

Caracterização de materiais através de ultrassons

Catarina Sofia Gomes da Silva Pereira
Turma PL6 - Grupo 6
Departamento de Física e Astronomia
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Portugal

10 de Novembro de 2021

Resumo

Este trabalho teve como um dos principais objetivos determinar a velocidade do som no acrílico, tendo-se obtido $v_{acrílico} = (2,71 \pm 0,04) \text{ mm } \mu\text{s}^{-1}$ com uma incerteza relativa de 1,5%. Também se determinou o tempo de atraso da sonda de 1 MHz usada, tendo-se obtido $t_{atraso} = (0,7 \pm 0,2) \mu\text{s}^{-1}$ com 29% de incerteza relativa percentual. Determinaram-se os coeficientes de atenuação dos cilindros 2 e 3 em relação ao cilindro 1, mas a abordagem não deve ter sido a mais correta uma vez que não obtivemos valores concordantes. Também se realizaram varrimentos a partir de *A-scans* e *B-scans* a partir dos quais se concluiu que a sonda de 2 MHz tem um maior poder de resolução e um menor poder de penetração que a sonda de 1 MHz.

1 Introdução

1.1 Objetivos

- Determinar a velocidade do som no acrílico e dos tempos de atraso dos transdutores;
- Avaliar a atenuação de ultrassons no acrílico, em função da frequência acústica;
- Realizar varrimentos a partir de *A-scans* e *B-scans* e interpretá-los;
- Comparar o poder de resolução dos transdutores com diferentes frequências ultra-sónicas (1 MHz e 2 MHz);
- Manusear e conhecer o funcionamento do controlador *Ultrasonics echoscope* PHYWE e do seu *Software MeasureUltraEcho*.

1.2 Introdução Teórica [1]

Designa-se por ultrassom ao fenómeno ondulatório elástico, de frequência superior ao limite dos sons audíveis (mais de 20 000 Hz), com aplicação importante em diversos ramos científicos tais como na medicina e na investigação das propriedades físicas dos materiais. A sonografia serve-se das reflexões produzidas pelos ultrassons quando estes encontram descontinuidades no meio onde se propagam, e regista-as na forma de um ecograma.

As ondas acústicas quando em interação com o meio onde se propagam sofrem perdas de energia, quer por processos de absorção, quer por espalhamento em pequenas imperfeições. Assim, a amplitude da onda de pressão A vai-se atenuando ao longo da propagação, sendo descrita por:

$$A = A_0 \exp(-\mu \cdot s) \quad (1)$$

onde s é o caminho no meio acústico e μ é a constante de atenuação, esta última dependente tanto do meio como da frequência ultra-sônica. Em termos de energia, a atenuação da intensidade da onda, $I = \langle A^2 \rangle_t$, também segue uma lei exponencial:

$$I = I_0 \exp(-k.s) \quad (2)$$

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

1.2.1 Funcionamento de um transdutor piezoelétrico

Um transdutor piezoelétrico como o representado na figura 1 é constituído por um cristal no qual é aplicado um impulso de tensão que faz com que este gere ondas mecânicas à sua frequência mecânica de ressonância característica, a esta frequência chamaremos frequência ultra-sônica f_{US} .

Após a emissão de um impulso ultra-sónico o transdutor comuta para modo de escuta. Neste intervalo de tempo as ondas de pressão refletidas são detetadas pelo cristal gerando um sinal de tensão elétrica, posteriormente processado pela eletrónica dedicada. Passado o tempo de escuta, o transdutor volta a emitir um novo impulso ultra-sónico, repetindo-se o ciclo emissão/receção com uma periodicidade inversa à frequência de impulsos gerados f_{imp} .

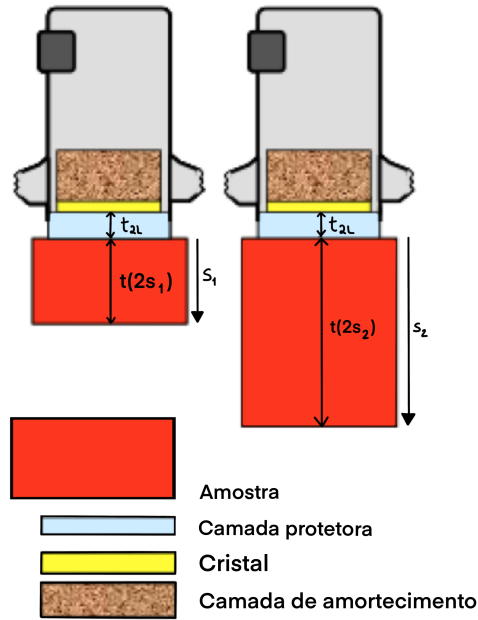


Figura 1: Esquema representativo do transdutor piezoelétrico

1.2.2 Medidas relacionadas com o tempo de voo

Consideremos uma amostra sólida cilíndrica de altura h . A velocidade de propagação de uma onda sonora neste sólido é dada por:

$$c = \frac{2s}{t} \quad (3)$$

onde s é a distância entre o transdutor e a face-fronteira refletora do sólido em análise e t é o tempo de voo de um impulso ultra-sónico.

Nos instantes iniciais de detecção de sinal, pode captar-se sinal de reflexões na interface de acoplamento do transdutor com a amostra material, sinal este que tende a saturar o detetor (potência da onda ultra-sónica é máxima) e, portanto, não tem utilidade introduzindo apenas um erro experimental. Assim, de modo a eliminar esse erro é necessário determinar a velocidade sem que esta dependa das medidas da fase de acoplamento, consideramos:

$$c = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

onde t_1 e t_2 são os tempos correspondentes a reflexões conhecidas geradas para diferentes distâncias percorridas pela onda, s_1 e s_2 . Considerando, por exemplo, para t_1 e t_2 os instantes de receção dos ecos provenientes das primeira e segunda reflexões, respetivamente, tem-se que $s_2 - s_1 = 2h$.

Contudo, o tempo de voo t que o sistema contabiliza é dado não só pelo tempo relativo à propagação na amostra $\frac{2s}{c}$, mas também pela contruibuição do tempo de voo característico da camada protetora presente no transdutor usado, t_{2L} :

$$t = t_{2L} + \frac{2s}{c} \quad (5)$$

1.2.3 Modos de inspeção de amostras com ultrassons

A partir dos ecos medidos e dos tempos de voo, conseguimos inferir a velocidade de propagação do som num meio material e os tempos de atraso característicos das sondas utilizadas - as suas determinações foram deduzidas na secção anterior.

