

Caracterização de materiais através de ultrassons

Inês Cordeiro Machado

Departamento de Física e Astronomia | FCUP

up201907743@fc.up.pt | Experiência realizada a 27 outubro 2021

Sumário

Neste trabalho explora-se a vasta área de aplicação dos ultrassons, em particular a caracterização de materiais a partir de medidas do tempo de voo das ondas acústicas que neles propagam. Mais concretamente, determina-se o comprimento de 3 cilindros de acrílico, bem como a velocidade de propagação do som no acrílico, a constante de atenuação e o coeficiente de extinção.

Tudo isto através do varrimento “A-scan” ultrassónico com sondas de 1MHz e 2MHz.

Deste modo, obteve-se $l_{cil1_{1MHz}} = 15.58mm$, $l_{cil1_{2MHz}} = 15.44mm$, $l_{cil2_{1MHz}} = 36.49mm$, $l_{cil2_{2MHz}} = 35.94mm$, $l_{cil3_{1MHz}} = 75.29mm$ e $l_{cil3_{2MHz}} = 75.98mm$, determinou-se a velocidade média de propagação do acrílico $\bar{v} = 2733ms^{-1}$. Verificou-se a constante de atenuação, μ_{dB} , e o coeficiente de extinção, k , no cilindro 1 com a sonda de 1MHz $\mu_{dB} = 5dBcm^{-1}$, $k = 10dBcm^{-1}$ e com a sonda de 2MHz $\mu_{dB} = 5.6dBcm^{-1}$, $k = 11.3dBcm^{-1}$. No cilindro 2 com a sonda de 1MHz $\mu_{dB} = 3.4dBcm^{-1}$, $k = 6.7dBcm^{-1}$.

Os erros percentuais obtidos são elevados, pode-se assumir que isso se deve tanto a erros acidentais de leitura e identificação dos picos, como a erros sistemáticos no equipamento.

Por fim, consideram-se os objetivos cumpridos e prevê-se uma boa taxa de reprodutibilidade da experiência.

Introdução

Esta atividade laboratorial, e respetivo relatório, foi realizada no âmbito da unidade curricular Laboratórios de Física III, supervisionada pelo docente João Filipe Horta Belo da Silva, no decorrer do curso Licenciatura em Engenharia Física.

A atividade pretende dar a conhecer o potencial de medição, não invasivo, proporcionado pela propagação de ondas acústicas em meios materiais, a partir do tempo de voo.

Essencialmente o trabalho está subdividido em três partes, isto é a determinação da velocidade de propagação das ondas acústicas no acrílico, do comprimento dos cilindros através das sondas e da constante de atenuação e dos coeficientes de extinção.

Fundamentos teóricos

Sonografia

A sonografia é um ramo da Física com bastante importância devido à sua versatilidade, tanto na área da medicina, através das ecografias, como no teste não destrutivo de materiais. Esta técnica é bastante popular na investigação e no diagnóstico médico por causa da sua natureza não invasiva.

A excitação é feita através de impulsos ultrassónicos que se propagam linearmente através do meio, com duração temporal curta, que sofrem reflexão consoante as descontinuidades do meio.

A relação entre o tempo de voo dos ecos ultrassónicos e a velocidade de propagação das ondas resulta na distância entre o transdutor ultrassónico e a descontinuidade refletora.

Transdutor piezoelétrico

Os impulsos são gerados por um transdutor piezoelétrico. A aplicação de um impulso de tensão elétrica a um material cerâmico piezoelétrico resulta em ondas mecânicas à frequência mecânica de ressonância características do cristal.

O transdutor alterna entre o modo de geração de impulsos e o modo de escuta, isto é, o ciclo de emissão/receção. Este ciclo ocorre à frequência de impulsos gerados, f_{imp} , na ordem dos kHz .

Calibração da escala espacial e determinação da velocidade de propagação

Os transdutores têm uma camada protetora sobre a superfície ativa, esta camada introduz um tempo adicional no tempo total de voo.

Desta forma, para minimizar erros sistemáticos é necessário ter em conta este tempo adicional, t_{2L} , quando se pretende determinar a velocidade de propagação da onda no meio material, isto é, $\Delta t = t - t_{2L}$.

Posto isto, não se utiliza t de forma direta e é necessário obter experimentalmente o valor de t_{2L} , tanto para o transdutor de $1MHz$ como para o de $2MHz$, visto que têm time shifts associados diferentes ($2.6 \times 10^{-6}s$ para a sonda de $1MHz$ e de $2 \times 10^{-6}s$ para a sonda de $2MHz$).

Assim sendo, para determinar a velocidade de propagação utiliza-se a seguinte expressão, já com esta correção em mente,

$$c = \frac{2s}{t - t_{2L}}$$

Esta expressão também pretende eliminar outros erros experimentais, como a saturação do detetor e a difícil identificação do instante inicial de reflexão.

Modo de inspeção US

Existem essencialmente dois modos de inspeção, sendo eles o A-scan e o B-scan.

Para o propósito deste trabalho só se irá utilizar o modo A-scan, no entanto será feita uma breve descrição de ambos os modos.

A-scan

Traduz o vetor de valores de intensidade do eco US. Isto é, ecos detetados em função da profundidade.

