Trabalho 7: **Caracterização de materiais através de ultra-sons**

Francisco Samuel Neves Fidalgo
Dep. Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto,
Rua do Campo Alegre 687, 4150-179 Porto, Portugal
13 de novembro de 2021

Sumário

Através desta atividade, determinámos a velocidade de propagação do som no acrílico, recorrendo, para tal, a transdutores piezoelétricos (1 MHz e 2 MHz) que, acoplados a cilindros de acrílico, emitiam impulsos ultrassónicos e recebiam ecos refletidos (num tempo de voo) ciclicamente – da relação entre tempos médios de voo, t, e das alturas dos cilindros associados, s, tem-se ajuste $t = t_{2L} + \frac{2}{c}s$, que levou à obtenção de $v_{som_{exp\ 1\ MHz}} = (2{,}725 \pm 0{,}006) \times 10^3\ \mathrm{ms^{-1}}$ (erro de 0,2%) e $v_{som_{exp\ 2\ MHz}} = (2{,}745 \pm 0{,}005) \times 10^3\ \mathrm{ms^{-1}}$ (erro de 0,2%), desviadas do $v_{ref\ acrílico}$ em 0,2% e 0,5% – daqui, percebe-se a eficácia desta experiência em obter v_{som}. Nos sonogramas, averiguámos a ocorrência de atenuação do sinal do ultrassom (amplitude A diminui progressivamente, por dissipações no meio) – na procura de a caracterizar, adquirimos as constantes de atenuação μ, pela linearização da lei $A = A_0 \exp(-\mu \cdot s)$, obtendo $\mu_{exp\ 1\ MHz} = 2{,}90 \pm 0{,}07\ \mathrm{dBcm^{-1}}$ (erro de 2%) e $\mu_{exp\ 2\ MHz} = 3{,}09 \pm 0{,}08\ \mathrm{dBcm^{-1}}$ (erro de 3%) – valores tanto maiores, quanto maior a frequência, $\mu\ \alpha\ f^n$ –, desviando-se dos valores de referência em 8% e 26%, respetivamente (defeitos do meio). O poder de resolução, tanto a nível temporal como espacial, cuja avaliação foi conseguida pela largura das meias alturas de picos no domínio do tempo e do espaço (profundidade), permitiu nomear a sonda de 2 MHz como a que tem melhor resolução (menor largura δt e δs; $\delta t_{médio\ 2\ MHz} \cong 0{,}82 \pm 0{,}04$ µs menor que $\delta t_{médio\ 1\ MHz} \cong 2{,}4 \pm 0{,}2$ µs e $\delta s_{médio\ 2\ MHz} \cong 1{,}10 \pm 0{,}02$ µs menor que $\delta s_{médio\ 1\ MHz} \cong 2{,}9 \pm 0{,}3$ µs), conseguindo discriminar mais detalhes – confirmado tanto em A-scan, da análise espetral, como em B-scan, da visualização da qualidade de imagem vinda do varrimento dos transdutores ao longo da superfície da amostra em estudo. Com ambos os *scans*, determinámos a que profundidades se encontravam obstáculos (buracos no fantoma de teste, neste caso), comparando-as às medidas independentemente, com craveira. Não se percebe apenas que sondas são dispositivos adequados ao estudo das características de um meio no qual a onda acústica se propaga, e da identificação gráfico-visual das estruturas presentes nesse meio, mas também que esse estudo é de tão melhor qualidade quanto maior é a frequência do ultrassom (para profundidades de penetração atingíveis) – em geral, a sonda de 2 MHz é preferível à de 1 MHz.

1. Introdução

No nosso dia-a-dia, deparamo-nos frequentemente com dispositivos capazes de produzir e de analisar impulsos ultrassónicos – quer em contexto médico, que, das imagens geradas por estes dispositivos, permitem a "visualização" de tecidos, órgãos e fluxo de sangue e seu diagnóstico sem que seja necessária a incisão do corpo [1]; quer no contexto da ciência de materiais, em que permitem avaliar as características dos meios, estes têm vindo a ser revelados como indispensáveis à nossa qualidade de vida.

Os "ultrassons" (cuja denominação (som com frequência acima da audível) é mais comumente associada a gestações – muito importantes na determinação do estado de desenvolvimento do feto [2] (figura 1b) –, visto que são praticamente sempre usados nelas, graças à sua facilidade de uso e segurança, não sendo radioativos) são ondas sonoras de alta frequência que, uma vez geradas e transmitidas numa dada direção, seguem o caminho 'retilineamente' até atingirem um dado obstáculo (objetos, fendas, irregularidades, buracos, alterações do meio material) – a partir de que ponto são refletidas, retornando ao detetor como um "eco". É, de facto, através do registo dos tempos de voo e distâncias *fonte-zona de reflexão* (inserido no estudo gráfico do som – ou sonografia) que muito se consegue saber acerca das propriedades do som propagado no meio material e do próprio material – entre elas, velocidade do som, dimensões e profundidades (tecnologia por detrás do sonar [3], figura 1c).

Não será surpreendente, portanto, que um estudo continuado destes fenómenos ultrassónicos tenha persistido até hoje (e que vá continuar indefinidamente, sempre na procura de tornar a utilidade da sonografia cada vez mais refinada e fiável); é, pois, com a sua relevância em mente que decidimos explorar experimentalmente este ramo da física.

a) b)

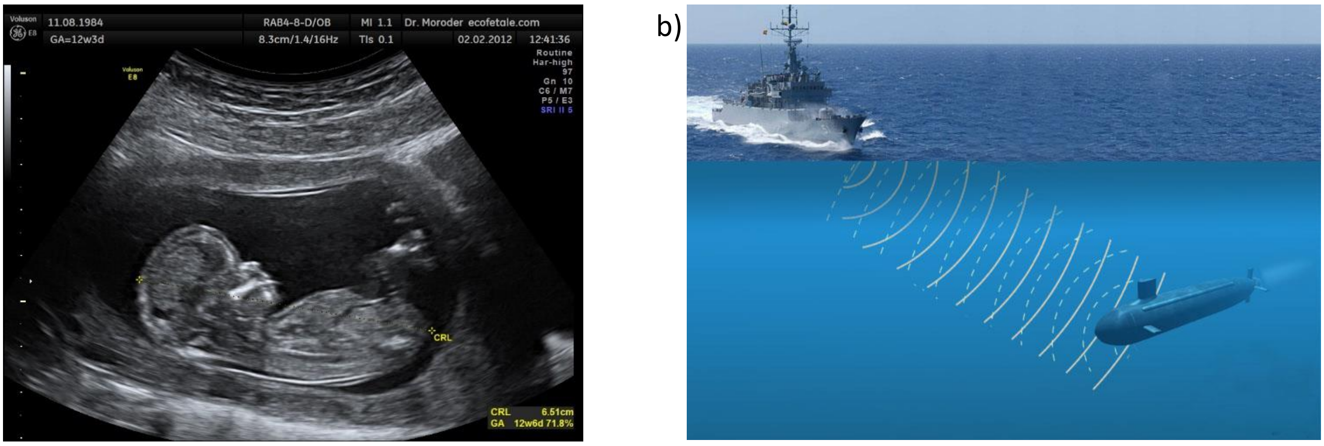


Figura 1 – Imagens representativas da capacidade dos impulsos ultrassónicos, como (a) sonograma de um feto em gestação (fonte: W. Moroder (2012) [Ultrasound image of the foetus at 12 weeks of pregnancy in a sagittal scan. Measurements of fetal Crown Rump Lenght (CRL)]. Wikipedia, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/CRL_Crown_rump_length_12_weeks_ecografia_Dr._Wolfgang_Moroder.jpg), e (b) um navio capaz de, com o sonar, identificar a profundidade do submarino por ondas sonoras emitidas e refletidas (desenhadas) (fonte: R. Lopes (2012) [Especial para o Poder Naval]. Naval, http://www.naval.com.br/blog/wp-content/uploads/2018/01/sonar-1.jpg).

1.1. Dissipação de energia de ondas sonoras, quando em propagação no meio

Tal como para qualquer onda mecânica, propagantes em meio material, a onda sonora (de pressão – onda mecânica acústica) vem a sofrer perdas de energia – isto pode ocorrer devido a absorções por parte do meio, mas também pode ocorrer devido a dispersões e a elevada ocorrência de pequenas reflexões e desvios por parte do feixe, quando este se depara com defeitos e pequenos obstáculos no meio – é sabido que a energia total não altera (conservação de energia); aliás, mesmo em casos de reflexão e transmissão, tem-se que $T + R = 1$ (com a fração de energia que atravessa uma superfície (transmitância) e que é refletida (refletância) a corresponder a T e R, respetivamente; lembrando que $R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)^2$, sendo Z_1 e Z_2 as impedâncias de dois meios distintos), contudo, isso não significa que a energia permaneça em forma de onda, muito menos no feixe de onda em estudo.

Destas ocorrências vêm **atenuações** da potência e intensidade, que se manifestam como **menores amplitudes**, A, a qual tem a seguinte lei exponencial associada:

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

sendo A_0 a amplitude inicial e $\boldsymbol{\mu}$ **o coeficiente de atenuação** do material acústico no qual a onda acústica se propaga e atenua, enquanto percorre a distância s. Analogamente, e sendo a intensidade da onda $I = \langle A^2 \rangle_t$,

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

com I_0 a intensidade de excitação e $k = 2\mu$ o coeficiente de extinção associado ao meio material.

Levanta-se aqui também a ideia de que μ é uma constante que, apesar de associada ao material de propagação, depende ainda da frequência da onda ultrassónica a propagar-se. Algo que se deve notar experimentalmente é que μ é proporcional a f^n (em que n – valor entre 1 e 2 – é característico do meio) – em outras palavras, **quanto maior a frequência, maior a atenuação**.

Este último ponto poderia levar a crer que o impacto na exatidão e discriminação de estruturas por parte das ondas US (ultrassónicas), aquando do aumento da frequência, seria bastante negativo – contudo, o facto de os comprimentos de onda serem mais pequenos tem um efeito positivo que supera o negativo (efeito esse a ser discutido posteriormente).

1.2. Transdutor e sua função

Até agora, quaisquer referências a dispositivos capazes de produzir e detetar impulsos ultrassónicos têm sido feitas sem os denominar – são, pois, as **sondas ultrassónicas** ou **transdutores** que, após a receção de sinais elétricos de elevada tensão e sua conversão em ondas de pressão, propagadas no material dos instrumentos cuja perturbação se faz propagar no material circundante como onda longitudinal de pressão variável, produzem [ultra-]som de frequência f_{US}. Assim, tal como um altifalante, o transdutor emite [ultra-]som; porém, tal como um microfone, ele também o recebe – ao retornarem ondas acústicas ao dispositivo, estas são convertidas em sinais elétricos (permitindo a sua amplificação e o seu estudo); a notar que ele dedica cerca de 99% do seu tempo com o seu papel de microfone; só o restante 1% é que é dedicado ao papel de transmissor [4] – isto porque o transdutor, com uma frequência de emissão de impulso ultrassónico definida (f_{imp}), só precisa de transmitir uma vez (num curto período de tempo) em cada ciclo, enquanto o recetor tem de estar a 'ouvir' tanto tempo quanto possível.

No caso do transdutor piezoelétrico (figura 2a), este usa o cristal piezoelétrico (quartzo, por exemplo) como agente que, sofrendo estresse mecânico (as tais perturbações), produz [ultra-]som numa etapa e recebe carga elétrica noutra etapa (a tal que pode ser estudada) – é também este material que define a f_{US}, já que vai ser igual à sua frequência mecânica de ressonância.

a) b)

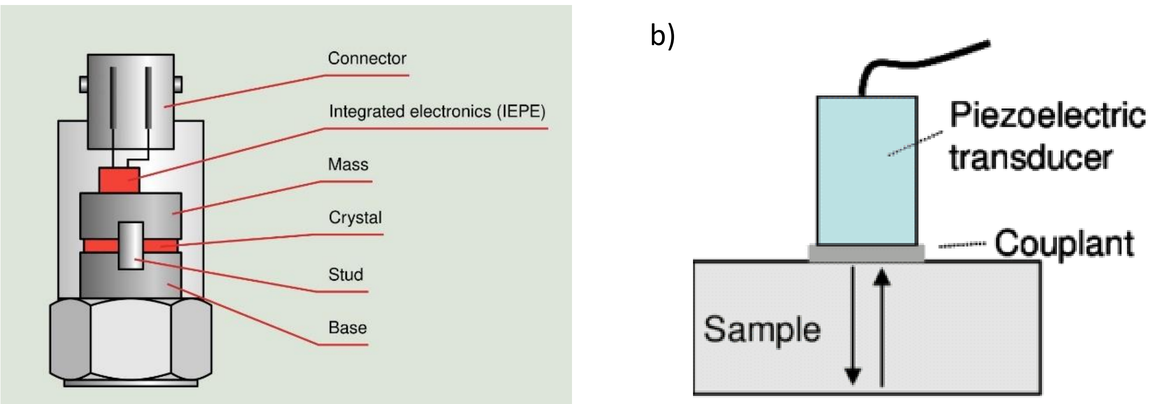


Figura 2 – Diagrama de um transdutor piezoelétrico (a) e algumas das suas componentes (fonte: A. Fernandez [Piezoelectric transducer components]. POWER-MI, https://power-mi.com/sites/default/files/elearning/vibration_analysis/03/en%20accelerometer.jpg) e (b) acoplado a uma amostra genérica (fonte: I. Moore [Set-up for pulse-echo measurements using standard piezoelectric transducer]. ResearchGate, https://www.researchgate.net/profile/Ian-Moore-3/publication/258570266/figure/fig1/AS:584963984461829@1516477690505/a-Set-up-for-pulse-echo-measurements-using-standard-piezoelectric-transducer-b-EMAT.png), e respetivas legendas.

1.3. Grandezas e medidas de ultrassonografia

Como discutido, grandezas como a profundidade, a velocidade do som e a constante de atenuação podem ser obtidas através do estudo de impulsos ultrassónicos: este envolve a determinação do **tempo de voo**, t (tempo de viagem desde que sai do emissor até que volta a ele) e, dele, podemos determinar a **velocidade do som no meio, c, se soubermos a distância percorrida, s'**,

$$c = \frac{s'}{t}$$

ou a **profundidade (ou dimensões, em geral) em que se encontram obstáculos no meio, se soubermos a velocidade do som** nele,

$$s = \frac{1}{2} c \cdot \Delta t$$

No primeiro caso, se considerarmos uma amostra sólida cuja distância entre a face na qual se dá a emissão e outra face paralela na qual se dá reflexão é s, tem-se que $s' = 2s$. Fatores conducentes a erros experimentais existem, como a utilização do sinal inicialmente detetado proveniente da reflexão que se dá na 'face de emissão' (a que se acopla ao transdutor), o qual tende a saturar o detetor e nem sempre é um bom indicador do instante inicial de reflexão; para eliminar este erro, podem-se tomar duas medidas de comprimentos onde se deu reflexão (s_1 e s_2) em instantes t_1 e t_2 diferentes, e, delas,

$$c_{calc} = 2\frac{(s_1 - s_2)}{(t_1 - t_2)}$$

que é útil, já que assim não considera a face de acoplamento.