Tendo estas medidas podemos agora observar os mesmos ecos em função da profundidade através de uma simples conversão: passamos a ter os famosos **A-Scans** que consistem basicamente na visualização da intensidade dos ecos em função da profundidade. Estas intensidades podem ser alteradas através da amplificação do ganho de modo a permitir uma melhor visualização de certas profundidades. A distância do piezoelétrico ao obstáculo que pretendemos medir corresponde, no sonograma, a um impulso na profundidade correspondente a essa distância.

Os **B-Scans** são formados através de uma junção de múltiplos *A-Scans* obtidos de um modo sequencial através de um movimento regular do transdutor, sempre na mesma direção. Com base nos valores desta rede podemos construir uma imagem com uma escala de cinzentos ou de cores que vai representar um corte seccional da amostra à qual estamos a realizar o sonograma.

2 Método Experimental

A montagem experimental usada é relativamente simples, sendo constituída pelos seguintes itens, com enumeração correspondente na figura 2:

1. Controlador *Ultrasonics echoscope* PHYWE onde se conseguia configurar a potência de emissão ultra-sónica (**Output dB**) e o ganho fixo (**Gain dB**). Também se usaram os quatro botões de ajuste do ganho dinâmico *TGC (Time Gain Control)* de modo a configurar este como pretendíamos ao longo da janela de eco:
 - **Threshold**: valor inicial de ganho, no tempo de eco Start;
 - **Width**: largura temporal da janela de ganho;
 - **Slope**: inclinação da curva de ganho;
 - **Start**: tempo de eco a partir do qual aplica-se o ganho dinâmico.
2. Sonda ultra-sónica a 1MHz (azul);
3. Sonda ultra-sónica a 1MHz (vermelha);
4. Cilindros de acrílico de cerca de 4 centímetros de diâmetro e diferentes alturas (2, 4, 8 cm);

5. Bloco paralelepipedico, estruturado;
6. Toalhas de papel colocadas sob os fantasmas de modo a impedir que a água que caia da superfície onde estão acoplados os transdutores interfira com a medições na face-fronteira refletora - se houvesse água entre a mesa e o cilindro poderíamos observar além das reflexões na base inferior do cilindro, reflexões na superfície da mesa, que nos poderiam induzir em erro.

Também se usou uma craveira e um micrómetro para medir as alturas dos cilindros.

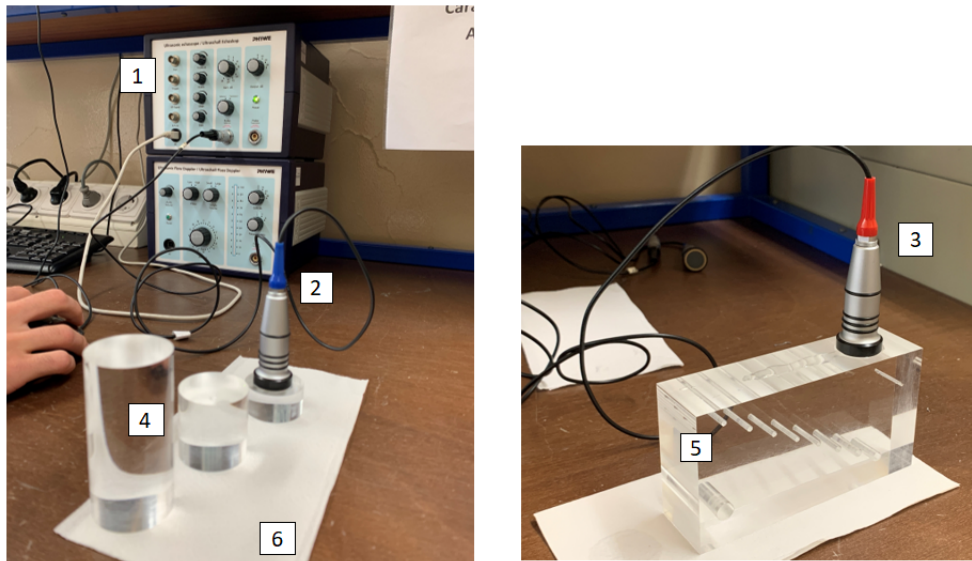


Figura 2: Material usado no trabalho experimental

Numa primeira parte acoplou-se uma das sondas ultra-sónicas aos diferentes cilindros e guardou-se os sonogramas de cada um de modo a medir o período, a largura a meia altura dos impulsos e as restantes medidas necessárias ao cálculo da velocidade do som no acrílico, do tempo de atraso da sonda e do coeficiente de atenuação do acrílico. Repetiu-se estas medições para a outra sonda. Sempre que tínhamos dificuldade a visualizar os impulsos refletidos ajustávamos o ganho fixo e o dinâmico às nossas necessidades, registando-os sempre.

Na segunda parte do trabalho, com os valores calculados a "bruto" para a velocidade e o tempo de atraso, realizaram-se medidas em *A-scan* para várias estruturas do fantoma paralelepipedico, para ambas as sondas. Reconfigurando o *Software* para "B-Mode", realizou-se medidas em *B-scan* também para ambas as sondas, movendo-as de forma estável e controlada de um extremo ao outro do bloco.

3 Análise de Dados

3.1 Propriedades acústicas do cilindro

As alturas de cada cilindro encontram-se registadas na tabela 1.

3.1.1 Período e largura da onda ultra-sónica

Ao longo da primeira parte do trabalho fomos registado estimativas das várias medidas características dos sinais, contudo neste relatório apenas iremos apresentar os valores retirados da posterior análise dos sonogramas obtidos a partir da análise em *Jupiter* dos dados guardados.

	Alturas
h_1	$(18,77 \pm 0,01) \text{ mm}$
h_2	$(40,00 \pm 0,05) \text{ mm}$
h_3	$(80,45 \pm 0,05) \text{ mm}$

Tabela 1: Alturas dos três cilindros usados no trabalho experimental

O gráfico da figura 3 representa o sonograma obtido para o cilindro 1 (de menor altura) quando a sonda azul (1 MHz) está acoplada a este. O primeiro impulso de todos, visualizado neste gráfico corresponde a reflexões na interface de acoplamento do transdutor com o cilindro, sinal este que tende a saturar o detetor e é de difícil identificação tanto da forma como do instante inicial de reflexão. Da observação do gráfico também conseguimos notar que há um alargamento dos impulsos ao longo do tempo - difusão sonora - isto é, o período vai aumentando significativamente. Por estes motivos, considerou-se o primeiro impulso refletido para determinação destas medidas do sinal. O sinal do primeiro impulso encontra-se representado em mais detalhe no gráfico da figura 4.