Este modo também pode ser identificado como varrimento axial.

B-scan

Imagem representativa de um corte seccional da amostra de teste.

A resolução local na direção do varrimento depende da posição da sonda e da velocidade do movimento de varrimento, controlada pelo utilizador.

Para maior resolução, é necessário dispor de meios automáticos de posicionamento.

Montagem experimental e material

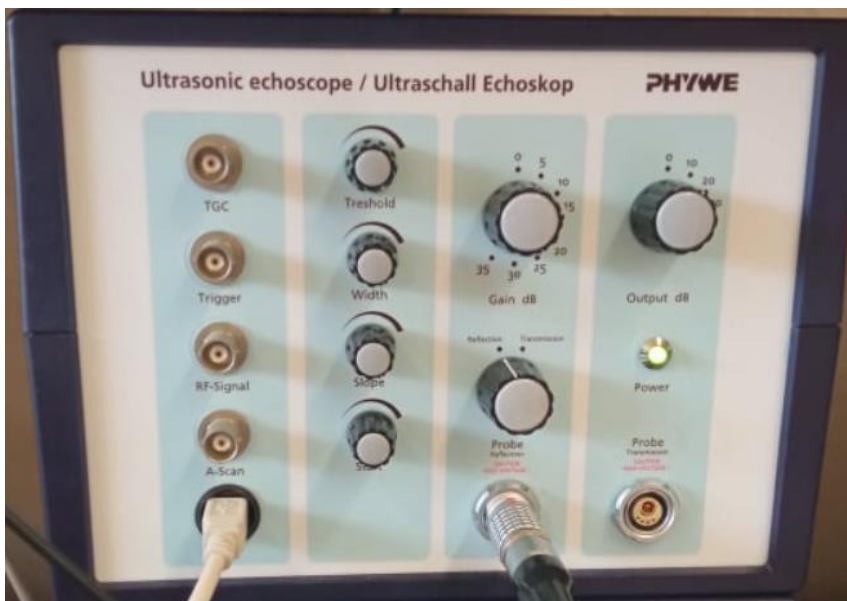
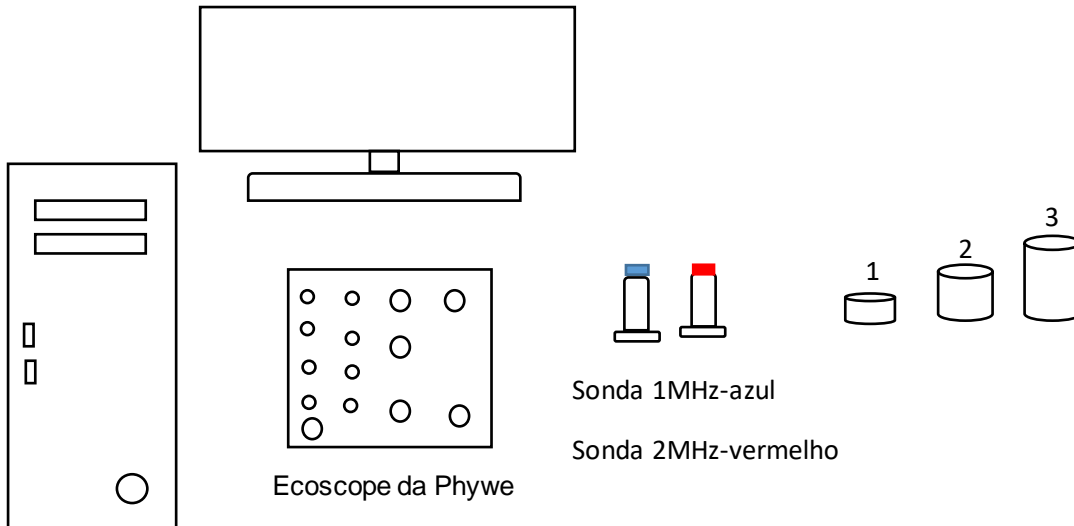


Imagem 1: Ecoscope Phywe.

Equipamento

Conta gotas com água;

Craveira;

Fantoma de acrílico;

Software MeasureUltraEcho (Phywe);

Kit Ecoscópico Phywe:

Dois transdutores de 1MHz, azul e de 2MHz, vermelho;

Controlador Escope Phywe;

Execução experimental

De seguida, apresenta-se um procedimento resumido, uma vez que na secção seguinte as informações necessárias e eventuais detalhes importantes encontram-se assim que for relevante.

Procedimento

Com a craveira medir o comprimento dos 3 cilindros de menor altura;

Verificar que a opção de time shift, para a sonda de $1MHz$ é de $2.6 \times 10^{-6}s$ e de $2 \times 10^{-6}s$ para a sonda de $2MHz$ e que o seletor se encontra em “Reflection”;

Interpretar o sinal acústico obtido e retirar as medidas necessárias para determinar a velocidade de propagação e o tempo de voo, através das posições dos picos lidas pelos cursores;

Ao longo da experiência ter em conta se os valores do ganho, slope e escala são os mais adequados, sempre com cuidado para que não haja saturação do sinal;

Antes de utilizar a sonda deve colocar-se uma gota de água na amostra a estudar a fins de lubrificação e de criação de acoplamento;

Imediatamente após o uso secar sempre a sonda e a amostra de modo a preservar o equipamento.