No segundo caso, em que Δt é o tempo de eco e s é a distância/profundidade a que o obstáculo (que causou o eco) se encontra, também nos deparamos com erros experimentais: entre o transdutor e a face a que está acoplada, há uma camada protetora que irá aumentar o tempo de voo t lido (tempo adicional t_{2L}), passando a

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

cuja determinação experimental de t_{2L} permite a eliminação do erro, levando à profundidade corrigida z,

$$z = \frac{1}{2} c(t - t_{2L})$$

Estes fenómenos, claro, virão acompanhados de dissipações, cuja **diminuição de amplitude** resultante permite determinar o **coeficiente de atenuação μ** (pela lei exponencial previamente referida).

1.4. Sinais usados no estudo com o transdutor

Aquando do uso do transdutor (com a configuração similar à da figura 2b), vários tipos de inspeção do ultrassom podem ser adotados, entre estes, o ***A-scan*** e o ***B-scan***. O primeiro, que proporciona uma representação gráfica Amplitude (intensidade do eco US) vs. Tempo de voo ou Profundidade, numa estrutura (amostra) em estudo; o segundo, que, varrendo o transdutor ao pela superfície da amostra, proporciona uma imagem da secção da mesma, pois vai efetuando vários *A-scans* ao longo do tempo de varrimento.

Também a frequência do transdutor em uso tem impacto na qualidade dos dados; uma **maior frequência** implica uma taxa de captação mais elevada que, por sua vez, leva a uma **melhor resolução temporal**. Para além disso, e como referido, menor comprimento de onda permite uma distinção mais exata entre obstáculos e; assim, percebe-se que uma **maior frequência f_{US}** produz uma **melhor resolução espacial axial** (que se verifica pela distância entre meias alturas de um dado pico – eco detetado); a notar que a profundidade de penetração é, apesar disso, menor quanto maior for a taxa de impulsos US, já que o tempo máximo de escuta $T_{máx} = f_{imp}^{-1} \Rightarrow 2 \times d_{máx} = v_{US} f_{imp}^{-1}$ – num contexto mais sofisticado, escolher a frequência ideal que concilie resolução e penetração, no estudo de uma dada amostra, é sempre recomendável.

1.5. Considerações iniciais

No estudo em *A-scan*, surgem valores HF, NF e TGC; é de relevância referir que HF se refere ao sinal principal do impulso e ecos que pretendemos estudar, NF à representação de HF sob a formar de oscilação sinusoidal, e TGC ao ganho dinâmico a ser aplicado no sinal.

Algo a notar é que a resolução é tanto melhor quanto menor for comprimento de pulso δs (no caso da resolução espacial) ou o tempo de pulso δt (resolução temporal) (de pulso: entre meias alturas de um pico), pois isso significa que o instrumento é capaz de detetar as variações de sinal com maior exatidão, fornecendo, assim, uma imagem mais clara, capaz de distinguir estruturas, por exemplo.

Na conversão de unidades que descrevem a constante de atenuação, μ, e conhecendo, pela definição de decibel, que

$$\frac{A_0}{A} = 10^{\frac{\mathrm{dB}}{20}}$$

considera-se o seguinte processo,

$$\frac{A_0}{A} = \exp(\mu \cdot s)$$

$$e^{\mu \cdot s} = 10^{\frac{dB}{20}} \Leftrightarrow \log_{10}(e^{\mu \cdot s}) = \frac{dB}{20} \Leftrightarrow \mu \cdot s \log_{10}(e) = \frac{dB}{20} \Leftrightarrow \mu = \frac{1}{20 \log_{10}(e)} \left(\frac{dB}{s}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \mu[\mathrm{cm}^{-1}] = \left(\frac{1}{20 \log_{10}(e)}\right) \mu[\mathrm{dBcm}^{-1}] \Leftrightarrow \mu[\mathrm{dBcm}^{-1}] = 20 \log_{10}(e) \mu[\mathrm{cm}^{-1}]$$

Nesta experiência, tomámos o **valor de referência** da **velocidade do som no acrílico** como sendo $v_{som_{ref}} = 2{,}730 \text{ m/s}$ [5] e o da **constante de atenuação** como sendo $\mu_{1\ MHz_{ref}} = 3{,}15 \text{ dB/cm}$, **para 1 MHz**, e $\mu_{2\ MHz_{ref}} = 4{,}17 \text{ dB/cm}$, **para 2 MHz** [6]. É, pois, com estes valores que as comparações e estudo de desvios percentuais em relação a resultados experimentais são feitas.

1.6. Objetivos do estudo

Com esta atividade procurámos ser capazes de, trabalhando com o equipamento pertinente e analisando os nossos dados obtidos, alcançar os seguintes objetivos:

- Aprender a manusear transdutores piezoelétrico para gerar e captar ondas sonoras;
- Determinar a velocidade da onda do ultrassom a propagar-se no meio em estudo.
- Estudar a atenuação de ultrassons em materiais (acrílico, neste caso) e a sua dependência relativamente à frequência acústica;
- Determinar o efeito que diferentes frequências de ultrassons têm sobre o poder de resolução;
- Recorrer a medidas em *A-scan* e *B-scan*, interpretando o varrimento axial e avaliando o desempenho dos transdutores, no âmbito da determinação de profundidades.

2. Experiência

2.1. Material utilizado

A fim de possibilitar que esta atividade fosse realizada, recorremos aos seguintes materiais e aparelhos, todos eles integrados no estudo das ondas acústicas em meios materiais:

- Controlador *Ultrasonic Echoscope* [da marca Phywe];

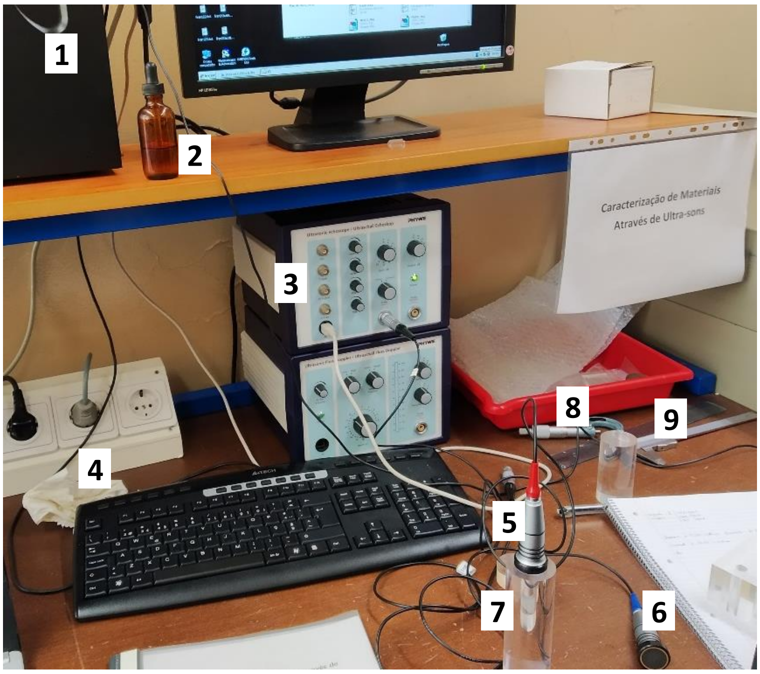
- Computador com software PHYWE dedicado;
- Dois Transdutores ultrassónicos (de 1 MHz e de 2 MHz) [Phywe]
- Fantomas de acrílico (4 cilindros de diferentes dimensões, e um paralelepípedo com vários buracos), o nosso 'meio material' cujas características pretendemos estudar;
- Craveira e micrómetro, para medir as dimensões dos fantomas:
    - Craveira da marca *Mitutoyo* (escala principal de 1 mm, escala secundária de 0,05 mm; precisão de $\frac{0{,}05}{2} \approx 0{,}03$ mm);
    - Micrómetro da marca *Mitutoyo* [0-25mm; 0,01mm] (escala principal de 0,5 mm, escala secundária de 0,01 mm; precisão de $\frac{0{,}01}{2} = 0{,}005$ mm);
- Conta-gotas com água, com o qual se adiciona o filme fino de água;
- Toalhas de papel, com as quais se secam os materiais após a utilização.

2.2. Montagem e Método Experimental

Com o material necessário presente, adotou-se o seguinte procedimento (adotado do protocolo relativo à experiência [7]), propício ao estudo pretendido:

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

Aquando da elaboração desta experiência, revelou-se útil a separação do seu estudo em duas partes, cada uma com recorrência a fantomas distintos; nesta primeira parte, recorremos aos quatro cilindros, na procura de determinar a velocidade do som e o coeficiente de atenuação do acrílico (montagem geral presente na figura 3).



Legendas:
1 – Conta-gotas
2 – Computador com software Phywe
3 – Controlador *Ultrasonic Echoscope*
4 – Toalha de papel
5 – Transdutor de 2 MHz (vermelho)
6 – Transdutor de 1 MHz (azul)
7 – Um dos cilindros de teste
8 – Micrómetro
9 – Craveira

Figura 3 – Fotografia da montagem conducente ao estudo das propriedades acústicas do acrílico a partir de sinais *A-scan*, e identificação dos materiais utilizados com respetiva legenda.

1. Determinámos, usando o micrómetro e a craveira, as alturas dos cilindros (já que são essas as distâncias percorridas por um impulso, quando este é emitido desde o transdutor até à base do cilindro) – a ver na tabela 1;
2. Configurámos adequadamente a sonda de 1 MHz e o software *measure Ultra Echo*, em *A-scan*:

2.1. Ligámos a sonda à entrada *Probe (Reflection)* do controlador, posicionando o seletor em *Reflection*;

2.2. Garantimos que a opção *time shift enabled* estava desativada, no software (para que pudéssemos obter o tempo de atraso experimentalmente e, só então, inseri-lo no software).

3. Adicionámos um filme fino de água a um dos cilindros (colocando apenas uma gota na superfície do topo);

4. Acoplámos a sonda à superfície do topo desse cilindro e visualizámos o sonograma do sinal resultante (ver figura 4 para melhor compreensão):

4.1. Certificámo-nos que o cilindro se dispunha perpendicularmente à bancada, com a base a pousada nela;

4.2. Procurámos sempre preencher 75% da janela (figura 4b) com o sinal obtido, evitando quaisquer saturações do sinal (ajustando parâmetros do transmissor e recetor, para tal efeito);

4.3. Controlámos os parâmetros de ganho dinâmico TGC a ser aplicado no sinal, de modo a permitir que mais picos se tornassem mais visíveis, tentando, ainda assim, reduzir ruídos e artefactos desnecessários ao estudo.

4.4. Registámos os intervalos de tempo entre picos e guardámos os restantes dados obtidos em formato *.txt*;

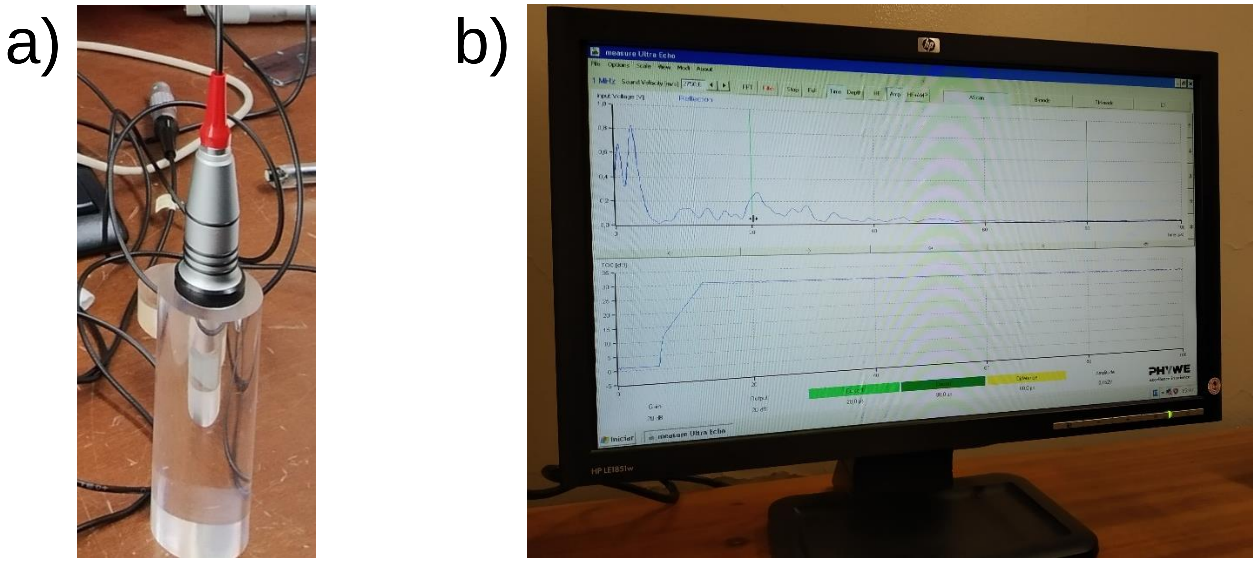


Figura 4 – Fotografias (a) do acoplamento do cilindro ao transdutor (neste caso, o de 2 MHz (vermelho)) e (b) do monitor a partir do qual se visualizou o sinal em função do tempo resultante e o ganho correspondente (um exemplo).

5. Repetimos os dois passos anterior nos restantes cilindros;

6. Feito o estudo com o transdutor de 1 MHz, replicámo-lo com o de 2 MHz.

7. Com os dados obtidos, obtivemos a velocidade do som no acrílico e o tempo de atraso da sonda, nos dois casos – cuja realização é explorada na secção da análise de dados.

2.2.2. Avaliação do desempenho dos transdutores, a partir de *A-scans* e *B-scans*

Na última parte da experiência, utilizámos o fantoma paralelepipédico de acrílico, considerando, na parte do *A-scan*, os buracos 1, 6, e 10 (10-1 e 10-2) (a ver na figura 5).

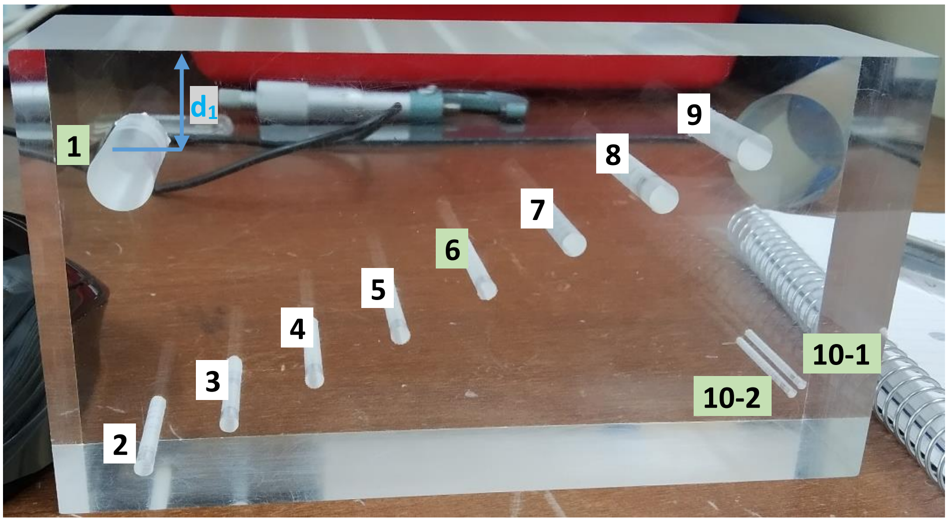


Figura 5 – Fotografia do fantoma paralelepipédico de acrílico utilizado no estudo do desempenho dos transdutores, tanto em A-scan como em B-Scan, e buracos com respetiva numeração; em A-scan, estudámos os buracos 1, 6 e 10 (a verde) – a 10-1 e 10-2 correspondem os dois buracos (de diâmetros muito reduzidos) que, analisados em simultâneo, foram tomados como pertencendo a um "buraco 10"; a d_1 corresponde a profundidade do buraco 1 (análogo para os restantes casos).