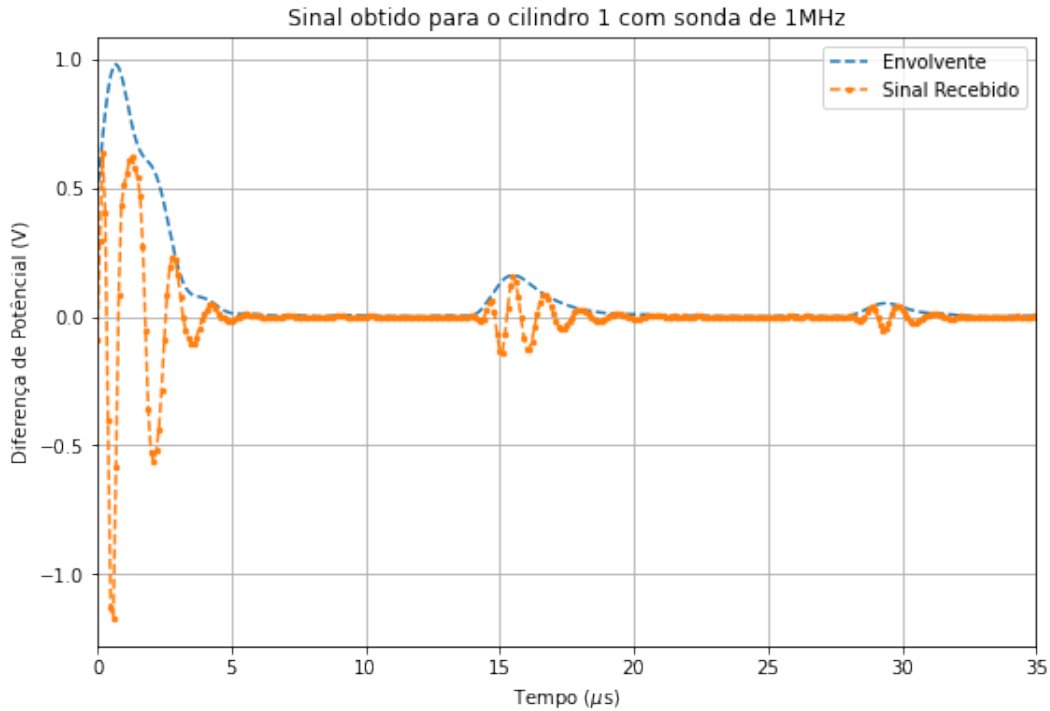


Figura 3: Sonograma obtido no *Software MeasureUltraEcho* para os ecos captados pelo transdutor de 1 MHz, em função do tempo de escuta

Para determinar o período da onda, foi necessário encontrar os três zeros ($zero_1$, $zero_2$ e $zero_3$: pontos a vermelho no gráfico da figura 4) que delimitavam os dois períodos T_1 e T_2 com maiores amplitudes da curva do Sinal Recebido (tracejada a laranja no gráfico) através do uso em *Jupiter* do método da biseção da função interpoladora desta curva. Assim, os dois períodos consecutivos do impulso eram $T_1 = zero_2 - zero_1$ e $T_2 = zero_3 - zero_2$. Considerando a média destes dois valores obteve-se para o período da onda $T = (1,108 \pm 0,271) \mu s$. O método usado para determinar a incerteza encontra-se em anexo - equação 9.

Para o cálculo da largura do impulso considerámos os dois pontos abaixo da meia altura do impulso (pontos a violeta no gráfico da figura 4), sendo esta meia altura dada por metade do valor

máximo do impulso. A diferença entre os tempos dos pontos indicados dá-nos a largura do impulso $L_{imp} = (2,2 \pm 0,2)\mu s$. Considerou-se para incerteza o dobro da resolução temporal (menor valor lido na escala dos tempos/diferença entre dois pontos consecutivos).

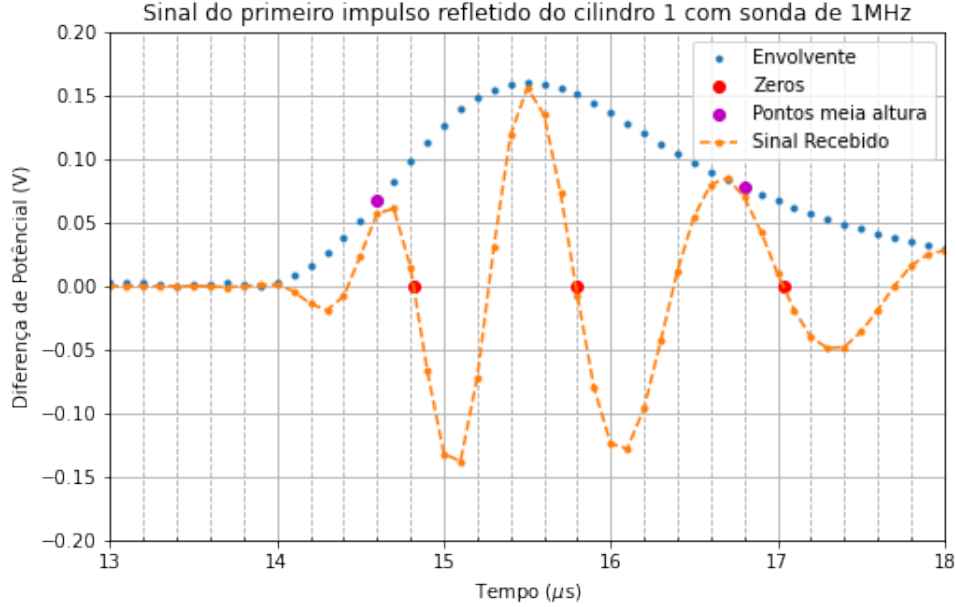


Figura 4: Sinal do gráfico da figura 3 ampliado na zona do primeiro impulso refletido

A análise para a sonda de 2 MHz e dos restantes cilindros (para ambas as sondas) foi feita de forma análoga à análise feita para o primeiro cilindro, pelo que apenas iremos apresentar os resultados das várias medidas características de cada cada sinal (cilindro + sonda) na secção "Resultados Finais e sua Discussão".