Análise e discussão de resultados

Determinação da velocidade de propagação

Para cada um dos cilindros foram tiradas 3 medidas do comprimento com a craveira, de seguida calculou-se a média do comprimento para cada um, esse é o valor de s .

	s1(mm)	s2(mm)	s3(mm)	u(mm)	Media-s	u(media-s)
cil1	18,85	18,75	18,9	0,05	18,83	0,03
cil2	40	39,95	40	0,05	39,98	0,03
cil3	80,4	80,4	80,4	0,05	80,40	0,03

Tabela 1: Comprimento de cada cilindro e a média associada.

A incerteza da média foi calculada a partir de $\frac{\sqrt{3s_m^2}}{3}$.

Para cada cilindro, e com ambas as sondas, registaram-se os valores de t e de V , de acordo com os picos observados.

A determinação da velocidade de cada cilindro passa pela elaboração de uma matriz de ajuste linear, tal que $v = \frac{1}{m}$, e cuja incerteza é $u(v) = v \frac{s_m}{m}$.

O valor teórico utilizado durante a experiência foi $2730ms^{-1}$.

O valor de t_{2L} , foi determinado a partir de $b_{aj.lin} - time\ shift$.

Note-se que, pelo facto de em certas medições só ser possível registar 2 ou 3 pontos, há incertezas que não devem ser levadas com confiança. Por essa razão é difícil avaliar a distribuição dos resíduos desses mesmos cilindros.

Transdutor de 1MHz

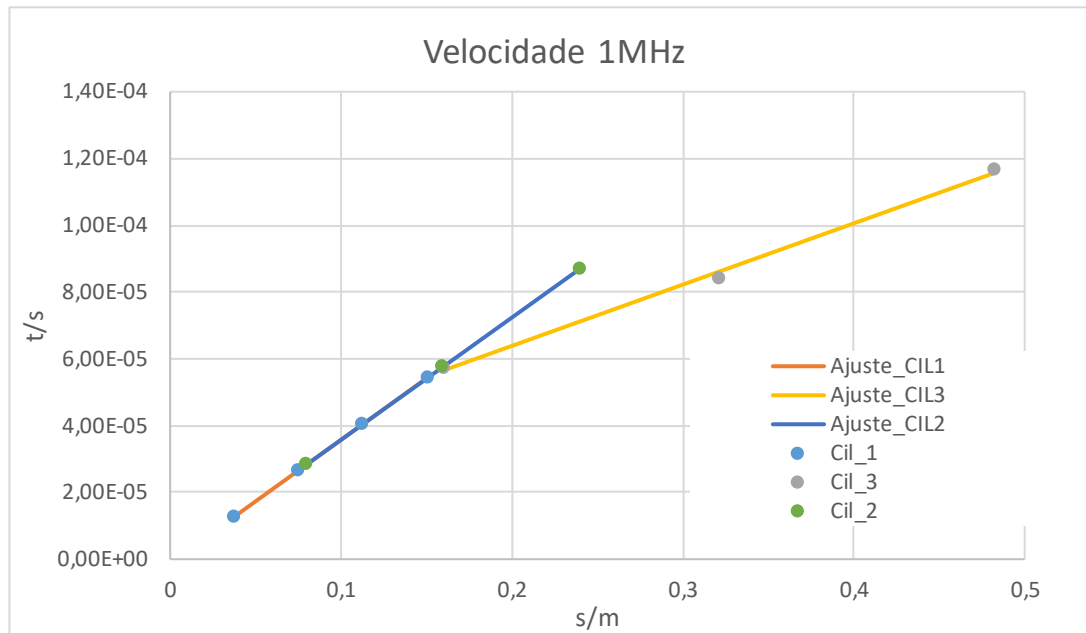


Gráfico 1: Função $t(s)$ e o respetivo ajuste linear para os 3 cilindros, transdutor de 1MHz.

Ajuste linear cil1			
m	0,000368	-1,10E-06	b
sm	0,000001	1E-07	sb
r^2	0,99997	1E-07	sy
Ajuste linear cil2			
m	0,000366	-0,0000009	b
sm	0,00E+00	0,00E+00	sb
r^2	1	0,00E+00	sy
Ajuste linear cil3			
m	0,00018	0,000027	b
sm	0,00001	0,000003	sb
r^2	0,997	2E-06	sy

Tabela 2: Matrizes de ajuste linear para os 3 cilindros, transdutor de 1MHz.

	$v(m/s)$	$u(v)/m/s$	$(\%)u(v)$	$Ep(\%)$	t_{2L}/s
cil1	2714	10	0,4	0,6	1,50E-06
cil2	2729	0	0	0,03	1,70E-06
cil3	5451	288	5	100	-2,46E-05

Tabela 2a: Valores da velocidade obtida em cada cilindro com respetivas incertezas e erro percentual, e valor de t_{2L} .

Os valores obtidos no cilindro 3 são completamente incongruentes, pode-se assumir que nesta parte a experiência foi mal executada, assim, este cilindro para a sonda de 1MHz foi excluído da análise.