Medidas em *A-scan*

1. Determinámos, usando a craveira, as profundidades dos buracos (distância entre topo do fantoma e topo do buraco; por exemplo, d_1 na figura 5) a serem estudados (1, 6 e 10) – a ver na tabela 2;

2. Configurámos adequadamente a sonda de 1 MHz e o software *measure Ultra Echo*, em *A-scan*:

2.1. Inserimos o valor da velocidade do som (parâmetro *US velocity*) e o do tempo de atraso (para tal, reativámos a opção *time shift enabled*) obtidos experimentalmente na primeira parte da experiência, para 1 MHz;

2.2. Alterámos o modo de visualização para profundidade (*depth*), não nos sendo relevante, agora, o domínio temporal;

3. Adicionámos um filme fino de água ao topo do fantoma (colocando apenas uma gota);

4. Ativando a sonda, adquirimos os gráficos (sinal em função da profundidade), para cada um dos buracos; para tal, fez-se o acoplamento similar ao da figura 6a (em cada buraco);

5. Do sonograma, obtivemos as profundidades correspondentes a cada pico (guardando os restantes dados em *.txt*), para análise posterior;

6. Replicámos o estudo recorrendo, agora, à sonda de 2 MHz;

Medidas em *B-scan*

7. Certificámo-nos que toda a superfície do topo do fantoma estava preenchida por um filme fino de água;

8. Utilizando a sonda de 1 MHz, acoplámo-la a uma das extremidades do fantoma (similar ao caso da figura 4a);

9. Com o software em modo *B-Mode*, ativámos a aquisição de dados, varrendo o transdutor ao longo de toda a superfície do fantoma, terminando a aquisição, ao chegar ao outro extremo; ver figura 4b para uma ideia daquilo que foi observado e registado;

10. Replicámos o estudo recorrendo, agora, à sonda de 2 MHz.

a) b)

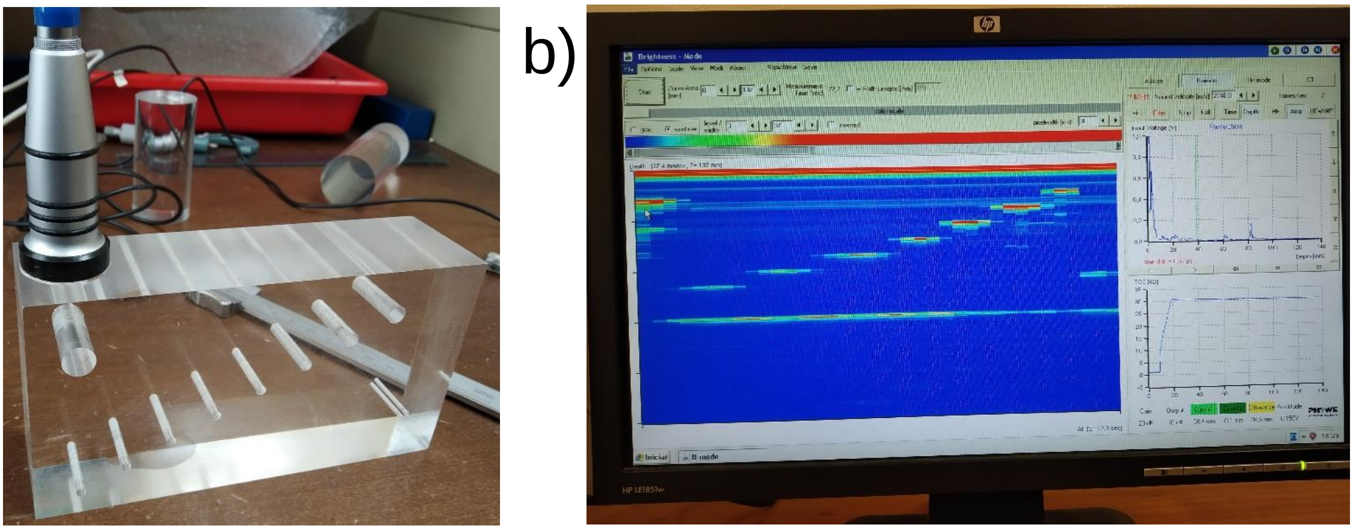


Figura 6 – Fotografia (a) do fantoma paralelepipédico de acrílico acoplado ao transdutor (de 1 MHz, e em relação ao buraco 1, neste caso) e (b) do monitor a partir do qual se visualizou a imagem obtida em *B-scan*, após o varrimento.

Notas (a cada nota é associada a numeração do passo (do procedimento) a que se referem):

Notas referentes à parte 2.2.1.

[1.] Aquando da escolha dos cilindros, procurámos certificarmo-nos de que usávamos os de menor altura (já que nesses obtemos melhores resultados – a ver na secção da análise dos dados);

[1.] Inicialmente, utilizámos apenas três cilindros; graças a termos mais tempo no fim de toda a atividade, decidimos obter os dados de um quarto cilindro, também;

[1.] Para a altura de cada cilindro, fizemos três medições independentes, na tentativa de reduzir incertezas associadas ou de garantir que irregularidades das superfícies (que variem a altura em alguns micrómetros) tenham o seu efeito tido em conta;

[2.1.] O modo *'Reflection'* é o que permite ao transdutor, não só emitir impulsos, como detetar aqueles que retornam (uma vez refletidos), o que é fulcral ao estudo em questão;

[2.2.] A análise posterior revela-nos que é possível que algum problema tenha ocorrido aquando da seleção desta opção; aquilo que deveria ter dado um tempo de atraso substancial, não ocorreu – levando-nos a várias ideias daquilo que poderá ter acontecido – a ver na secção da análise dos dados);

[4.3.] Esta conciliação dificultou que mantivéssemos o ganho constante ao longo de todo o tempo (o que seria o favorável, para estudos posteriores das amplitudes) – a medida de correção é explorada na secção de análise;

[4.4.] A determinação de quais são os picos, e de que a que instante de tempo eles estão associados depende da forma do pico (por vezes, mais acidentado) – algo a ser discutido na secção da análise;

[6.] O uso de sondas de diferentes frequências permite-nos comparar os resultados de ambos os casos e concluir acerca da eficácia dependendo da frequência;

[6.] A troca de uma sonda para outra consistiu na remoção da sonda de 1 MHz da entrada *Probe* seguida da inserção da sonda de 2 MHz nela;

[7.] Como estes valores tiveram de ser obtidos em tempo-real, para uso na segunda parte do trabalho, não houve um tratamento muito aprimorado deles, inicialmente (só depois, fora do laboratório).

Notas referentes à parte 2.2.2.

[1.] Estes buracos são considerados no estudo do desempenho dos transdutores, já que se tratam de "defeitos" (descontinuidades [refletoras] do meio) do fantoma conducentes a reflexões dos impulsos – o que é o que se pretende que aconteça;

[6.] A lembrar que os valores obtidos em 1 MHz e em 2 MHz diferiram; portanto, aquando da inserção dos parâmetros, colocámos os específicos a 2 MHz;

[7.] Na verdade, notámos que uma pequena camada de água sob o transdutor até seria suficiente para o estudo, pois a água aderia-se muito fortemente ao transdutor, "seguindo-o" quando o varríamos;

[9.] É o *B-Mode* que permite o estudo em B-scan, já que ele nos obtém os dados através da aquisição sequencial de vários A-scans, ao longo do espaço (daí a necessidade de varrimento);

[9.] Este varrimento (manual) foi feito de um modo estável e lento, mas com uma velocidade constante (tanto quanto possível, pelo menos), para que pudéssemos obter uma imagem que bem representasse a secção do bloco.

3. Resultados Experimentais e Análise

Da atividade experimental registaram-se os dados obtidos, os quais estão presentes nas tabelas 5 e 9 (no anexo 1), bem como outros valores complementares. É de salientar, também, que os cálculos de erros associados estão presentes no anexo 2.

Por estarmos a analisar vários assuntos, torna-se pertinente a separação de cada um deles em subtópicos.

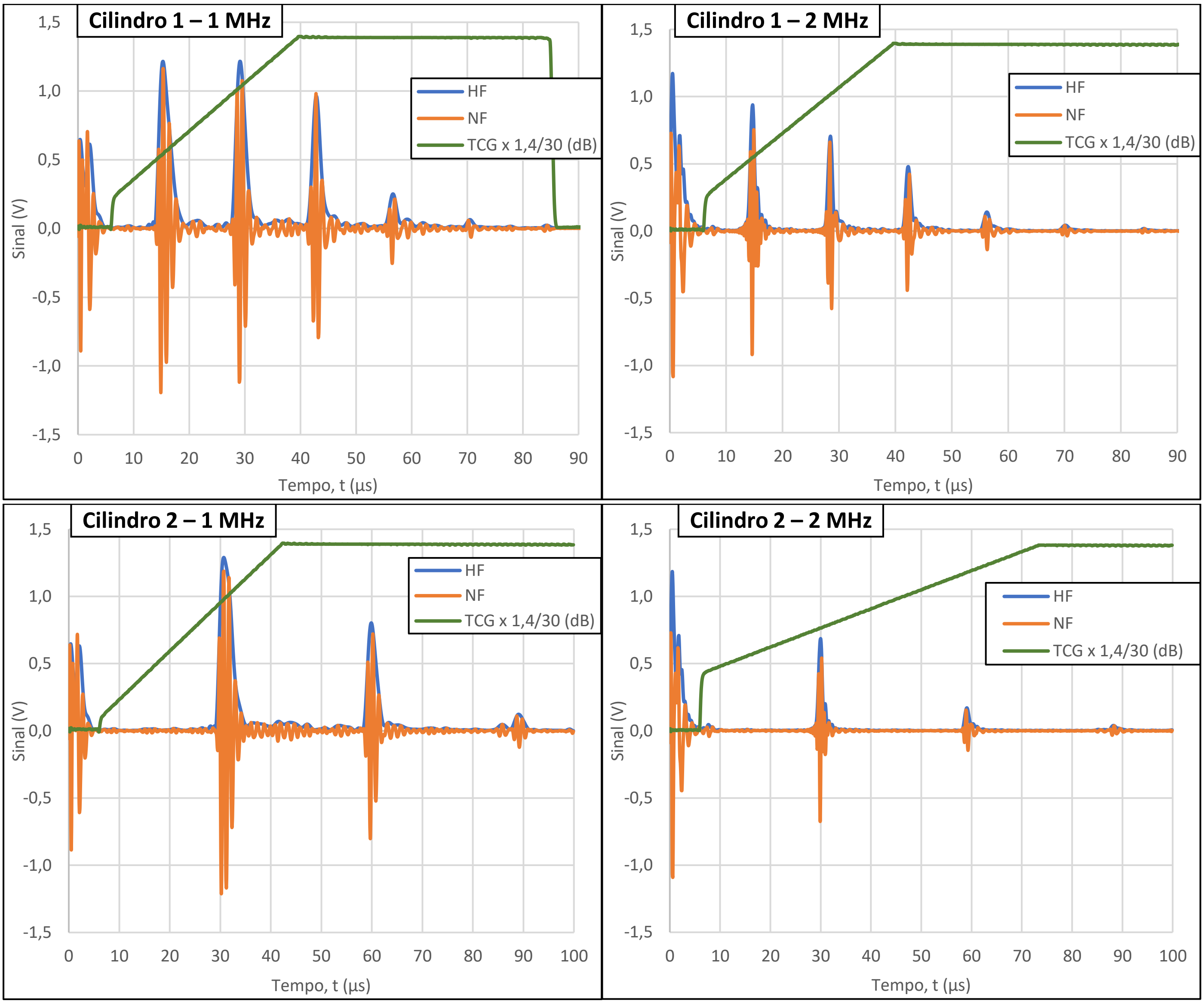
3.1. Propriedades acústicas do acrílico a partir de sinais *A-scan*

Obtidas as alturas dos cilindros, criámos a tabela 1. Algo a notar é que, na determinação do erro associado às alturas finais (alturas médias) a usar como s (distância), escolhemos o maior valor entre o desvio-padrão e o obtido da propagação de erros da expressão da média (calculado no anexo 2). Os cilindros estão numerados do de menor altura para o de maior altura ($h_1<h_2<h_3<h_4$).

	Altura medida, h (mm)	$\boldsymbol{u(\mathrm{h})}$ **(mm)**	**Altura média, $\bar{\mathrm{h}}$ (mm)**	**Desvio-padrão (mm)**	$\boldsymbol{u(\bar{\mathrm{h}})_{ppe}}$ **(mm)**
Cilindro 1	18,740	0,005 (micrómetro)	18,74 ± 0,01	0,01	0,003
	18,725	0,005			
	18,760	0,005			
Cilindro 2	39,90	0,03 (craveira)	40,00 ± 0,08	0,08	0,02
	40,10	0,03			
	40,00	0,03			
Cilindro 3	80,50	0,03	80,47 ± 0,02	0,02	0,02
	80,45	0,03			
	80,45	0,03			
Cilindro 4	120,50	0,03	120,50 ± 0,02	0	0,02
	120,50	0,03			
	120,50	0,03			

Tabela 1 – Valores obtidos das alturas dos cilindros de acrílico usados, a média das mesmas, e respetivas incertezas (associada à incerteza da altura média está o maior valor entre o desvio-padrão e o obtido da propagação de erros ($u(\bar{\mathrm{h}})_{ppe}$)).

Feito isto, obtivemos os sonogramas da figura 7 (em *A-scan*), recorrendo aos vários cilindros e aos dois transdutores distintos. Aquilo que vemos nela é praticamente o mesmo que víamos durante a atividade prática (mas com a inclusão de NF); algo a notar da figura, é que o ganho não se manteve sempre constante, passando apenas a sê-lo depois de alguns segundos (isto foi uma escolha consciente, pois julgámos ser necessário sermos capazes de visualizar os picos) – contudo, ainda que numa primeira parte apenas precisemos dos intervalos de tempo entre picos, numa segunda, é-nos importante as relações entre amplitudes máximas destes (para tal, recorremos à ‘normalização’ relativa aos decibéis, a ser vista a seguir).