3.1.2 Velocidade do som no acrílico e tempo de atraso das sondas

Para a determinação da velocidade do som no acrílico usou-se a equação 4 onde $s_2 - s_1 = 2h$, com h a altura do cilindro.

O cálculo dos instantes t_1 e t_2 (usados para o intervalo de tempo entre dois impulsos consecutivos $t_2 - t_1$) foi dado a partir da determinação do máximo da primeira derivada de cada envolvente:

Derivou-se o sinal envolvente do primeiro e segundo impulso e, de seguida, encontrou-se o máximo da derivada através do método de *Golden Ratio*. Os tempos correspondentes a cada máximo dizem respeito a t_1 e t_2 , respetivamente. Em discussão com a professora foi-nos introduzido o conceito de fótons balísticos, que consistem nos primeiros fótons a chegar a um alvo, e portanto, são os que descrevem um trajeto mais curto. De um modo análogo, podemos interpretar as ondas sonoras como "fótons" e considerar que as primeiras a chegar ao transdutor são aquelas que têm máximo valor da primeira derivada.

O valor obtido para o cilindro 1 foi $t_1 - t_2 = (13,9 \pm 0,1)\mu s$. A velocidade do som no acrílico para este cilindro foi $v = (2,70 \pm 0,05) \text{ mm } \mu s^{-1}$. O tempo de atraso característico da camada protetora presente na sonda de 1 MHz (dado pela equação 5) foi $t_{2L} = (0,8 \pm 0,3)\mu s$ para o cilindro 1. As fórmulas usadas para o cálculo das incertezas encontram-se em anexo.

Note-se que foi necessário introduzir um ganho dinâmico TGC, para além do ganho fixo, nos sinais usados no cálculo do intervalo de tempo $t_2 - t_1$. Isto porque, no cilindro 3 principalmente, não conseguimos visualizar o segundo impulso refletido sem o TGC (pois a sua intensidade/amplitude era muito reduzida). Assim, na figura 5 estão apresentados os sinais usados no cálculo de $t_2 - t_1$

e os respectivos ganhos TGC para cada cilindro. Os ganhos apenas alteram a escala vertical dos sinais, permanecendo os tempos t_1 e t_2 os mesmos, com ou sem ganho.

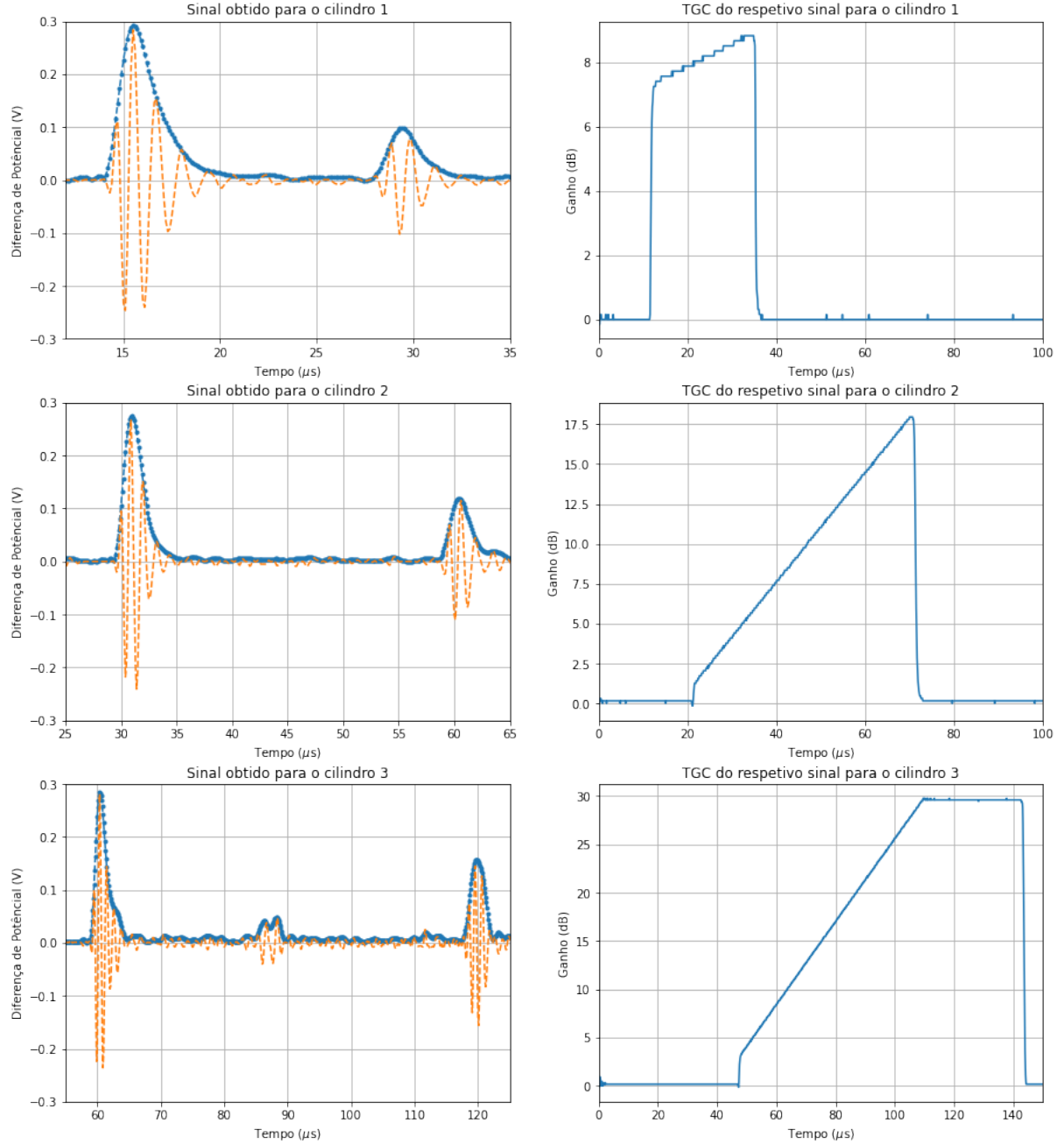


Figura 5: Sonogramas usados no cálculo de $t_2 - t_1$ para os três cilindros com a sonda de 1 MHz

3.1.3 Coeficiente de atenuação

O coeficiente de atenuação μ está expresso na equação da atenuação da intensidade da onda - equação 2. Uma vez que $I \propto V^2$, podemos assumir que $\left(\frac{V}{V_0}\right)^2 = \exp(-2\mu s)$ onde s é o caminho no meio acústico. Com os dados disponíveis para a realização desta experiência apenas nos é possível calcular do coeficiente de atenuação de um cilindro em relação a outro. Assim,

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_0 \exp(-\mu s_2)}{V_0 \exp(-\mu s_1)} = \exp(-\mu(s_2 - s_1)) \quad (6)$$

com $s_1 = 2h_1$ e $s_2 = 2h_2$.