Transdutor de 2MHz

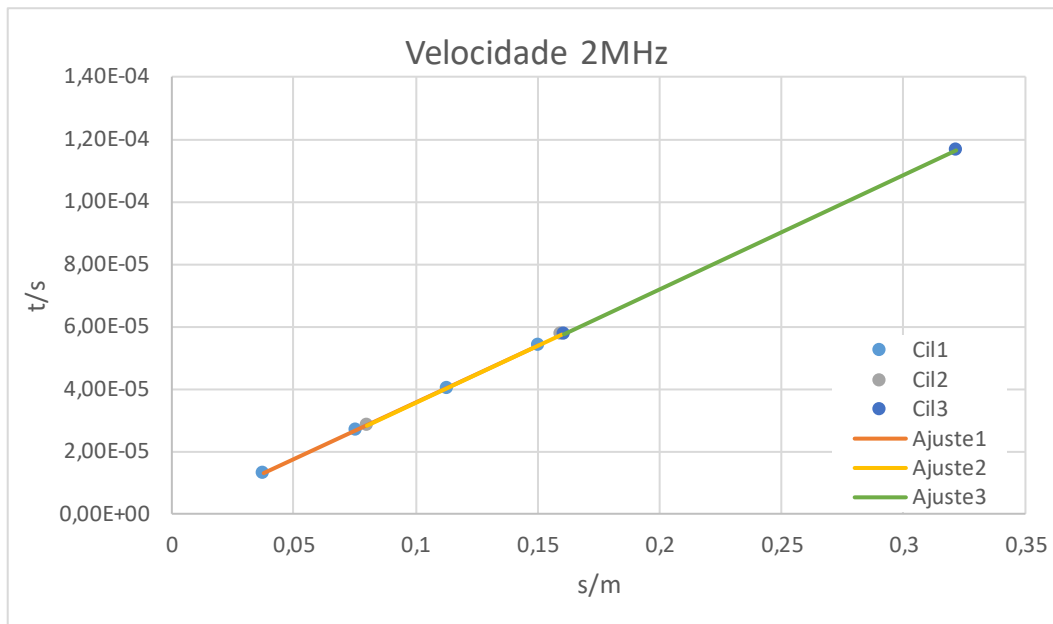


Gráfico 2: Função $t(s)$ e o respectivo ajuste linear para os 3 cilindros, transdutor de 2MHz .

Ajuste linear cil1			
m	0,000363	-0,0000007	b
sm	1E-06	0,0000001	sb
r^2	0,99998	1,07238E-07	sy
Ajuste linear cil2			
m	0,000365	-0,000001	b
sm	0,00E+00	0,00E+00	sb
r^2	1	0	sy
Ajuste linear cil3			
m	0,000366	-0,000001	b
sm	0,00E+00	0,00E+00	sb
r^2	1	0	sy

Tabela 3: Matrizes de ajuste linear para os 3 cilindros, transdutor de 2MHz .

	v(m/s)	u(v)/m/s	(%)u(v)	Ep(%)	t _{2L} /s
cil1	2755	10	0,4	1,0	1,35E-06
cil2	2739	0	0	0,3	1,00E-06
cil3	2730	0	0	0,002	6,00E-07

Tabela 3a: Valores da velocidade obtida em cada cilindro com respectivas incertezas e erro percentual, e valor de t_{2L} .

Posto isto, já se pode determinar a velocidade média de propagação do acrílico.

	v(m/s)	u(m/s)	(%)u	Ep(%)
velocidade	2733	3	0,1	0,001

Tabela 4: Velocidade média de propagação com respetivas incertezas e erro percentual.

A incerteza da velocidade foi calculada a partir de
$$\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^2 u(v_{n1MHz})^2 + \sum_{n=1}^3 u(v_{n2MHz})^2}{5}}$$
.

Verifica-se que a sonda de 1MHz permite obter valores mais precisos.

Este valor da velocidade seria o que deveria ser utilizado no resto da experiência, no entanto na altura não foi possível determiná-lo, isto poderá explicar erros futuros.

Determinação da constante de atenuação e do coeficiente de extinção

A amplitude da onda de pressão é dada através da expressão

$$A = A_0 e^{-\mu s}$$

Tal que μ é a constante de atenuação.

Para determinar esta constante elabora-se um ajuste linear da função $\log(A) = -\mu s$, desta forma, $\mu = -m$.

Para que $[\mu] = dBcm^{-1}$, assegura-se que $[s] = cm$ e que tem de ser feita a conversão $\mu_{dB} = 40 \log(e) \mu_{ajuste}$. A incerteza é $u(\mu_{dB}) = 40 \log(e) s_m$.

Uma vez calculada a constante de atenuação, μ_{dB} , o coeficiente de extinção é $k = 2\mu_{dB}$.

	$\mu_{dB}/dBcm^{-1}$	$u(\mu_{dB})/dBcm^{-1}$	(%) $u(\mu_{dB})$	k/Dcm^{-1}	$u(k)/Dcm^{-1}$	(%) $u(k)$
Cil_1						
Sonda 1MHz	5,1	0,3	6	10	1	6
Sonda 2MHz	5,6	0,3	6	11,3	0,7	6
Cil_2						
Sonda 1MHz	3,4	0,3	8	6,7	0,5	8

Tabela 5: Valores de μ_{dB} e k obtidos e respetivas incertezas.