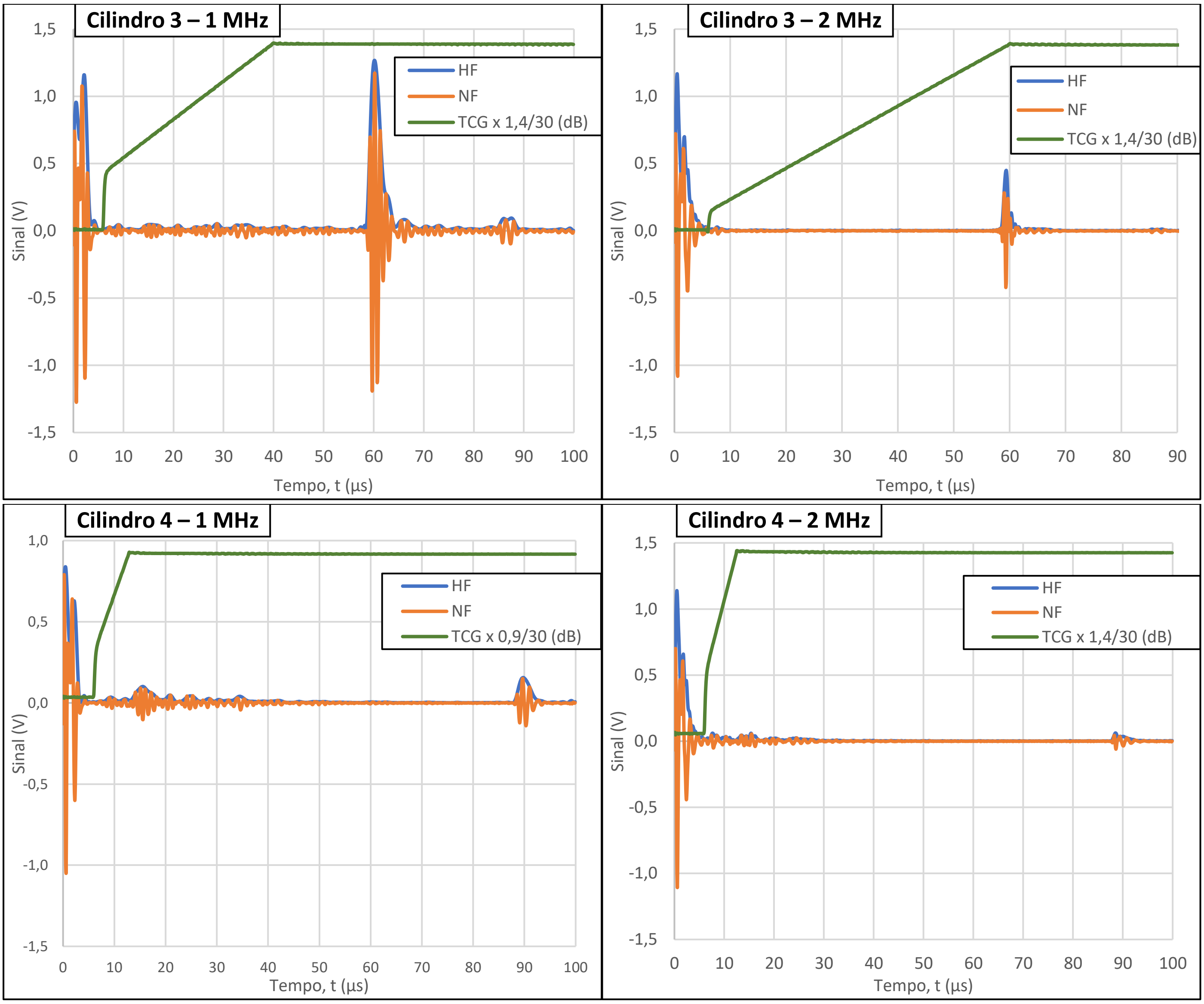


Figura 7 – Gráficos dos sinais obtidos em função do tempo (HF e NF) e respetivos ganhos (TGC), para as sondas de 1 MHz e de 2 MHz, no estudo dos quatro cilindros.

Na procura de "normalizar" as amplitudes (utilizamos o termo "normalização", apenas porque consideramos este um processo no qual, para cada tensão V_i, ajustamos o valor para um que tome um ganho de referência (em dB) constante. A expressão usada,

$$V_i \times 10^{\left(\frac{\mathrm{dB}_{\mathrm{máx}}-\mathrm{dB}_{\mathrm{i}}}{20}\right)} = V_{normalizado_i}$$

proveniente de $\frac{A_0}{A} = 10^{\frac{\mathrm{d}B}{20}}$, toma dB como a diferença entre um valor de referência (neste caso, usamos, arbitrariamente, o máximo (aquele associado ao ganho quando este está constante, em cada caso da figura 7) e o valor do ganho em cada ponto). Esta normalização permite que os valores V_i obtidos antes da "saturação" do ganho se multipliquem por um fator correspondente àquele que teriam se o ganho fosse o mesmo que o ganho dos V_i obtidos durante a "saturação". Posto isto, temos, na figura 8, os gráficos resultantes da normalização.

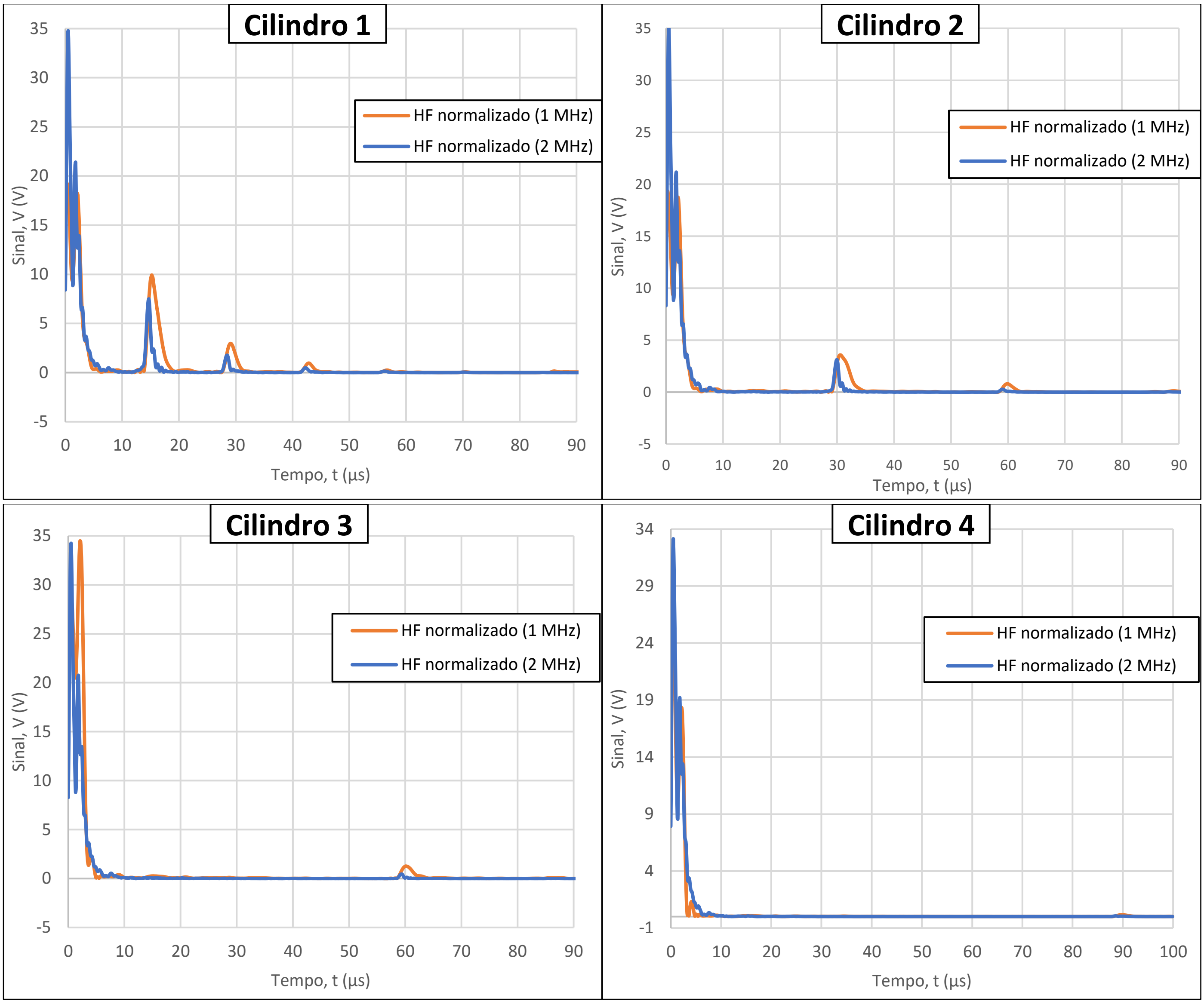
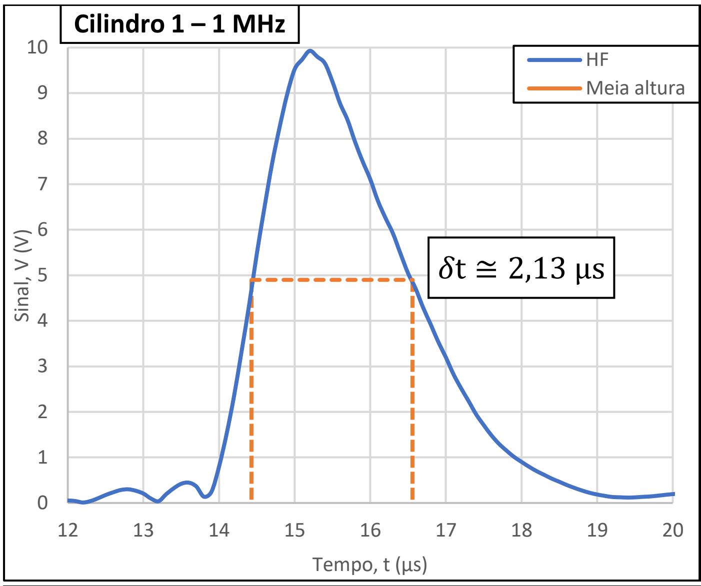
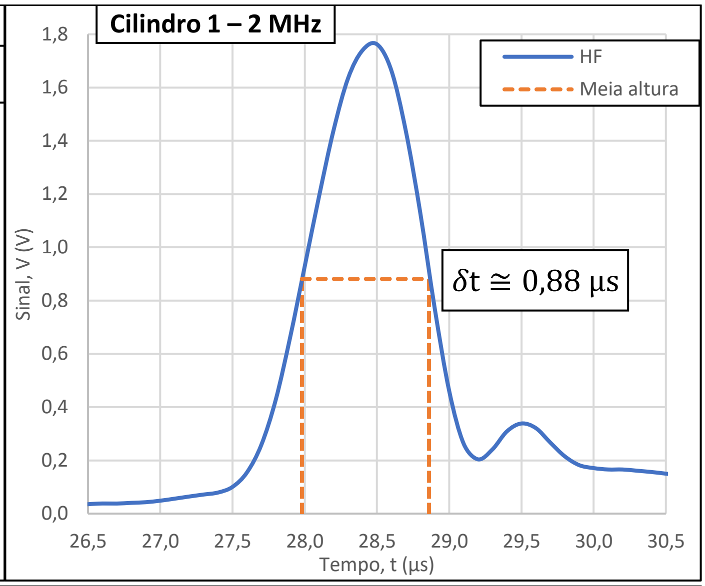


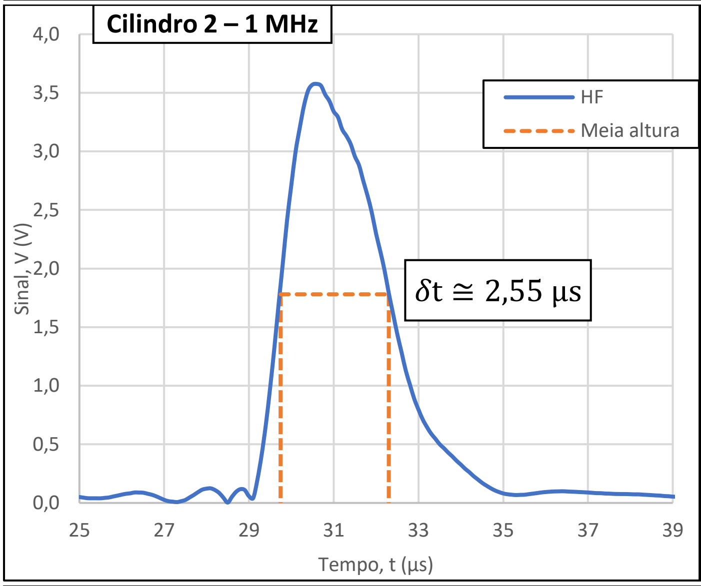
Figura 8 – Gráficos dos sinais normalizados em função do tempo, para as sondas de 1 MHz e de 2 MHz, no estudo dos quatro cilindros.

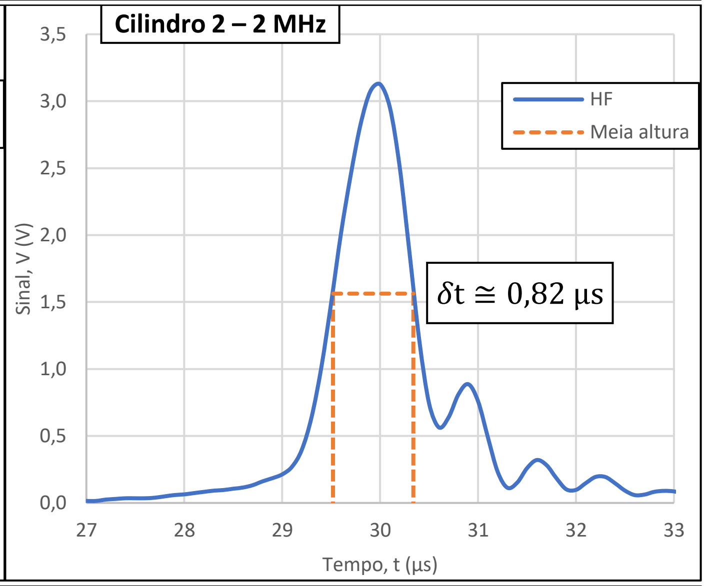
Aquilo que conseguimos ver, na figura 8, é a presença de picos no sinal (correspondentes aos tais ecos que o transdutor deteta), havendo tantos mais quanto menor for a distância percorrida (ou seja, quanto menor for a altura do cilindro acoplado) – isto alia-se também ao facto de a amplitude dos picos ir diminuindo com o tempo (intensidade cada vez mais reduzida) – ambos são provenientes da dissipação do sinal enquanto esta se propaga pelo meio material; assim, para um cilindro maior, o impulso percorre maior distância tendo a onda mais tempo (de voo) para se ir dispersando e atenuando (de facto, o impulso refletido dificilmente se nota no cilindro 4 – o maior deles todos); já um cilindro mais pequeno (como o 1). É claro que nem toda a dissipação se deve ao meio material; imperfeições do próprio objeto que o torna não totalmente homogéneo, irregularidades nas superfícies dos cilindros que podem causar difusão, e o acoplamento não-perfeito são aspetos que contribuem também.

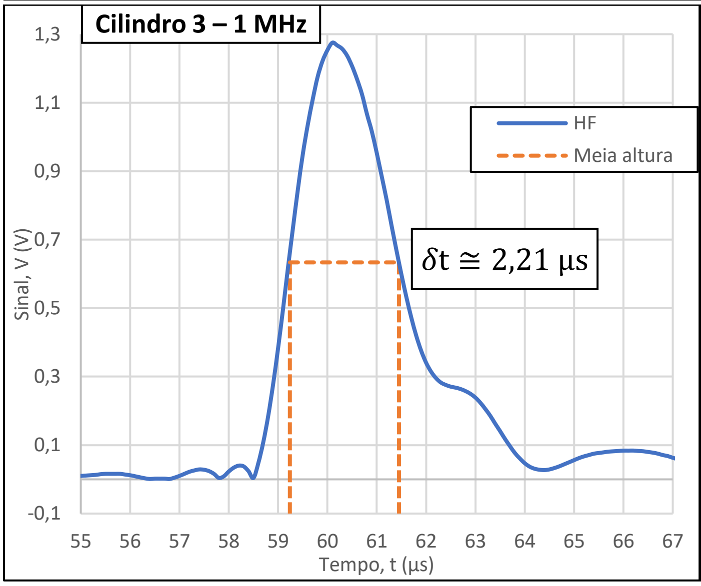
Antes da determinação do tempo de atraso e da velocidade do som no acrílico, considerámos pertinente o estudo da **resolução temporal dos transdutores**; foi da comparação dos δt das meias alturas, nos casos de 1MHz e de 2 MHz (a ver na figura 9), que alcançámos algumas conclusões.