Resolvendo em ordem a μ ficamos com:

$$\mu = \frac{0.5}{h_2 - h_1} \log \left(\frac{V_1}{V_2} \right) = \frac{1}{h_2 - h_1} \log \left(\sqrt{\frac{V_1}{V_2}} \right) \quad (7)$$

Antes de usarmos as amplitudes dos impulsos de cada cilindro é necessário retirar-lhes tanto o ganho fixo como o dinâmico:

$$V_{real} = V_{amplificado} 10^{-\frac{G_{fixo} + G_{dinamico}}{20}} \quad (8)$$

Retirados os ganhos, considerou-se para V_1 e V_2 as tensões para as quais os impulsos do cilindro 1 e 2, respetivamente, apresentavam o máximo valor da segunda derivada. No caso da sonda de 1 MHz obteve-se para o coeficiente de atenuação do cilindro 2 em relação ao cilindro 1 cerca de $\mu_{21} = -0,056 \text{ cm}^{-1}$. Para o coeficiente de atenuação do cilindro 3 em relação ao cilindro 1 obteve-se $\mu_{31} = 0.11 \text{ cm}^{-1}$. A discussão destes resultados encontra-se na respetiva secção.

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

Foram escolhidas as estruturas 1, 2, 3 e 8 do bloco de acrílico para determinar as suas posições de localização a partir de *A-scans*. Estas estruturas encontram-se numeradas no esquema do fantoma em anexo. As suas profundidades, dadas pelo esquema técnico, são $s_1 = 20 \text{ mm}$, $s_2 = 18,5 \text{ mm}$, $s_3 = 64 \text{ mm}$ e $s_8 = 24 \text{ mm}$. Os sonogramas obtidos para cada estrutura, para as sondas 1MHz e 2MHz respetivamente, encontram-se na figura 6.

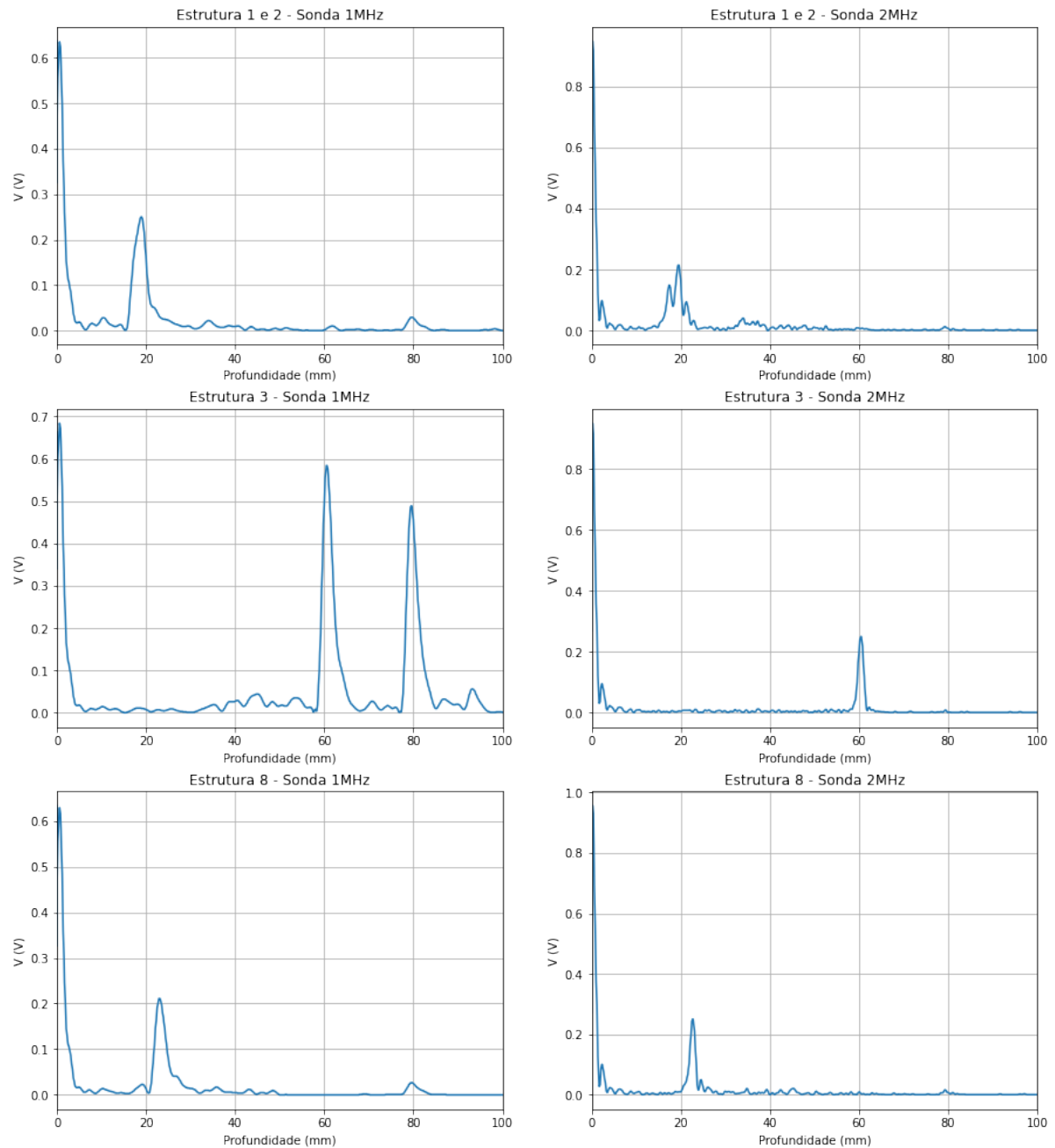


Figura 6: A-scan do paralelepípedo de acrílico usando a sondas de 1 MHz e 2 MHz, para as estruturas 1, 2, 3 e 8

No caso das estruturas 1 e 2 conseguimos observar que para a sonda de 1 MHz existe um impulso refletido na zona dos ~ 19 mm de profundidade, contudo não é possível distinguir a estrutura 1 da 2. Para a sonda de 2 MHz já é possível distinguir dois picos distintos nas profundidades correspondentes às estruturas 1 e 2, ou seja, pode-se afirmar que à partida a sonda de 2 MHz tem mais poder de resolução que a de 1 MHz.