Verifica-se que, para o mesmo cilindro, um aumento da frequência da sonda traduz-se num aumento da constante de atenuação e, por conseguinte, um aumento do coeficiente de extinção.

Pela tabela nota-se que apenas foi possível analisar-se de forma completa o cilindro 1, isto porque para cilindros maiores torna-se mais evidente que uma maior frequência do transdutor

resulta numa maior absorção pelo cilindro, desta forma é mais difícil identificar os picos no software.

Determinação do comprimento do cilindro

Foi elaborado um gráfico da função $HF(s)$ para todos os cilindros com ambas as sondas.

O valor correspondente ao comprimento do cilindro corresponde ao valor se s , em mm , do primeiro pico definido, através dos cursores.

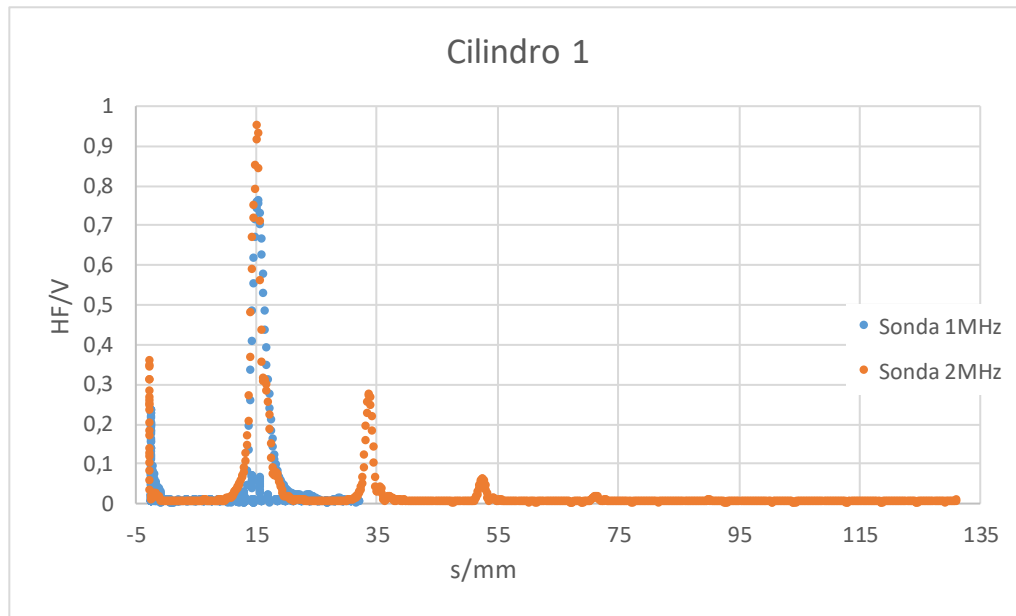


Gráfico 3a: Representação gráfica da função $HF(s)$ para cilindro 1 com ambos os transdutores.

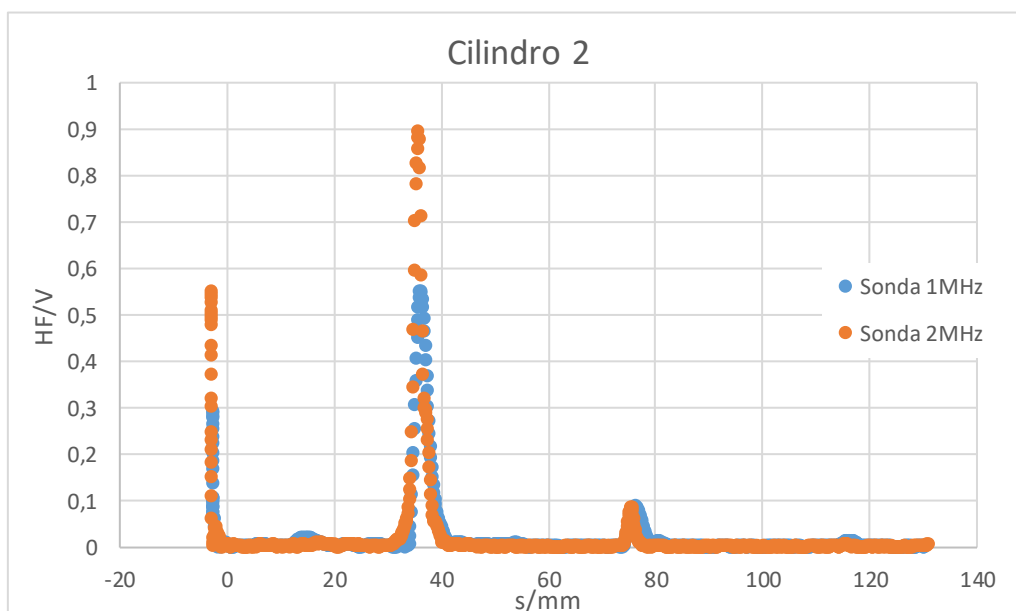


Gráfico 3b: Representação gráfica da função $HF(s)$ para o cilindro 2 com ambos os transdutores.