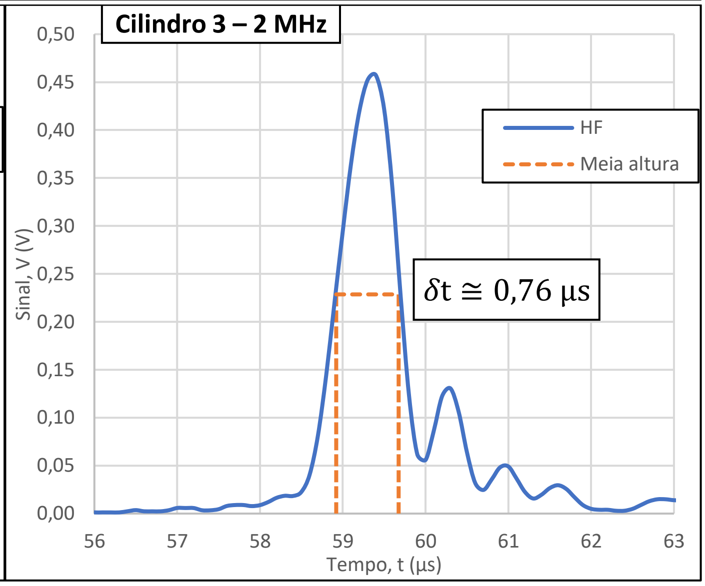

Cilindro 1 – 1 MHz
HF
Meia altura
δt ≅ 2,13 μs
Sinal, V (V)
Tempo, t (μs)


Cilindro 1 – 2 MHz
HF
Meia altura
δt ≅ 0,88 μs
Sinal, V (V)
Tempo, t (μs)


Cilindro 2 – 1 MHz
HF
Meia altura
δt ≅ 2,55 μs
Sinal, V (V)
Tempo, t (μs)


Cilindro 2 – 2 MHz
HF
Meia altura
δt ≅ 0,82 μs
Sinal, V (V)
Tempo, t (μs)


Cilindro 3 – 1 MHz
HF
Meia altura
δt ≅ 2,21 μs
Sinal, V (V)
Tempo, t (μs)


Cilindro 3 – 2 MHz
HF
Meia altura
δt ≅ 0,76 μs
Sinal, V (V)
Tempo, t (μs)

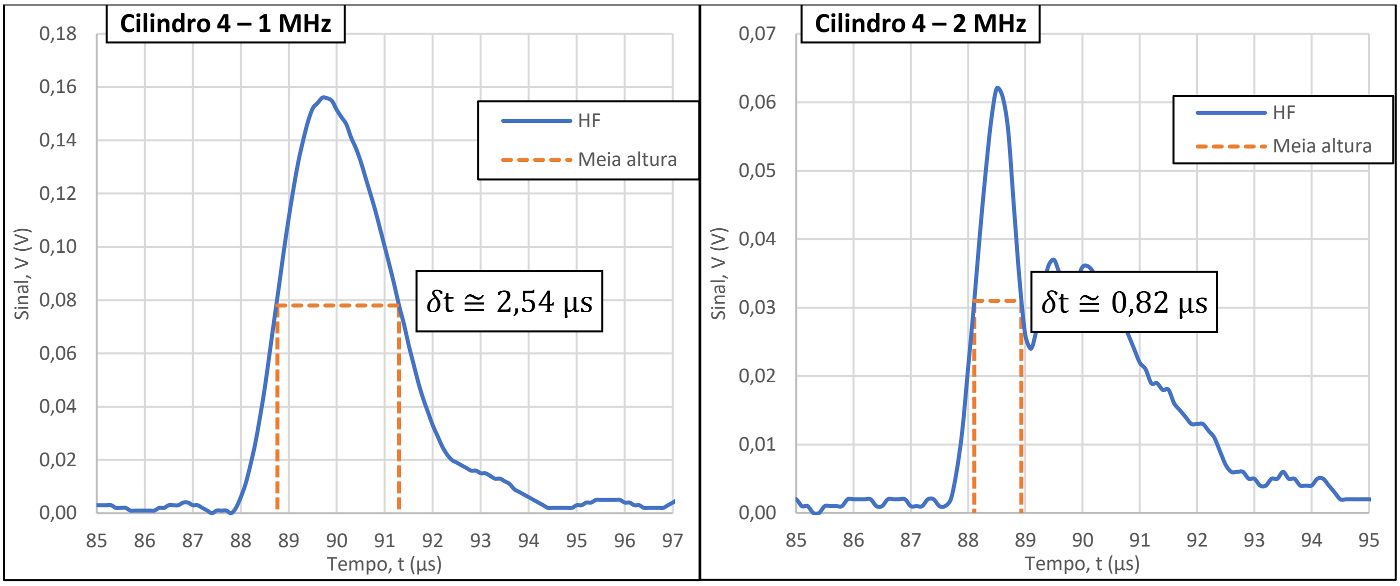


Figura 9 – Gráficos dos sinais ampliados num dos seus picos e respetiva meia altura e δt associado, para as sondas de 1 MHz e de 2 MHz, no estudo dos quatro cilindros.

Como mencionado na secção das 'Considerações iniciais', conseguimos avaliar o poder de resolução do transdutor, vendo o quão estreito é um dos picos do sinal (geralmente, mais estreito implica maior exatidão). De facto, vimos que $\boldsymbol{\delta t_{médio_{1\,MHz}}} \cong \mathbf{2,4 \pm 0,2}$ **µs (i.r. de 8%)** e que $\boldsymbol{\delta t_{médio_{2\,MHz}}} \cong \mathbf{0,82 \pm 0,04}$ **µs (i.r. de 5%)**, sendo que em todos os casos, o δt de 1 MHz nunca superou o de 2 MHz, estando os valores sempre próximos das médias respetivas, como indicam as incertezas a associadas (obtidos dos desvios-padrão) – é de salientar que não parece haver nenhuma correlação entre δt e comprimento do cilindro. Podemos concluir fortemente, pois, que a resolução temporal do transdutor de 2 MHz é maior que a de 1 MHz (ou seja, tem uma melhor capacidade de distinguir eventos que ocorrem "próximos" um do outro, temporalmente falando); isto faz sentido e está de acordo com o que se esperava (uma maior frequência leva a um melhor poder de resolução no tempo), pois a uma frequência elevada está uma maior "taxa de capturas", um maior *framerate*, o qual é capaz de isolar melhor o impulso/eco no intervalo de tempo em que realmente ocorreu/foi captado.

Para obter a velocidade do som no acrílico, $\boldsymbol{v_{som_{exp}}}$, e tempo de atraso, considerámos a expressão teórica $t = t_{2L} + \frac{2}{c}s$, tomando os tempos de voo médios de cada cilindro, t ($t \equiv \overline{\Delta t}$, só para facilitar a notação), obtidos das diferenças entre instantes nos quais se davam picos, e associando cada valor à distância associada s (a distância aqui é a altura do cilindro, já que a distância total percorrida (ida e volta) é considerada pelo fator 2 presente na expressão teórica – valores a ver nas tabelas 6 e 7, em anexo. Foi recorrendo à regressão linear destes dados (ver pontos e ajustes lineares tanto para 1 MHz como para 2 MHz na figura 10) que obtivemos os parâmetros de ajuste, dado que declive $m = \frac{2}{c} \Leftrightarrow c = \frac{2}{m}$, com $c = v_{som_{exp}}$ e ordenada na origem b $= t_{2L}$ (tempo de voo).

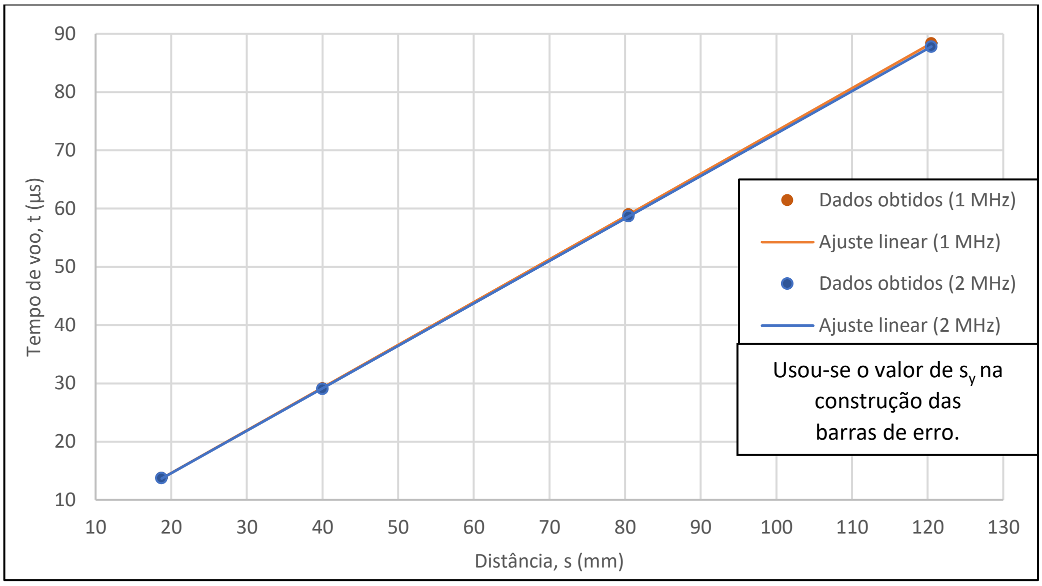


Figura 10 – Gráfico do tempo de voo, t, em função da distância, s, e respetivo ajuste linear, para as sonas de 1 MHz e de 2 MHz.

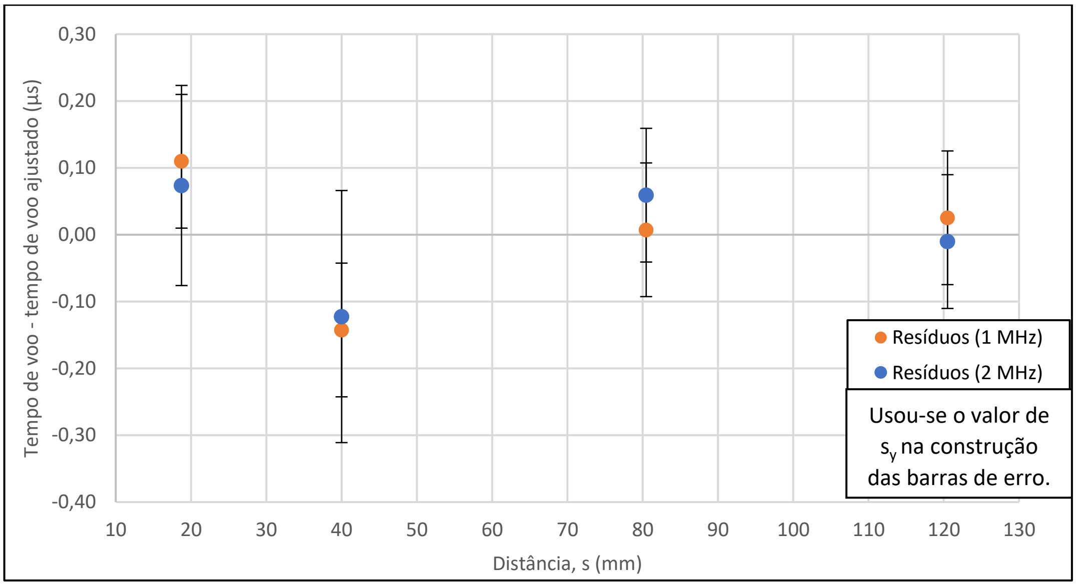


Figura 11 – Gráfico da distribuição residual entre o tempo de voo, t, e o tempo de voo ajustado, em função da distância, s, para as sondas de 1 MHz e de 2 MHz.

Com os seguintes parâmetros,

Ajuste linear – 1 MHz			
m	0,734	-0,1	**b**
$\mathbf{s_m}$	0,002	0,1	$\mathbf{s_b}$
$\mathbf{r^2}$	0,99999	0,1	$\mathbf{s_y}$

Ajuste linear – 2 MHz			
m	0,729	0,2	**b**
$\mathbf{s_m}$	0,001	0,1	$\mathbf{s_b}$
$\mathbf{r^2}$	0,999993	0,1	$\mathbf{s_y}$

Imediatamente, é possível ver a tendência linear que a disposição dos pontos sugere (nos dois casos, sobrepostos nas figuras) – algo a mencionar é a escassez de pontos; infelizmente, usando apenas 4 cilindros, torna-se inconcebível ter uma densidade de pontos muito maior – claro que poderíamos ter juntado vários cilindros e considerar essa associação como um "novo cilindro", mas isso, para além de trazer problemas com a descontinuidade acrílico-ar-acrílico, também leva a comprimentos muito grandes que, como já vimos, levam a dissipações e não são conducentes a um grande número de picos detetáveis.

Posto isto, aquilo que se tem para 1 MHz é um declive $m = 0{,}734 \pm 0{,}002$ (i.r. de 0,3%) e $b = -0{,}1 \pm 0{,}1$ (i.r. de 100%), com um coeficiente de determinação (r^2) muitíssimo próximo do valor ideal (1), o que evidencia uma aparente relação fortemente proporcional entre as grandezas em jogo; O desvio-padrão em relação a y, s_y, é reduzido, ainda assim, e por ser um valor superior ou igual ao das incertezas associadas a cada valor do tempo de voo, foi usado na construção das barras de erro.

Relativamente à distribuição residual da figura 11, os pontos do caso de 1 MHz não apresentam quaisquer tendências sistemáticas, apresentando-se aleatoriamente e sempre com módulos reduzidos (geralmente menores que 1% da ordem de grandeza em que se está a trabalhar) – isto, aliado a r^2, vem a evidenciar a tendência linear dos pontos (e, daí, a relação entre t e s) e o quão adequada está o nosso ajuste.

Aquilo que se tem para 2 MHz é $m = 0{,}734 \pm 0{,}002$ (i.r. de 0,3%) e $b = 0{,}2 \pm 0{,}1$ (i.r. de 50%).

No que toca a s_y, ao coeficiente de determinação e aos resíduos, algo de similar àquilo que se disse no caso de 1 MHz se pode dizer neste.

Desta análise, considerámos os valores adequados para o estudo; deles, e feitas as conversões adequados ($1\ \mathrm{mm/\mu s}\ \rightarrow 1000\ \mathrm{m/s}$), obtemos ($v_{som_{exp}} = c = 2/m$),

Para a sonda de 1 MHz, $\boldsymbol{v_{som_{exp}} = (2,725 \pm 0,006) \times 10^3}$ m/s (i.r. de 0,2%)

Para a sonda de 2 MHz, $\boldsymbol{v_{som_{exp}} = (2,745 \pm 0,005) \times 10^3}$ m/s (i.r. de 0,2%)

as quais se **desviam percentualmente do $\boldsymbol{v_{som_{ref}}}$** em **0,2%** e em **0,5%**, respetivamente – ótima exatidão.