Quanto à estrutura 3 conseguimos identificar uma estrutura a ~ 60 mm de profundidade tanto no gráfico para a sonda de 1 MHz como para o gráfico da sonda de 2 MHz. Em ambos estes dois gráficos o ganho aplicado nos 60 mm de profundidade é de ~ 30 pelo que podemos concluir que

para a frequência de 2 MHz o poder de penetração é menor, uma vez que o impulso obtido com esta sonda apresenta uma menor intensidade em relação ao mesmo impulso obtido com a sonda de 1 MHz. No gráfico correspondente à sonda de 1 MHz também está identificado um segundo impulso refletido proveniente da reflexão do sinal na base do cilindro aos 80 mm (este impulso só aparece com uma grande intensidade de reflexão porque está sobre ele aplicado um ganho dinâmico de 30).

Tanto para a estrutura 8 como para as estruturas 1 e 2 estão aplicados os mesmos ganhos de ~ 9 para a sonda de 1 MHz e de ~ 20 para a sonda de 2 MHz. Comparando os picos das estruturas nos gráficos "Estrutura 1 e 2 - Sonda 1 MHz"/"Estrutura 8 - Sonda 1 MHz" com os picos dos gráficos "Estrutura 1 e 2 - Sonda 2 MHz"/"Estrutura 8 - Sonda 2 MHz" podemos afirmar que estes apresentam aproximadamente a mesma amplitude ($\sim 0,2V$), contudo o ganho nos segundos gráficos é cerca do dobro do ganho dos primeiros. Para a sonda de 2 MHz precisamos de cerca de duas vezes o ganho usado na sonda de 1 MHz para atingir a mesma amplitude de pico. Tal significa que o poder de penetração da sonda de 2 MHz é inferior ao poder de penetração da sonda de 1 MHz.

Da análise geral dos gráficos da figura 6 podemos afirmar que para a sonda de 2 MHz a largura dos impulsos é sempre mais estreita que a largura dos impulsos para a sonda de 1 MHz. Isto de facto está em concordância com o seu poder de resolução, uma vez que um pico mais estreito significa um melhor conhecimento da localização da estrutura.

Deveríamos de ter tido em atenção a configuração usada no ganho dinâmico de cada estrutura para que o pudéssemos reproduzir aquando da troca de sonda.

Os varimentos manuais do bloco, usando *B-scans*, a partir dos transdutores de 1MHz e 2MHz encontram-se nas figuras 7 e 8, respetivamente.

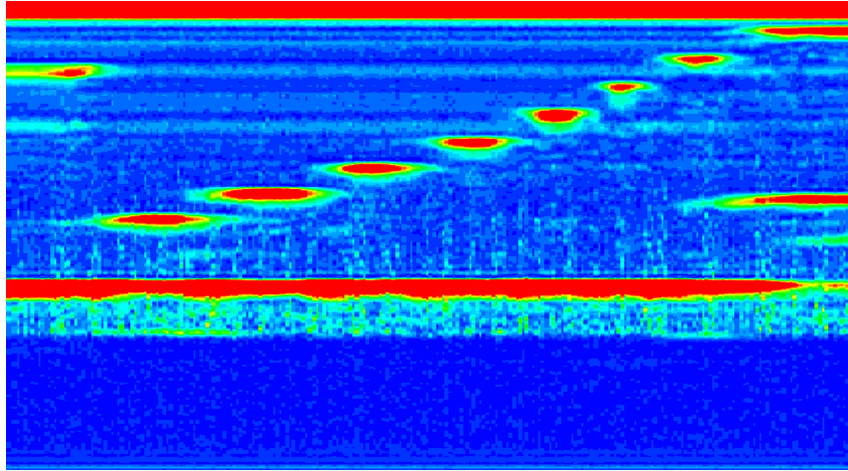


Figura 7: *B-scan* do paralelepípedo de acrílico usando a sonda de 1 MHz

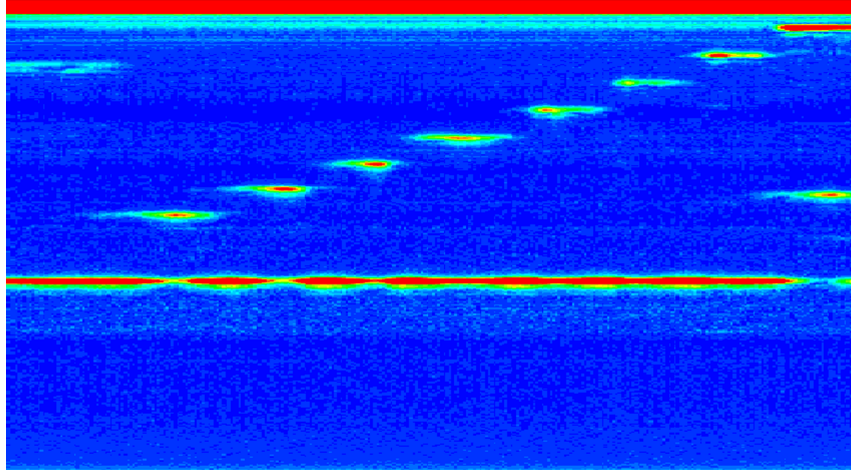


Figura 8: *B-scan* do paralelepípedo de acrílico usando a sonda de 2 MHz

Da análise destas figuras conseguimos identificar perfeitamente que a sonda de 2 MHz apresenta muito melhor poder de resolução, uma vez que as manchas representantes de cada estrutura encontram-se menos espalhadas pelo espaço, e não se deteta tanta interferência no fundo azul da figura. Para além disso, neste segundo varrimento é possível distinguir a estrutura 1 da 2 (isto é, conseguimos identificar dois traços com profundidades distintas apesar de muito próximos um do outro). O mesmo não acontece para a sonda de 1 MHz onde as estruturas 1 e 2 são indistinguíveis.