O valor esperado do comprimento corresponde ao valor de comprimento médio calculado anteriormente para cada cilindro.

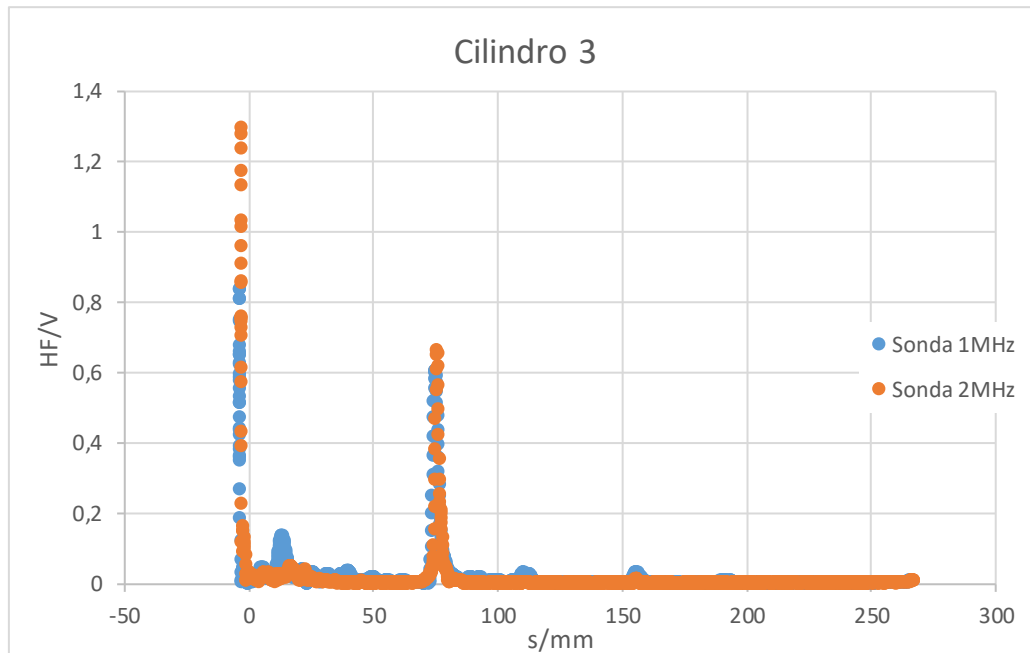


Gráfico 3b: Representação gráfica da função $HF(s)$ para o cilindro 2 com ambos os transdutores.

	l esperado/mm	l obtido/mm	Ep/%
Cil1_1MHz	18,83	15,5781	17
Cil1_2MHz		15,4414	18
Cil2_1MHz	39,98	36,4855	9
Cil2_2MHz		35,9389	10
Cil3_1MHz	80,40	75,2941	6
Cil3_2MHz		75,9774	6

Tabela 6: Valor do comprimento obtido e respetivo erro percentual.

Verifica-se que este método não é o mais indicado para determinar o comprimento dos cilindros devido ao elevado erro percentual obtido. No entanto, pode-se dizer que, para cilindros de maiores dimensões este método de medição até pode ser considerado, uma vez que o erro percentual diminuiu à medida que o comprimento do cilindro é maior.

Conclusão

Resultados obtidos sumariados

	v(m/s)	u(v)/m/s	(%)u(v)	Ep(%)	t2L/s			
cil1_1MHz	2714	10	0,4	0,6	1,50E-06			
cil2_1MHz	2729	0	0	0,03	1,70E-06			
cil3_1MHz	5451	288	5	100	-2,46E-05			
	v(m/s)	u(v)/m/s	(%)u(v)	Ep(%)	t2L/s			
cil1_2MHz	2755	10	0,4	1,0	1,35E-06			
cil2_2MHz	2739	0	0	0,3	1,00E-06			
cil3_2MHz	2730	0	0	0,002	6,00E-07			
	v(m/s)	u(m/s)	(%)u		Ep(%)			
velocidade	2733	3	0,1		0,001			
	μ_dB/dBcm^-1	u(μ_dB)/dBcm^-1	(%)u(μ_dB)			kdBcm^-1	u(k)dBcm^-1	(%)u(k)
Cil_1								
Sonda 1MHz	5,1	0,3	6			10	1	6
Sonda 2MHz	5,6	0,3	6			11,3	0,7	6
Cil_2								
Sonda 1MHz	3,4	0,3	8			6,7	0,5	8
	l esperado/mm	l obtido/mm		Ep/%				
Cil1_1MHz	18,83	15,5781		17				
Cil1_2MHz		15,4414		18				
Cil2_1MHz	39,98	36,4855		9				
Cil2_2MHz		35,9389		10				
Cil3_1MHz	80,40	75,2941		6				
Cil3_2MHz		75,9774		6				

Tabela 7: Tabela com todos os resultados obtidos na experiência.

Neste trabalho verificou-se que através de ultrassons, e de tempos de voo, é possível determinar várias características de um dado material.

Determinou-se, com bastante qualidade, a velocidade de propagação das ondas acústicas no acrílico.