Relativamente aos tempos de atraso, $b = t_{2L}$,

Para a sonda de 1 MHz, $\boldsymbol{t_{2L} = (-0,1 \pm 0,1) \times 10^3}$ µs (i.r. de 100%)

Para a sonda de 2 MHz, $\boldsymbol{t_{2L} = (0,2 \pm 0,1) \times 10^3}$ µs (i.r. de 50%)

Apesar de resultados das velocidades adequados, os tempos de atraso obtidos não apresentam valores suficientemente elevados (pelo menos, não quando comparados a valores de outros grupos) – isto leva-nos a crer que não houve tempo de atraso (ou que este é muitíssimo reduzido), para não mencionar que as incertezas associadas (de precisão muito baixa) englobam os 0 µs, e que o t_{2L} da sonda de 1 MHz é negativo (o que não faz sentido, já que implica um 'adiantamento' e não um atraso). O que se esperaria era um valor de atraso consideravelmente maior ao que temos, o qual, uma vez inserido no *software*, seria corrigido e proporcionar-nos-ia novos valores de cujos ajustes poderíamos obter novas velocidades experimentais, desta vez ainda melhores, com novos t_{2L} mais próximos de 0. Tomar esse procedimento com os t_{2L} não levou a quaisquer alterações nos resultados (os quais já eram adequados, de qualquer jeito). Acreditamos que este problema de t_{2L} reduzidos tenha surgido talvez porque a camada de água usada não fosse suficientemente espessa, ou "larga", não criando uma distância entre o transdutor e o acrílico longa o suficiente para causar atrasos marcantes; ou talvez porque o *software* já estivesse calibrado para o tempo de atraso (ainda que isto não seja provável, visto que se estava a trabalhar com a opção *time shift enabled* desativada). Em teoria, o que obtivemos é o que é favorável num contexto profissional (quanto menor o tempo de atraso, melhor); mas no contexto desta atividade, e baseado nos valores de outrem, não era o que se esperava.

Na procura de corroborar a ideia de que $\mathrm{c_{calc}} = 2\frac{\mathrm{s1-s2}}{\mathrm{t1-t2}}$ é um bom método de obtermos a velocidade do som (corrigindo os erros vindos da reflexão inicial que ocorre na "face de transmissão", como referido na secção da introdução teórica), obtivemos os vários valores a partir dos nossos dados (combinando os vários comprimentos dos cilindros, s_i, e os vários tempos associados, t_i) – a ver na tabela 2.

Sonda usada	Velocidades do som obtidas a partir da expressão $c_{calc} = 2\frac{s1-s2}{t1-t2}$ (x10³ ms⁻¹)	$u(c_{calc})$ (ms⁻¹)
1 MHz	2,77	0,03
	2,71	0,01
	2,72	0,01
	2,717	0,007
	2,728	0,005
	2,731	0,009
2 MHz	2,78	0,05
	2,73	0,02
	2,75	0,01
	2,74	0,01
	2,748	0,007
	2,75	0,01

Tabela 2 – Valores obtidos das velocidades do som usando a expressão c_{calc}, e incertezas associadas, nos casos da sonda de 1 MHz e de 2 MHz.

Observando cada ponto graficamente (figura 12), vemos existir uma aproximação dos nossos valores à velocidade do som de referência (alguns dos quais até parecem coincidir), com uma maior consistência de valores no caso de 1 MHz; aliás, $c_{calc_{média\ 1\ MHz}} = (2,73 \pm 0,02) \times 10^3\ \mathrm{m/s}$ **(i.r. de 0,7%)** e $c_{calc_{média\ 2\ MHz}} = (2,75 \pm 0,02) \times 10^3\ \mathrm{m/s}$ **(i.r. de 0,6%)** que se afastam de $v_{som_{ref}}$ em **0,02%** e **0,7%**. Vemos que para 1 MHz obtivemos uma exatidão bastante melhor do que a que se tinha com o ajuste; não tanto se pode dizer para 2 MHz, que, apesar de adequada, não é tão boa como o caso do ajuste (ainda que a média fique melhor, se excluirmos o ponto que mais afastamento sofre).

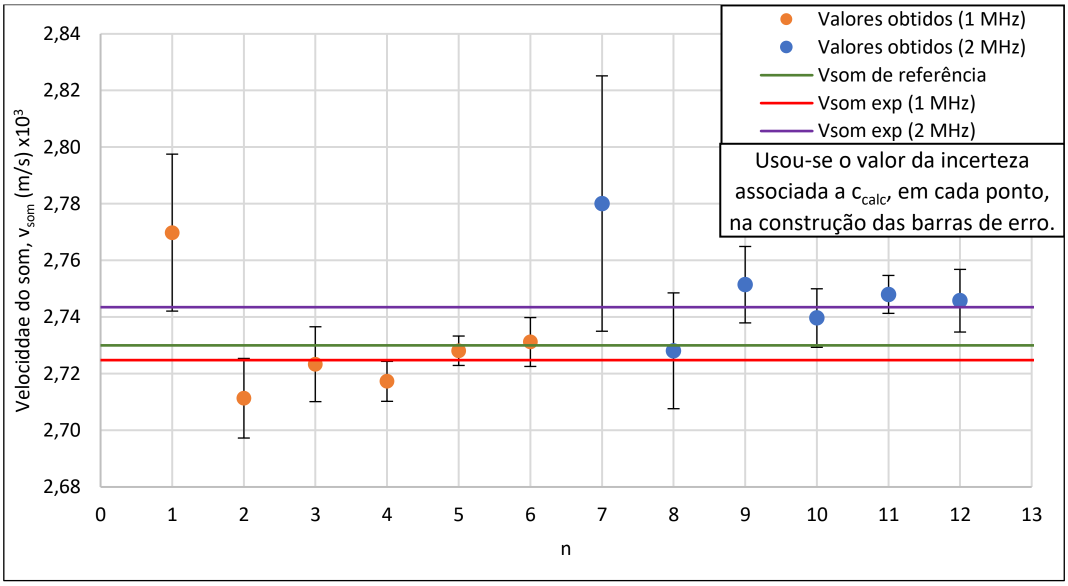


Figura 12 – Gráfico dos valores das velocidades do som, o de referência, os vindos dos valores das regressões e os vindos de c_{calc}, para as sondas de 1 MHz e de 2 MHz.

Para obter o coeficiente de atenuação, μ_{exp}, recorremos à lei $A = A_0 \exp(-\mu \cdot s)$, da qual,

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

cujo ajuste linear leva a declive $m = -\mu$.

A salientar que, enquanto no caso anterior s era a distância *transmissor-base do cilindro*, aqui, s é a distância total percorrida. Assim, desde um primeiro impulso até à deteção do eco, $s_1 = 2 \cdot h_{cilindro}$; num segundo eco detetado, $s_2 = 4 \cdot h_{cilindro}$; etc...

A A corresponde a amplitude de um dado pico. Com isto, criou-se a tabela 8 (em anexo) e os gráficos das figuras 13 e 14. A lembrar que μ é uma constante que difere para diferentes frequências; continuámos o estudo, pois, recorrendo às duas sondas (1 MHz e 2 MHz).

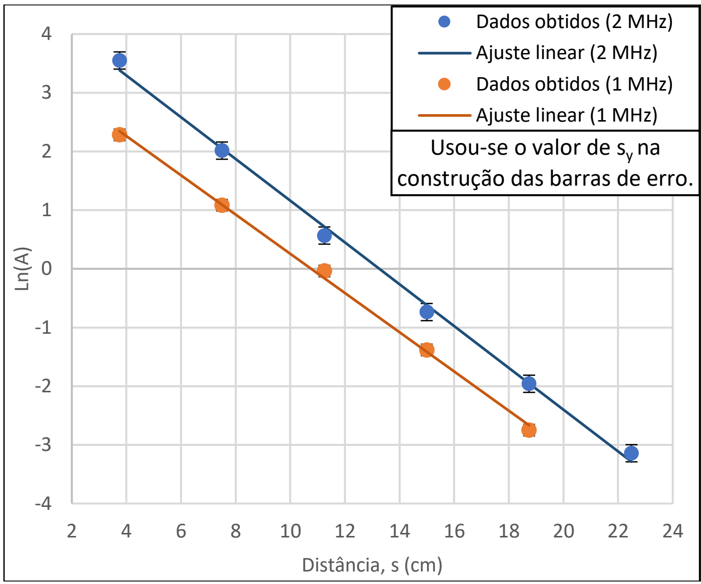


Figura 13 – Gráfico do logaritmo da amplitude dos picos, Ln(A), em função da distância, s, dos sinais (HF), e respetivo ajuste linear, para as sondas de 1 MHz e de 2 MHz.

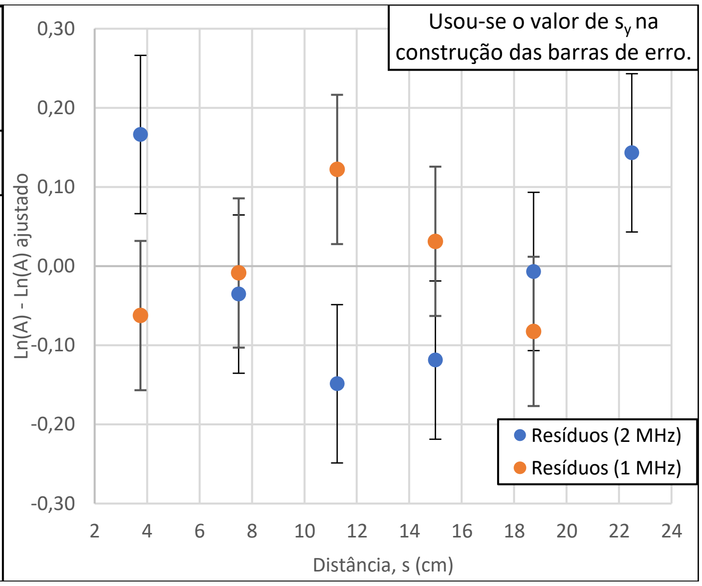


Figura 14 – Distribuição residual entre Ln(A) e Ln(A) ajustado, em função da distância, s, para as sondas de 1 MHz e de 2 MHz.

Na figura logo vemos a tendência aparentemente linear seguida pelos pontos.

Das regressões lineares, obtemos os parâmetros,

Ajuste linear – 1 MHz			
m	-0,334	3,6	b
s_m	0,008	0,1	s_b
r^2	0,998	0,09	s_y

Ajuste linear – 2 MHz			
m	-0,356	4,7	b
s_m	0,009	0,1	s_b
r^2	0,997	0,1	s_y

Tem-se, no caso da sonda de 1 MHz, $m = -0{,}334 \pm 0{,}008$ (i.r. de 2%) e $b = 3{,}6 \pm 0{,}1$ (i.r. de 3%), com s_y que, ainda que reduzido, foi usado na construção das barras de erro, por ser maior que os valores das incertezas associadas. Para 2 MHz, $m = -0{,}356 \pm 0{,}009$ (i.r. de 3%) e $b = 4{,}7 \pm 0{,}1$ (i.r. de 2%), com s_y também reduzido (o mesmo foi feito para as barras de erro). Em geral, as incertezas não diferem muito, de 1 MHz para 2 MHz, sendo a incerteza relativa sempre inferior a 5%.

Em ambos os casos, r^2 está próximo do valor ideal, sendo as distribuições residuais aleatórias (ou, pelo menos, é o que se faz parecer, não havendo pontos suficientes para concluir acerca de possíveis formas sistemáticas); consideramos, pois, os parâmetros de ajuste adequados ao estudo. Com $\mu = -m$,

Para a sonda de 1 MHz, $\boldsymbol{\mu_{exp\,1\,MHz} = 0,334 \pm 0,008\ \mathrm{cm}^{-1}}$ (i.r. de 2%)

Para a sonda de 2 MHz, $\boldsymbol{\mu_{exp\,2\,MHz_{exp}} = 0,356 \pm 0,009\ \mathrm{cm}^{-1}}$ (i.r. de 3%)

ou, convertendo,

Para a sonda de 1 MHz, $\boldsymbol{\mu_{exp\ 1\ MHz} = 2,90 \pm 0,07\ \mathrm{dBcm^{-1}}}$ (i.r. de 2%)

Para a sonda de 2 MHz, $\boldsymbol{\mu_{exp\ 2\ MHz_{exp}} = 3,09 \pm 0,08\ \mathrm{dBcm^{-1}}}$ (i.r. de 3%)

as quais se **desviam percentualmente dos $\boldsymbol{\mu_{ref}}$ associados** em **8%** e em **26%**, respetivamente. Vemos que são elevados (ainda mais em 2 MHz, que ultrapassa os 10%); isto poderá dever-se a dissipações (tanto no meio, como na água), e a imperfeições nos cilindros, os quais talvez tenham pequenas fendas, ou "espaços abertos" com ar, cujo μ é menor. Em alternativa, talvez os μ_{ref} usados não caracterizem adequadamente o acrílico dos nossos cilindros, já que o acrílico, enquanto material, é algo que pode variar muito em termos de características intrínsecas (a própria velocidade do som no acrílico difere numa gama considerável (2600-2800 m/s), dependendo de qual o tipo de acrílico específico em uso).

Posto isto, é possível notar que μ é tanto maior quanto maior é a frequência – será de esperar que, para o n do meio acrílico em uso, $\mu\ \alpha\ f^n$. Não tendo mais sondas com outras frequências com as quais poderíamos estudar esta dependência, não somos capazes de averiguar se esta proporcionalidade é totalmente verdade. Mas, pelo menos, podemos afirmar que $f_1 > f_2 \Rightarrow \mu_1 > \mu_2$, e, por isso, $f_1^n > f_2^n \Rightarrow \mu_1 > \mu_2$ (já que $1 \leq n \leq 2$). Se considerarmos $n =$ 1,8, então, para 1 MHz, $f_1^n =$ 1 MHz^2; para 2 MHz, $f_2^n =$ 3,5 MHz^2. Com o pouco que temos, uma constante de proporcionalidade próxima de 1/13 é o melhor que conseguimos extrapolar.

3.2. Avaliação do desempenho dos transdutores, a partir de *A-scan* e *B-scan*

Recorrendo ao fantoma paralelepipédico com inúmeros buracos, escolhemos os buracos 1, 6 e 10 para o estudo (ao 10 estão associados os buracos 10-1 e 10-2, assim chamados, pois consideramo-los um par, já que eram muito pequenos e estavam muito próximos) – foram registadas as suas dimensões, a ver na tabela 3.

Buraco no fantoma	Profundidade, d (mm) $\pm$ 0,03 mm	Diâmetro do buraco (mm) $\pm$ 0,03 mm
1	15,50	9,95
6	38,55	3,03
10-1	60,85	-
10-2	61,50	-
Altura do fantoma de acrílico = 80,750 $\pm$ 0,03 mm		Tudo isto foi medido com a craveira

Tabela 3 – Dados obtidos das profundidades (distância topo-início do buraco) dos buracos 1, 6 e 10 (10-1 e 10-2) no fantoma de acrílico usado no estudo, e respetivos diâmetros.

Na procura de estudar o sinal em função da profundidade (modo *depth*), revelou-se útil, uma vez mais, avaliar o poder de resolução das diferentes frequências; neste contexto, trata-se da **resolução espacial dos transdutores**, de cujos δs (obtidas nas meias alturas) se conclui acerca de se é melhor (se for reduzida; ou seja, pico estreito, na figura) ou se é pior (se maior; ou seja, se pico for mais larga) – a ver na figura 15.

