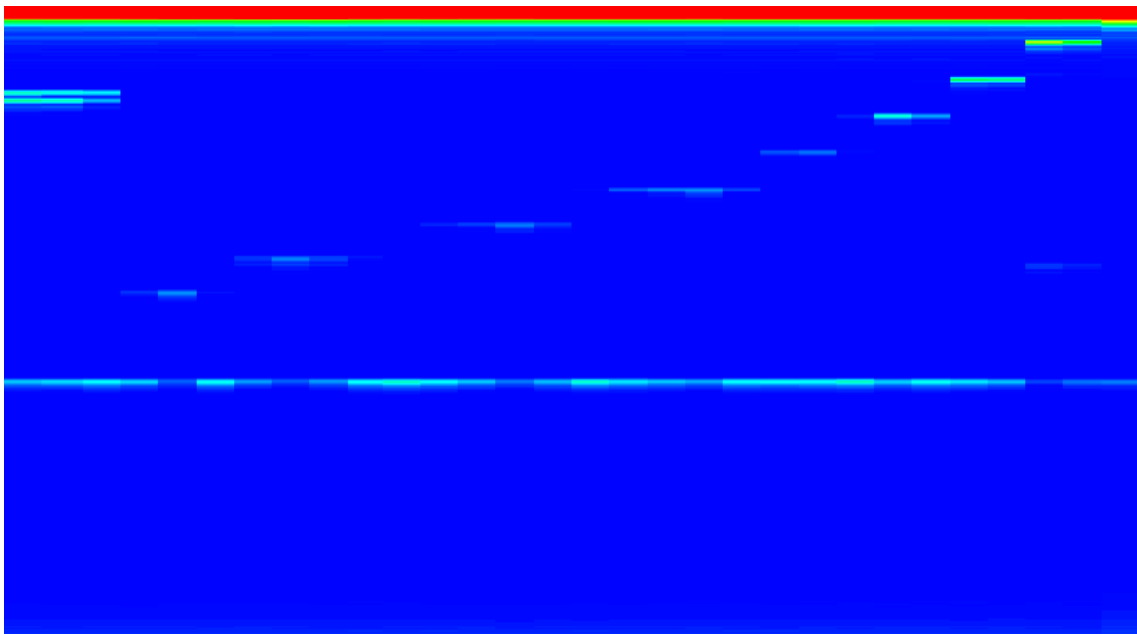


Fig. 15: Imagem da figura 14 a cores.

Os defeitos são visíveis nos ecogramas B-Scan tal como a face inferior do fantoma que se encontra por baixa dos defeitos. A partir da utilização do A-Scan seria possível estudar as dimensões dos defeitos pois saber-se-ia os pontos de profundidade onde o

transdutor leu os picos de tensão. No nosso caso perdemos tempo a mais na primeira parte do trabalho e não foi possível utilizar os A-Scan's para a análise do fantoma.

6. Conclusões

Neste trabalho estudou-se o comportamento de uma onda mecânica em amostras de acrílico e determinamos a sua velocidade para duas diferentes sondas, uma que emite ondas sonoras com frequência 1MHz e outra que emite ondas sonoras com frequência 2MHz. Os resultados obtidos foram os seguintes, $(2788,84 \pm 154,31)$ m/s e $(2674,31 \pm 79,63)$ m/s, respetivamente.

Analisou-se a atenuação logarítmica da onda devido à sua propagação no material acrílico obtendo-se o comportamento previsto. Os valores que caracterizam estas atenuações da onda (coeficiente de atenuação) foram calculados experimentalmente para ambas as sondas disponíveis correspondentes à emissão de ondas sonoras com 1MHz de frequência e 2MHz de frequência. Para a sonda 1MHz: $\mu = (22,14 \pm 2,16)$ cm⁻¹. Para a sonda 2MHz: $\mu = (19,08 \pm 0,04)$ cm⁻¹. Conclui-se que uma onda sonora de maior frequência acústica é mais fortemente atenuada quando esta se propaga no material acrílico.

Os valores do coeficiente de extinção característico do meio de propagação obtidos foram os seguintes: $k = (44,28 \pm 4,32)$ cm⁻¹ para a sonda 1MHz e $k = (38,16 \pm 0,08)$ cm⁻¹.

Conclui-se que o propósito de colocarmos água por cima das faces do paralelepípedo de acrílico antes de executarmos os scans com a sonda é de certificar que a maior parte do impulso sonoro emitido pelo transdutor é transmitido para o paralelepípedo. Sem a água, parte do impulso seria refletido pelo acrílico por incidir neste num ângulo menor do que o ângulo crítico normal à face do paralelepípedo pois a face do paralelepípedo e da sonda não coincidem perfeitamente.

Ficámos familiarizados com o programa PHYWE e a medição de distâncias a partir da propagação de ondas acústicas em meios materiais. Notou-se o potencial em investigação científica deste processo não intrusivo de detetar materiais a partir de uma distância elevada.