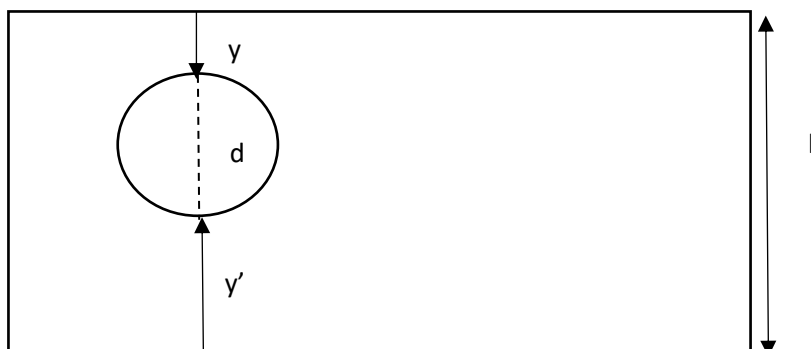
Generalizou-se que, para determinar o comprimento dos cilindros, este método revela-se mais frutífero para cilindros com maiores comprimentos. No entanto, para cilindros mais pequenos, mesmo com erros percentuais elevados, recomenda-se a utilização do transdutor de 1MHz.

Não se realizou a parte relativa ao varrimento “B-scan” ultrassónico, no entanto, pode-se prever que a imagem terá maior resolução na sonda de 2MHz, pois, como se verifica no cilindro 1, a constante de atenuação aumenta com a frequência, revelando que uma maior frequência da sonda implica uma maior absorção pelo cilindro.

Anexos

Anotação relativa ao fantoma de acrílico

No protocolo da atividade é sugerida a determinação do diâmetro dos defeitos do fantoma. Uma vez que não foi possível recolher dados adequados para fazer uma análise correta, vai ser apenas deixada uma sugestão de um procedimento.



Esta figura representa apenas um defeito no fantoma, de diâmetro l .

Escolhe-se uma sonda e coloca-se a mesma de modo a determinar y , com o cursor no primeiro pico.

De seguida, vira-se o fantoma ao contrário tal que a sonda consiga determinar y' , novamente com o cursor no primeiro pico.

O diâmetro será então dado pela expressão $d = l - (\frac{y'}{2} + \frac{y}{2})$, a divisão por 2 justifica-se porque o que é lido pela sonda é a “viagem de ida e de volta”.