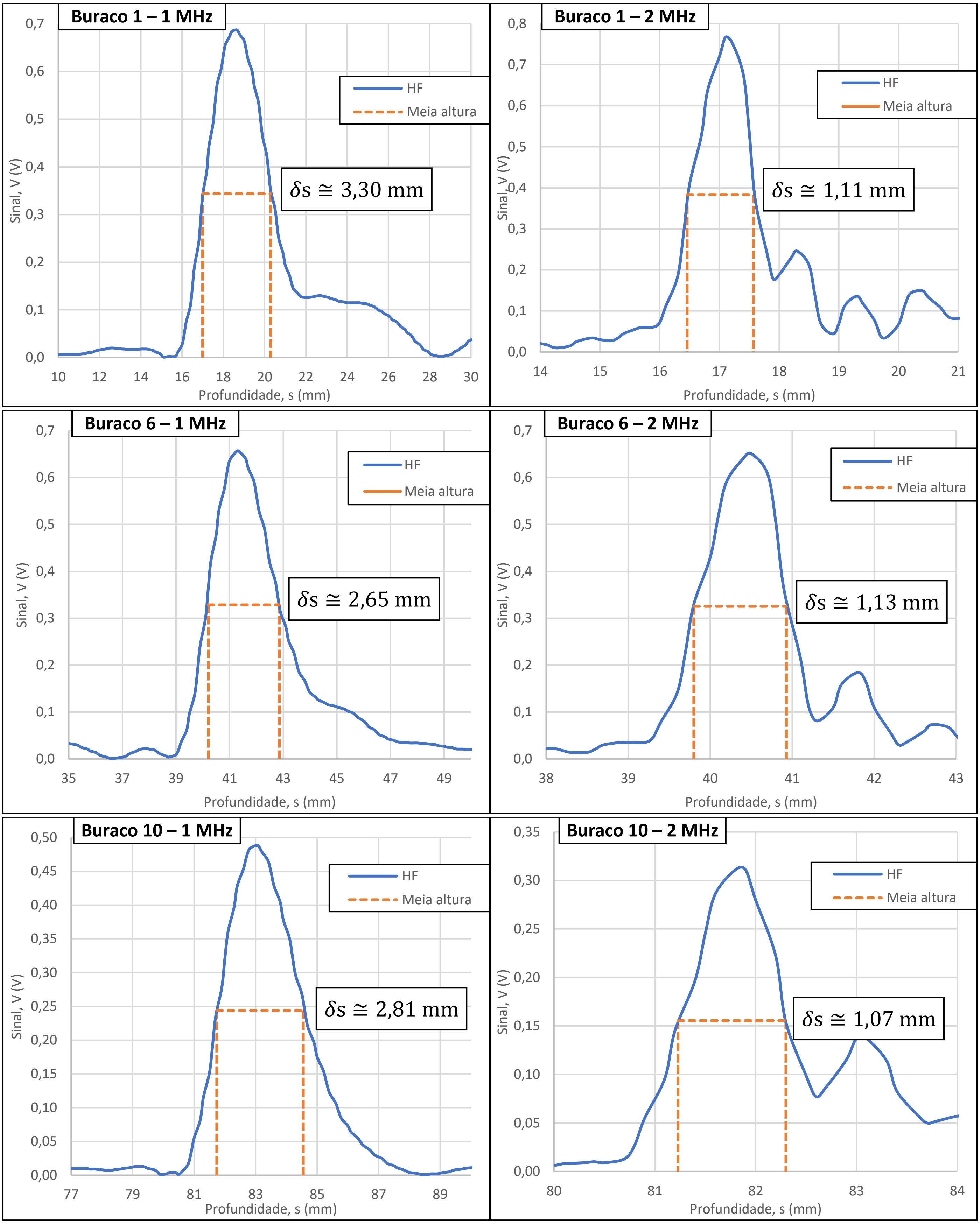


Figura 15 – Gráficos dos sinais ampliados nos picos e respetiva meia altura e δs associado, para as sondas de 1 MHz e de 2 MHz, no estudo dos buracos 1, 6, e 10-1 e 10-2.

Também aqui os valores são um tanto consistentes, com δs em 1 MHz sempre superior a δs em 2 MHz. De facto, vimos que para 1 MHz, $\boldsymbol{\delta s_{médio_{1\,MHz}}} \cong \mathbf{2,9 \pm 0,3\ mm}$ **(i.r. de 10%)** e que, para 2 MHz,

$\boldsymbol{\delta s_{médio_{2\,MHz}} \cong 1,10 \pm 0,02\ \mathrm{mm}}$ **(i.r. de 2%)**; conclui-se, assim, que também espacialmente falando, o poder de resolução das sondas de maiores frequências são melhores que as de menor frequências (o que é compatível com a ideia de que, para maior frequências, o comprimento de onda é menor, permitindo a distinção mais detalhada das características (falhas, por exemplo) do meio.

Para medidas em *A-scan*, obteve-se os gráficos dos sinais (dados na tabela 9, em anexo), cada um correspondente ao estudo de um dos buracos, a ver na figura 16 – nela estão assinaladas as profundidades correspondentes às medidas e registadas na tabela 3, por motivos de comparação.

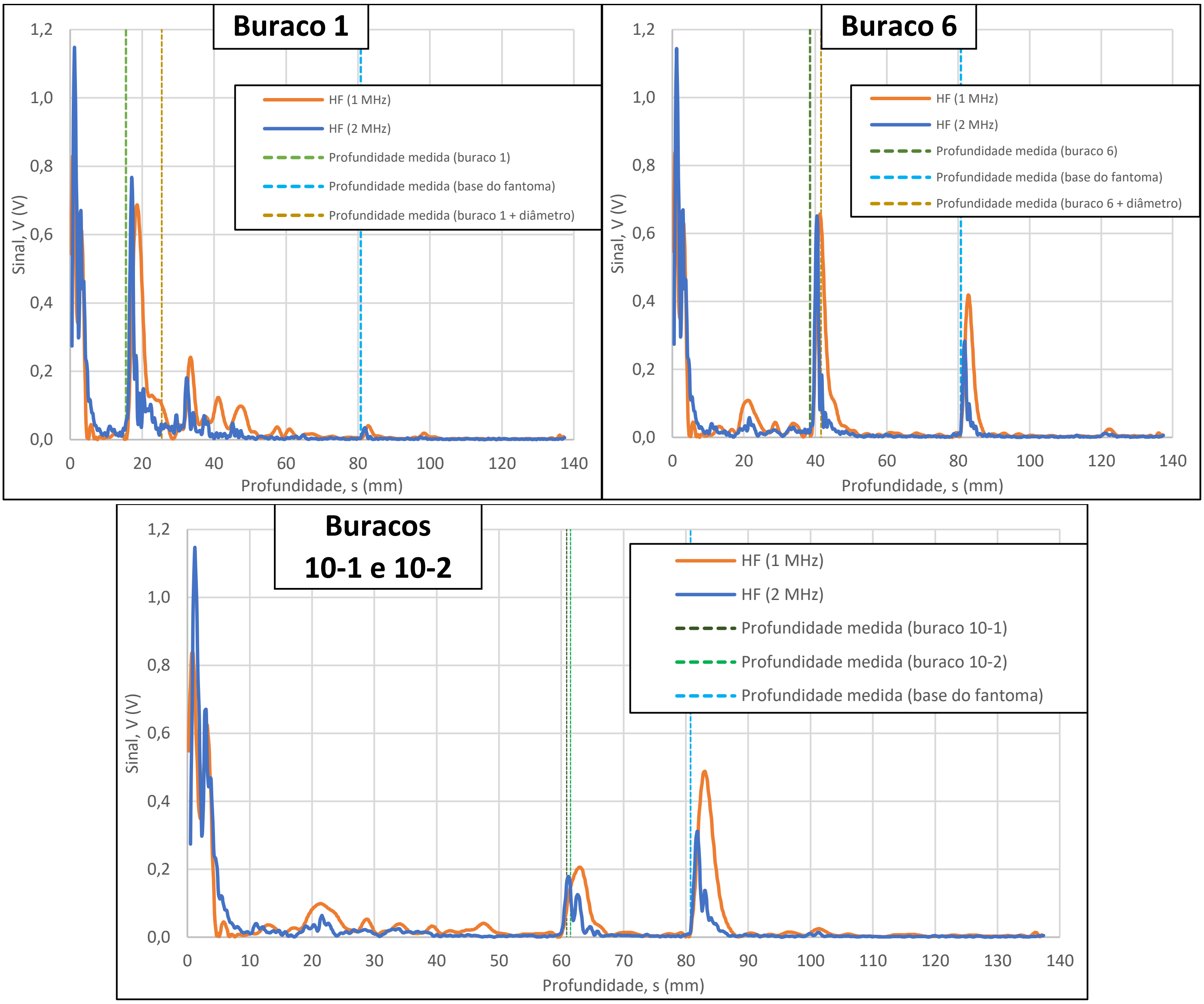


Figura 16 – Gráficos dos sinais (HF) obtidos em função da profundidade, s, e sinalização das profundidades medidas com a craveira, para as sondas de 1 MHz e de 2 MHz, no estudo dos buracos 1, 6, e 10-1 e 10-2.

Algo a salientar, desde logo, é a amplitude dos sinais ao longo da profundidade. Vemos que a de menor frequência (1 MHz) não sofre tanta atenuação que a de maior frequência (2 MHz); isto vai ao encontro da resolução espacial das sondas e da profundidade de penetração, a qual é inferior para maiores frequências (sofrendo maior atenuação) – o tal problema de $T_{máx} = f_{imp}^{-1} \Rightarrow 2 \times d_{máx} = v_{US} f_{imp}^{-1}$.

Dito isto, vemos ainda que existem picos que ocorrem em profundidades distintas das dos buracos e da base – isto indica-nos que ecos estão a ocorrer como consequência de reflexões e interações com possíveis imperfeições do meio – estes picos, contudo, são de reduzida intensidade e podem, em grande parte, ser tratadas até como ruido experimental – à exceção dos picos iniciais (os de maior amplitude em todos os gráficos, aqueles associados às menores profundidades) que, presumivelmente, se dão aquando da reflexão que ocorre na interface *transdutor-água-topo do cilindro*, retornando o eco de imediato para o detetor.

Já os picos de mais intensidade *quase* que coincidem com os das profundidades registadas e que esperávamos obter – estas diferenças poderão dever-se a defeitos do próprio transdutor enquanto dispositivo de deteção que demora algum tempo a mais a converter a onda em sinal elétrico. Contudo, é possível também que a configuração no *software* não tenha sido feita atribuindo os valores mais corretos (da velocidade do som, por exemplo) – aliás, nesta parte da atividade, os valores obtidos no laboratório (antes do tratamento mais aprofundado, fora do contexto de aula) foram de $v_{som_{\exp 1\,MHz}} = 2740{,}8$ m/s e $v_{som_{\exp 2\,MHz}} = 2736{,}9$ m/s e de $t_{2L\;1\,MHz} = 0{,}2$ µs e $t_{2L\;2\,MHz} = 0{,}4$ µs – que, então, foram atribuídos ao sistema. Nota-se, de facto, que diferem um pouco dos resultados finais.

Para medidas em *B-scan*, estudadas com a sonda de 1 MHz e com a de 2MHz, obtivemos as imagens presentes na figura 17.

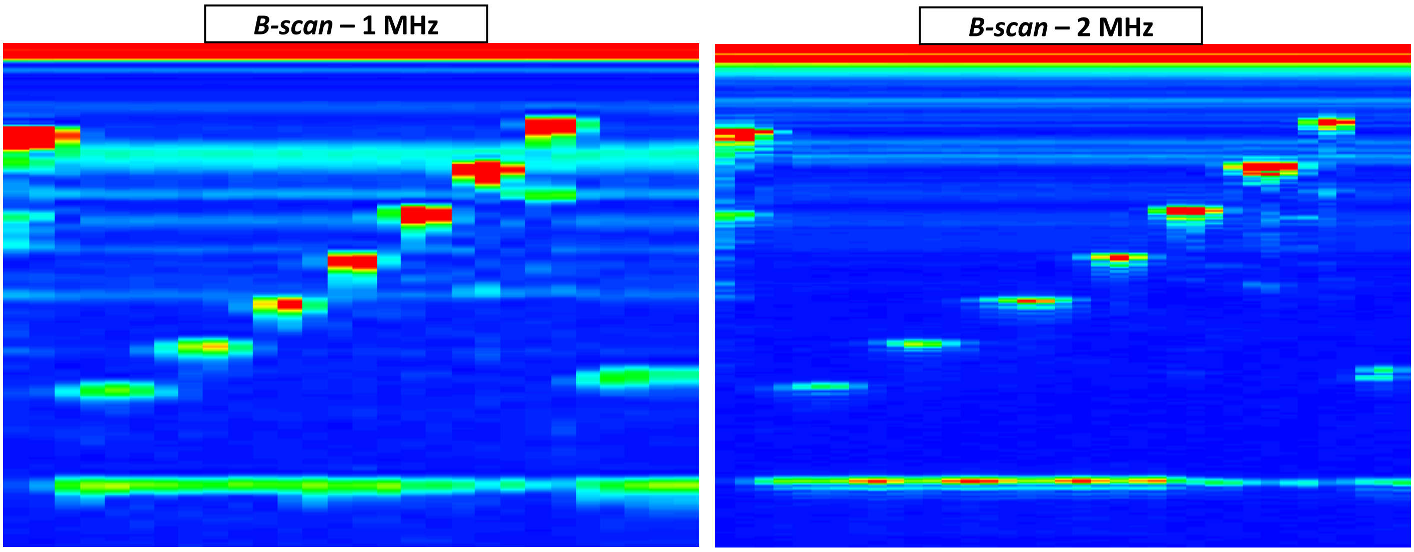


Figura 17 – Imagens captadas aquando do estudo da profundidade, medidas em *B-scan*, para as sondas de 1 MHz e de 2 MHz.

Vemos, de imediato, que o perfil de ambas as imagens se assemelha à secção do fantoma, tendo sido detetadas, a vermelho, regiões coincidentes com as dos buracos do mesmo (lembrando a figura 5).

Posto isto, no de 2 MHz, os vermelhos parecem estar contidos em zonas mais específicas e precisas, sendo possível fazer-se uma melhor distinção entre os diferentes buracos (especialmente os 10-1 e 10-2); para além disso, a própria qualidade de imagem é melhor em 2 MHz, sendo a de 1 MHz bastante mais *pixelizada*, com "blocos" de cores que não mostram gradientes (alterações de cor gradual) tão marcantes, evidenciando uma pior distinção de diferentes 'artefactos' (o que justifica a tal "grossura" das cores), por parte da sonda de 1 MHz – isto, claro, vai ao encontro da resolução espacial, a qual é tanto melhor quanto maior a frequência. A incapacidade de um ultrassom efetuar distinções entre obstáculos a escalas muitíssimo reduzidas relaciona-se com o maior comprimento de onda (menor frequência), como previamente asseverado e como agora corroborado imageticamente.

Outros aspetos, como o quanto as cores se estendem horizontalmente, não são tanto uma consequência da frequência da sonda, como são do facto de termos deslizado os transdutores com velocidades distintas e que, talvez, não fossem totalmente constantes durante todo o varrimento (podendo ter sofrido, às vezes, até, o tremer das mãos, já que foi um processo manual).

Por fim, e obtidos todos os resultados relevantes, revela-se útil sintetizá-los numa tabela pertinente (tabela 4).