Para além disso, podemos também referir que a linha resultante do varrimento da base do paralelepípedo está muito mais destacada para a sonda de 1 MHz, tal observação pode dever-se ao facto de que menores frequências apresentam maiores poderes de penetração. Se repararmos, na figura 8, o *scan* da base inferior do bloco imediatamente abaixo das estruturas mais profundas apresenta pequenas falhas. As ondas produzidas pela sonda de 2 MHz apresentam uma maior dificuldade em contornar as estruturas, pelo que não conseguem penetrar de igual forma a base do paralelepípedo nessas zonas.

O poder de penetração da sonda de 1 MHz também se verifica para a estrutura 11. Esta, como sabemos do esquema técnico em anexo, tem dimensões superiores às outras estruturas, e por isso destaca-se em relação às outras quando observada pela sonda de 1 MHz (ao contrário do observado no *scan* da sonda de 2 MHz, onde a estrutura 11 aparece do mesmo tamanho das outras).

De notar que a qualidade destas imagens depende muito da forma estável e controlada do varrimento da sonda ao longo da superfície. Infelizmente este varrimento é feito manualmente podendo a velocidade de deslocamento da sonda variar ao longo do trajeto, interferindo na qualidade da imagem obtida.

4 Resultados Finais e sua Discussão

Na tabela 2 encontram-se todos os resultados obtidos na primeira parte do trabalho. Daqui podemos retirar que o período da onda e a sua largura tendem a não variar mais do que as suas respetivas incertezas entre cilindros, pelo que estas medidas características da onda apenas dependem da sonda usada. Quando a frequência da sonda duplica, o período e a largura das ondas passam a aproximadamente metade, como seria de esperar. Infelizmente apenas foi possível calcular a velocidade e o tempo de atraso com a sonda de 2 MHz para os cilindros 1 e 2. Não houve registo de dados para o cilindro 3 uma vez que nos esquecemos de aplicar ganho dinâmico no segundo impulso refletido, e sem este ganho torna-se impossível realizar os cálculos com precisão.

Iremos considerar para valor final da velocidade do acrílico a média dos valores determinados para os cilindros 1 (com as sondas de 1 e 2 MHz). Nesta escolha teve-se como justificação o facto de que no cilindro 1, por ser mais curto em comprimento, não acontece tanta difusão sonora,

		Cilindro		
		1	2	3
Sonda 1 MHz	Período (μs)	$1,1 \pm 0,3$	$1,1 \pm 0,2$	$1,0 \pm 0,2$
	Largura (μs)	$2,2 \pm 0,2$	$2,0 \pm 0,2$	$2,0 \pm 0,2$
	$t_2 - t_1$ (μs)	$13,9 \pm 0,1$	$29,6 \pm 0,1$	$59,0 \pm 0,3$
	velocidade (mm μs^{-1})	$2,70 \pm 0,05$	$2,70 \pm 0,03$	$2,73 \pm 0,01$
	t_{atraso} (μs)	$0,8 \pm 0,3$	$0,5 \pm 0,4$	$0,7 \pm 0,4$
Sonda 2 MHz	Período (μs)	$0,6 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,1$
	Largura (μs)	$1,2 \pm 0,2$	$1,2 \pm 0,2$	$1,2 \pm 0,2$
	$t_2 - t_1$ (μs)	$13,8 \pm 0,3$	$29,2 \pm 0,3$	
	velocidade (mm μs^{-1})	$2,72 \pm 0,06$	$2,74 \pm 0,03$	
	t_{atraso} (μs)	$0,8 \pm 0,4$	$0,6 \pm 0,4$	

Tabela 2: Resultados obtidos para cada cilindro

por outras palavras, o sinal do segundo impulso refletido irá ter um período mais semelhante ao sinal do primeiro impulso refletido neste cilindro do que para qualquer outro. Assim, $v_{acrílico} = (2,71 \pm 0,04)$ mm μs^{-1} . Para incerteza considerou-se a propagação de incertezas da média das duas velocidades (equação 13 em anexo).

O tempo de atraso para a sonda de 1 MHz foi determinado a partir da média dos tempos para os três cilindros, tendo-se obtido $t_{atraso} = (0,7 \pm 0,2)\mu s$. A fórmula da respetiva incerteza encontra-se em anexo. A sua incerteza relativa percentual é de 29%. De notar que o tempo de atraso depende do valor t_1 escolhido, pelo que não conseguimos garantir que este valor é o tempo característico da camada protetora da sonda de 1 MHz. Este facto justifica a incerteza relativa elevada deste tempo.

Sondas	μ_{21} (cm $^{-1}$)	μ_{31} (cm $^{-1}$)
1 MHz	-0,056	0,116
2 MHz	0,123	0,246

Tabela 3: Coeficientes de atenuação dos cilindros 2/3 em relação ao cilindro 1

Na tabela 3 encontram-se os resultados obtidos para os coeficientes de atenuação para as sondas de 1 e 2 MHz. No entanto, estes valores não foram calculados tendo em conta a potência do sinal, isto é, deveríamos de ter tido em consideração as áreas abaixo dos impulsos obtidos, pois estas são proporcionais à energia que o piezoelétrico recebe após a propagação do impulso sonoro.

Na nossa abordagem como considerámos apenas um ponto específico da nossa curva envolvente, os valores de V_1 nem sempre foram maiores que os valores de V_2 e portanto o nosso quociente $\frac{V_1}{V_2}$ aconteceu dar inferior a 1 para o coeficiente de atenuação μ_{21} para a sonda de 1 MHz.

Esta parte do trabalho não está executada de modo correto uma vez que os coeficientes de atenuação obtidos para os diferentes cilindros não são próximos uns dos outros.

5 Conclusão

Obtiveram-se os períodos e larguras das ondas ultra-sónicas para os vários cilindros com a respetiva sonda e notou-se que estes dependem da sonda usada mas que não variam praticamente nada entre cilindros. Determinou-se a velocidade do som no acrílico, tendo-se obtido experimentalmente para valor final $v_{acrílico} = (2,71 \pm 0,04)$ mm μs^{-1} com uma incerteza relativa de 1,5%. Também calculou-se o tempo de atraso característico da camada protetora do transdutor de 1 MHz. Contudo, obteve-se $t_{atraso} = (0,7 \pm 0,2)\mu s$ com uma incerteza relativa percentual de 29%. Este valor tem pouca precisão uma vez que depende do valor de tempo inicial, t_1 , do impulso refletido e este valor pode variar dependendo de como o queremos encontrar, no caso obteve-se t_1 a partir do máximo da derivada do sinal.