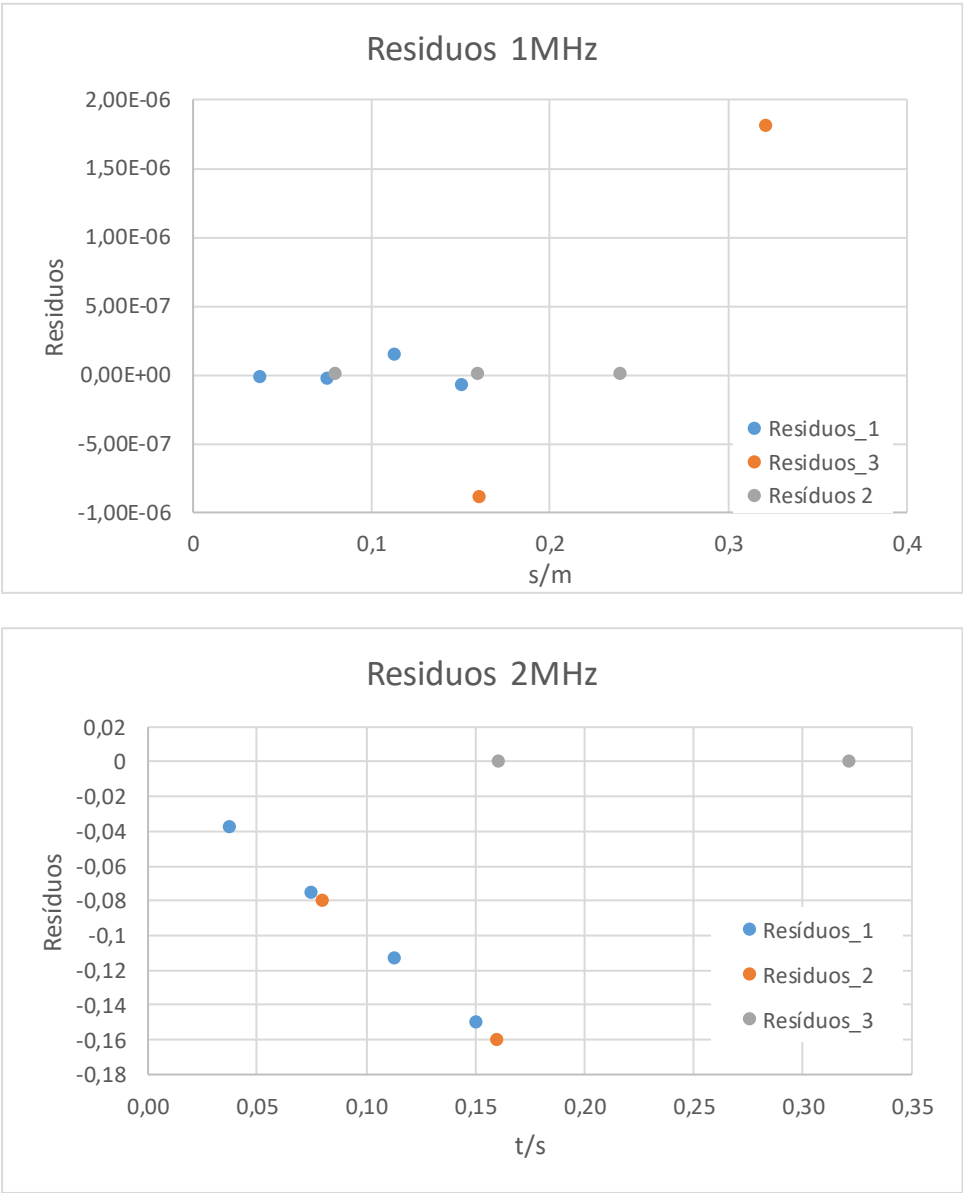
Gráficos e tabelas

Cilindro 1						
t(micros)	t(s)	V(V)+-0.001		Ajuste	Residuos	
12,8	1,28E-05	0,767	0,037666667	0,00001	-0,00000002	
26,7	2,67E-05	0,237	0,075333333	0,00003	-0,00000004	
40,4	4,04E-05	0,069	0,113	0,00004	0,00000014	
54,5	5,45E-05	0,03	0,150666667	0,00005	-0,00000008	
Cilindro 2						
t(micros)	t(s)	V(V)+-0.001		Ajuste	Resíduo	
28,4	2,84E-05	0,578	0,079966667	0,0000284	0,0000000	
57,7	5,77E-05	0,099	0,159933333	0,0000577	0,0000000	
87	0,000087	0,026	0,2399	0,0000870	0,0000000	
Cilindro 3						
t(micros)	t(s)	V(V)+-0.001		Ajuste	Residuos	
57,6	0,0000576	0,608	0,1608	0,0000567	-9E-07	
84,4	0,0000844	0,03	0,3216	0,0000862	1,8E-06	
116,6	0,0001166	0,039	0,4824	0,0001157	-9E-07	

Tabela 8: Dados utilizados para a determinação da velocidade, sonda de 1MHz.

Cilindro 1					
t(micros)	t(s)	V(V)+-0.001		Ajuste	Resíduos
13,1	1,31E-05	0,948	0,037666667	1,3E-05	-0,037653647
26,6	2,66E-05	0,28	0,075333333	2,67E-05	-0,075306643
40,3	4,03E-05	0,065	0,113	4,04E-05	-0,11295964
54,1	5,41E-05	0,026	0,150666667	5,4E-05	-0,150612637
Cilindro 2					
t(micros)	t(s)	V(V)+-0.001		Ajuste	Resíduos
28,2	2,82E-05	0,892	0,079966667	0,0000282	-0,079938
57,4	5,74E-05	0,086	0,159933333	0,0000574	-0,159876
Cilindro 3					
t(micros)	t(s)	V(V)+-0.001		Ajuste	Resíduos
57,5	0,0000575	0,668	0,1608	0,0000575	-0,16074
116,4	0,0001164	0,022	0,3216	0,0001164	-0,32148

Tabela 9: Dados utilizados para a determinação da velocidade, sonda de 2MHz.



Gráficos 4a e 4b: Resíduos do ajuste linear-determinação da velocidade.

cil 1 1mhz					
V/V	log(V)	s/m	s/cm	Ajuste	Resíduos
0,767	-0,26527	0,037667	3,766667	-1,09578	-0,83051371
0,237	-1,4397	0,075333	7,533333	-2,19156	-0,75186924
0,069	-2,67365	0,113	11,3	-3,28735	-0,61369779
0,03	-3,50656	0,150667	15,06667	-4,38313	-0,87657086
cil 1 2mhz					
V/V	log(V)	s/m	s/cm	Ajuste	Resíduos
0,948	-0,0534	0,037667	3,766667	-0,08997	-0,03657109
0,28	-1,27297	0,075333	7,533333	-1,31489	-0,04192381
0,065	-2,73337	0,113	11,3	-2,53981	0,193560897
0,026	-3,64966	0,150667	15,06667	-3,76472	-0,11506599
cil 2 1mhz					
V/V	log(V)	s/m	s/cm	Ajuste	Resíduos
0,578	-0,54818	0,079967	7,996667	-1,46557	-0,91738379
0,099	-2,31264	0,159933	15,99333	-4,06608	-1,75344072
0,026	-3,64966	0,2399	23,99	-6,66659	-3,01692836

Tabela 10: Dados utilizados para a determinação da constante de atenuação e coeficiente de extinção.

Ajuste linear cil1_1MHz			
m	-0,29	0,8	b
sm	0,02	0,2	sb
r^2	0,993	0,1	sy
Ajuste linear cil1_2MHz			
m	-0,33	1,1	b
sm	0,02	0,2	sb
r^2	0,993	0,2	sy
Ajuste linear cil2_1MHz			
m	-0,19	0,9	b
sm	0,02	0,3	sb
r^2	0,994	0,2	sy

Tabela 11: Respetivas matrizes de ajuste dos dados da tabela anterior.