Quanto ao coeficiente de atenuação nada podemos concluir uma vez que estes resultados deveriam de ter sido sempre os mesmos independentemente do cilindro usado.

Numa segunda parte do trabalho realizou-se *A-scans* e *B-scans* e percebeu-se como cada um funciona a partir da observação de estruturas num fantoma paralelepípedo. Concluiu-se que a sonda de 2 MHz tem um maior poder de resolução e um menor poder de penetração em relação à sonda de 1 MHz.

6 Anexos

6.1 Incertezas

A incerteza associada ao período da onda $T = \frac{T_1+T_2}{2}$ é dada pelo máximo entre a diferença entre períodos T_1 e T_2 e a resolução da escala temporal $\delta t = 0,1$:

$$u(T) = \max \{T_1 - T_2, \delta t\} \quad (9)$$

A fórmula de propagação de incertezas para o intervalo de tempo entre dois impulsos consecutivos, $\Delta t = t_2 - t_1$ é dada por:

$$u(\Delta t) = 2\sqrt{2}\delta t \quad (10)$$

onde se considerou $2\delta t$ para a incerteza individual de cada tempo de início do impulso.

A fórmula de propagação de incertezas para a velocidade $v = \frac{2h}{\Delta t}$ de cada cilindro é dada por:

$$u(v) = \sqrt{\left(\frac{2}{\Delta t}\right)^2 u^2(s) + \left(\frac{2s}{\Delta t^2}\right)^2 u^2(\Delta t)} \quad (11)$$

A fórmula de propagação de incertezas para o tempo de atraso $t_{atraso} = t_1 - \frac{2h_{cilindro}}{v_{acrílico}}$ é:

$$u(t_{atraso}) = \sqrt{u^2(t_1) + \left(\frac{2}{v_{acrílico}}\right)^2 u^2(h_{cilindro}) + \left(\frac{2h_{cilindro}}{v_{acrílico}^2}\right)^2 u^2(v_{acrílico})} \quad (12)$$

Fórmulas de propagação de incertezas para a média:

- das velocidades do som no acrílico para o cilindro 1 com as sondas de 1 e 2 MHz:

$$u(v_{acrílico}) = \frac{1}{2}\sqrt{u^2(v_{1MHz}) + u^2(v_{2MHz})} \quad (13)$$

- dos tempos de atraso para os três cilindros:

$$u(t_{atraso}) = \frac{1}{3}\sqrt{u_1^2(t_{2L}) + u_2^2(t_{2L}) + u_3^2(t_{2L})} \quad (14)$$

6.2 Esquema técnico do fantoma paralelepipedico

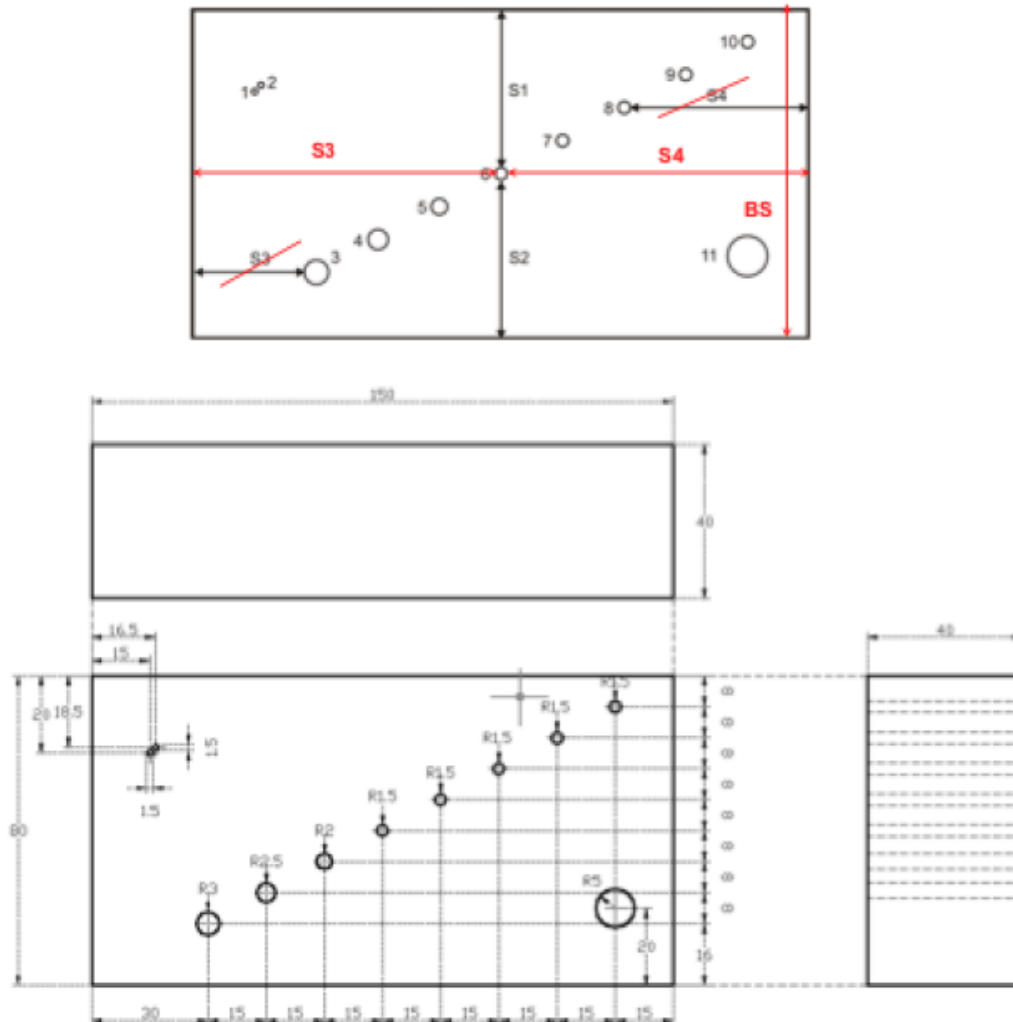


Figura 9: Esquema técnico do bloco paralelepipedico de acrílico

Referências

- [1] *Docentes da Disciplina*, Caracterização de materiais através de ultra-sons, Laboratórios de Física III