Sonda usada	Velocidade do som experimental, $v_{som_{exp}}$ (x10³ ms⁻¹)	Incerteza relativa, IR (%)	Desvio percentual, DP (%)	Velocidade do som média pela expressão c_{calc} (x10³ ms⁻¹)	IR (%)	DP (%)	Tempo de atraso, t_{2L} (μs)	IR (%)	Coeficiente de atenuação, μ_{exp} (dBcm⁻¹)	IR (%)	DP (%)	$\delta t_{médio}$ na resolução temporal (μs)	IR (%)	Comparação qualitativa	$\delta s_{médio}$ na resolução espacial (mm)	IR (%)	Comparação qualitativa
1 MHz	$2,725 \pm 0,006$	0,2	0,2	$2,73 \pm 0,02$	0,7	0,02	$-0,1 \pm 0,1$	100	$2,90 \pm 0,07$	2	8	$2,4 \pm 0,2$	8	Pior	$2,9 \pm 0,3$	10	Pior
2 MHz	$2,745 \pm 0,005$	0,2	0,5	$2,75 \pm 0,02$	0,6	0,7	$0,2 \pm 0,1$	50	$3,09 \pm 0,08$	3	26	$0,82 \pm 0,04$	5	Melhor	$1,10 \pm 0,02$	2	Melhor

Tabela 4 – Dados obtidos das velocidades do som experimentais, dos coeficientes de atenuação, das resoluções temporal e espacial, para as sondas de 1 MHz e de 2 MHz, aquando do estudo no meio de acrílico.

4. Conclusões

Foi através desta experiência que viemos a aprender a manusear o transdutor piezoelétrico e a configurá-lo (desde definições no software de controlo até acoplamento adequado ao material de teste – cilindros) de um modo propício à visualização do sinal de impulsos e ecos em sonogramas (*A-scan*), e à obtenção experimental da velocidade do som no meio em estudo (acrílico, neste caso). De facto, recorrendo a sondas de 1 MHz e 2 MHz, tivemos $v_{som_{exp\ 1\ MHz}} = (2{,}725 \pm 0{,}006) \times 10^3\ \mathrm{ms^{-1}}$ (incerteza relativa de 0,2%) e $v_{som_{exp\ 2\ MHz}} = (2{,}745 \pm 0{,}005) \times 10^3\ \mathrm{ms^{-1}}$ (incerteza relativa de 0,2%), desviadas do $v_{ref\ acrílico}$ em 0,2% e 0,5%, respetivamente; similarmente, obtivemos da expressão teórica, $c_{calc\ 1\ MHz} = (2{,}73 \pm 0{,}02) \times 10^3\ \mathrm{ms^{-1}}$ (incerteza relativa de 0,7%) e $c_{calc\ 1\ MHz} = (2{,}75 \pm 0{,}02) \times 10^3\ \mathrm{ms^{-1}}$ (incerteza relativa de 0,6%), desviadas em 0,02% e 0,7% – todas estas exatidões, ótimas como são, evidenciam o quão adequada é a experiência adotada enquanto método de determinação da velocidade do som em materiais; deles também determinámos tempos de atraso (que nos permitem eliminar erros de deteção), $t_{2L\ 1\ MHz} = -0{,}1 \pm 0{,}1\ \mathrm{\mu s}$ (incerteza relativa de 100%), para 1MHz, e $t_{2L\ 2\ MHz} = 0{,}2 \pm 0{,}1\ \mathrm{\mu s}$ (incerteza relativa de 50%), para 2 MHz, que, reduzidos como são e envolvendo os 0 μs quando consideradas as incertezas (elevadas), nos indicam não ter sido registado qualquer tempo de atraso (talvez devido a alguma recalibração ou algum defeito na montagem).

Sabendo as distâncias percorridas e as amplitudes dos ecos associados, determinámos o coeficiente de atenuação no acrílico, tanto para 1 MHz, $\mu_{exp\ 1\ MHz} = 2{,}90 \pm 0{,}07\ \mathrm{dBcm^{-1}}$ (incerteza relativa de 2%), como para 2 MHz, $\mu_{exp\ 2\ MHz} = 3{,}09 \pm 0{,}08\ \mathrm{dBcm^{-1}}$ (incerteza relativa de 3%), os quais se desviam dos valores de referência em 8% e 26%, respetivamente (apesar de exatidões não ótimas – talvez devido a imperfeições do meio de propagação –, estas ainda corroboram a ocorrência de atenuação e o grau de intensidade a que acontece, sendo que confirmam, pelo menos qualitativamente, que $\mu\ \alpha\ f^n$ – aumenta com a frequência).

Fomos capazes também de perceber que maior frequência conduz a maior poder de resolução, quer temporal (tendo os δt de 2 MHz, $\delta t_{médio\ 2\ MHz} \cong 0{,}82 \pm 0{,}04\ \mathrm{\mu s}$, sido substancialmente menores que os de 1 MHz, $\delta t_{médio\ 1\ MHz} \cong 2{,}4 \pm 0{,}2\ \mathrm{\mu s}$), quer espacial (idem, para δs: $\delta s_{médio\ 2\ MHz} \cong 1{,}10 \pm 0{,}02\ \mathrm{\mu s}$

menor que $\delta s_{médio\ 1\ MHz} \cong 2{,}9 \pm 0{,}3$ μs); este último foi corroborado por imagens de melhor qualidade (melhor distinção de obstáculos) quando foi usada a sonda 2 MHz, aquando da determinação das profundidades de buracos num fantoma de acrílico, através de ultrassons, em B-scan.

5. Referências

[1] J. Seo e Y. Kim, "Ultrasound imaging and beyond: recent advances in medical ultrasound," *Biomedical engineering letters,* vol. 7, pp. 57-58, 14 Abril 2017.

[2] W. Melissa, L. Bricker e C. Mullan, "Ultrasound for fetal assessment in early pregnancy," *The Cochrane database of systematic reviews, 2015,* 14 Julho 2015.

[3] A. D'Amico e R. Pittenger, "A brief history of active sonar," *Aquatic Mammals,* vol. 35, pp. 426-434, 2009.

[4] AIRMAR - TECHNOLOGY CORPORATION, "Guide to Transducer Technology," 2009.

[5] Olympus IMS, "Material Sound Velocities," Olympus IMS, [Online]. Available: https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/thickness-gauge/appendices-velocities/. [Acedido em 09 11 2021].

[6] TESS expert - PHYWE, "Attenuation and velocity of ultrasound in solid in solid state materials (transmission)".

[7] Dep. Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, "Trabalho nº 7 - Caracterização de materiais através de ultra-sons," *Laboratório de Física 3 / DFA@FCUP,* 2021/2022.

6. Anexos

Anexo 1 – Tabelas

Cilindro 1							
1 MHz				2 MHz			
Tempo [µs] ± 0,1 us	**HF [V] ± 0,001 V**	**NF [V] ± 0,001 V**	**TGC [dB] ± 0,001 dB**	**Tempo [µs] ± 0,1 us**	**HF [V] ± 0,001 V**	**NF [V] ± 0,001 V**	**TGC [dB] ± 0,001 dB**
0,0	0,491	-0,056	0,262	0,0	0,283	-0,084	0,304
0,1	0,561	0,405	0,346	0,1	0,478	0,349	0,441
0,2	0,613	0,631	-0,157	0,2	0,728	0,727	0,021
0,3	0,643	0,169	0,241	0,3	0,972	0,484	0,315
0,4	0,647	-0,615	0,472	0,4	1,136	-0,338	0,315
0,5	0,629	-0,887	0,472	0,5	1,172	-1,047	0,315
0,6	0,589	-0,379	0,315	0,6	1,090	-1,081	0,315
0,7	0,536	0,306	0,157	0,7	0,946	-0,585	0,262
0,8	0,475	0,499	0,157	0,8	0,805	-0,085	0,178
0,9	0,415	0,235	0,157	0,9	0,692	0,174	0,157

Cilindro 2							
1 MHz				2 MHz			
Tempo [µs] ± 0,1 us	**HF [V] ± 0,001 V**	**NF [V] ± 0,001 V**	**TGC [dB] ± 0,001 dB**	**Tempo [µs] ± 0,1 us**	**HF [V] ± 0,001 V**	**NF [V] ± 0,001 V**	**TGC [dB] ± 0,001 dB**
0,0	0,492	-0,056	0,304	0,0	0,281	-0,087	0,157
0,1	0,562	0,406	0,378	0,1	0,476	0,346	0,304
0,2	0,614	0,633	-0,157	0,2	0,727	0,729	-0,136
0,3	0,643	0,172	0,199	0,3	0,976	0,488	0,157
0,4	0,647	-0,613	0,472	0,4	1,145	-0,340	0,157
0,5	0,628	-0,886	0,472	0,5	1,185	-1,057	0,157
0,6	0,589	-0,378	0,325	0,6	1,101	-1,089	0,157
0,7	0,535	0,309	0,210	0,7	0,951	-0,582	0,126
0,8	0,475	0,502	0,157	0,8	0,802	-0,075	0,042
0,9	0,415	0,236	0,168	0,9	0,685	0,178	0,073

Cilindro 3							
1 MHz				2 MHz			
Tempo [µs] ± 0,1 us	**HF [V] ± 0,001 V**	**NF [V] ± 0,001 V**	**TGC [dB] ± 0,001 dB**	**Tempo [µs] ± 0,1 us**	**HF [V] ± 0,001 V**	**NF [V] ± 0,001 V**	**TGC [dB] ± 0,001 dB**
0,0	0,538	-0,103	0,178	0,0	0,280	-0,084	0,189
0,1	0,664	0,282	0,315	0,1	0,473	0,344	0,315
0,2	0,775	0,738	0,073	0,2	0,721	0,722	0,000
0,3	0,864	0,680	0,210	0,3	0,964	0,487	0,157
0,4	0,926	-0,065	0,315	0,4	1,128	-0,328	0,210
0,5	0,955	-0,956	0,315	0,5	1,168	-1,038	0,262
0,6	0,954	-1,275	0,304	0,6	1,089	-1,079	0,199
0,7	0,926	-0,855	0,178	0,7	0,945	-0,586	0,157
0,8	0,877	-0,150	0,157	0,8	0,800	-0,082	0,136
0,9	0,819	0,332	0,157	0,9	0,683	0,177	0,157

Cilindro 4							
1 MHz				**2 MHz**			
Tempo [µs] ± 0,1 us	**HF [V] ± 0,001 V**	**NF [V] ± 0,001 V**	**TGC [dB] ± 0,001 dB**	**Tempo [µs] ± 0,1 us**	**HF [V] ± 0,001 V**	**NF [V] ± 0,001 V**	**TGC [dB] ± 0,001 dB**
0,0	0,549	-0,128	1,228	0,0	0,272	-0,065	1,260
0,1	0,654	0,296	1,333	0,1	0,463	0,339	1,417
0,2	0,742	0,787	0,966	0,2	0,701	0,701	1,018
0,3	0,805	0,687	1,165	0,3	0,931	0,510	1,260
0,4	0,837	-0,123	1,260	0,4	1,089	-0,234	1,281
0,5	0,838	-0,949	1,260	0,5	1,139	-0,952	1,270
0,6	0,808	-1,045	1,260	0,6	1,090	-1,107	1,281
0,7	0,752	-0,445	1,155	0,7	0,987	-0,729	1,260
0,8	0,678	0,182	1,113	0,8	0,876	-0,228	1,165
0,9	0,594	0,368	1,102	0,9	0,776	0,124	1,197

Tabela 5 – Dados obtidos (pequena porção, apenas) de HF, NF, TGC, em cada instante de tempo, t, para os 4 cilindros, para 1 MHz e para 2 MHz.

Cilindro 1					
1 MHz			**2 MHz**		
Tempos dos máximos, t [µs] ± 0,1 us	**Diferenças dos tempos, Δt [µs] ± 0,1 us**	**Média dos Δt (µs)**	**Tempos dos máximos, t [µs] ± 0,1 us**	**Diferenças dos tempos, Δt [µs] ± 0,1 us**	**Média dos Δt (µs)**
1,3	14,0	13,8	0,5	14,2	13,9
15,3	13,8	**Desv.Pad (µs)**	14,7	13,8	**Desv.Pad (µs)**
29,1	13,7	0,1	28,5	13,8	0,2
42,8	13,8	**Prop. erros (µs)**	42,3	13,9	**Prop. erros (µs)**
56,6	13,9	0,03	56,2	14,0	0,02
70,5			70,2		

Cilindro 2					
1 MHz			**2 MHz**		
Tempos dos máximos, t [µs] ± 0,1 us	**Diferenças dos tempos, Δt [µs] ± 0,1 us**	**Média dos Δt (µs)**	**Tempos dos máximos, t [µs] ± 0,1 us**	**Diferenças dos tempos, Δt [µs] ± 0,1 us**	**Média dos Δt (µs)**
1,3	29,4	29,2	0,5	29,5	29,2
30,7	29,2	**Desv.Pad (µs)**	30,0	29,1	**Desv.Pad (µs)**
59,9	29,1	0,1	59,1	29,1	0,2
89,0		**Prop. erros (µs)**	88,2		**Prop. erros (µs)**
		0,05			0,06

Cilindro 3					
1 MHz			**2 MHz**		
Tempos dos máximos, t [µs] ± 0,1 us	**Diferenças dos tempos, Δt [µs] ± 0,1 us**	**Média dos Δt (µs)**	**Tempos dos máximos, t [µs] ± 0,1 us**	**Diferenças dos tempos, Δt [µs] ± 0,1 us**	**Média dos Δt (µs)**

1,2	59,0	59,0	1,2	58,3	58,3
60,2		Desv.Pad (μs)	59,4		Desv.Pad (μs)
		0			0
		Prop. erros (μs)			Prop. erros (μs)
		0,1			0,1

Cilindro 4					
1 MHz			2 MHz		
Tempos dos máximos, t [µs] ± 0,1 us	Diferenças dos tempos, Δt [µs] ± 0,1 us	Média dos Δt (μs)	Tempos dos máximos, t [µs] ± 0,1 us	Diferenças dos tempos, Δt [µs] ± 0,1 us	Média dos Δt (μs)
1,3	88,4	88,4	1,2	87,4	13,9
89,7		Desv.Pad (μs)	88,5		Desv.Pad (μs)
		0			0
		Prop. erros (μs)			Prop. erros (μs)
		0,1			0,1

Tabela 6 – Dados obtidos dos tempos nos quais os picos ocorrem, t, e as diferenças entre os vários t obtidos e respetiva média e incertezas, no estudo dos quatro cilindros, para 1 MHz e para 2 MHz.

1 MHz				2 MHz			
$\overline{h_{cilindro}}$ (mm)	u($\overline{h_{cilindro}}$) (mm)	$\overline{\Delta t}$ (us)	u($\overline{\Delta t}$) (us)	$\overline{h_{cilindro}}$ (mm)	u($\overline{h_{cilindro}}$) (mm)	$\overline{\Delta t}$ (us)	u($\overline{\Delta t}$) (us)
18,74	0,01	13,8	0,1	18,74	0,01	13,9	0,2
40,00	0,08	29,2	0,1	40,00	0,08	29,2	0,2
80,47	0,02	59,0	0,1	80,47	0,02	58,9	0,1
120,50	0,02	88,4	0,1	120,50	0,01	88,0	0,1

Tabela 7 – Dados obtidos das distâncias médias (valores das alturas médias de cada cilindro, $\overline{h_{cilindro}}$) e dos Δt médios associados, e respetivas incertezas, para 1 MHz e para 2 MHz.

1 MHz			2 MHz		
Distância, s (mm)	Ln(A)	u(Ln(A))	Distância, s (mm)	Ln(A)	u(Ln(A))
3,748	2,282	0,003	3,748	3,549	0,003
7,497	1,083	0,003	7,497	2,014	0,003
11,245	-0,039	0,003	11,245	0,567	0,004
14,994	-1,382	0,005	14,994	-0,737	0,004
18,742	-2,75	0,02	18,742	-1,959	0,008
			22,490	-3,14	0,02

Tabela 8 – Dados obtidos do logaritmo da amplitude dos picos, e respetiva distância s, para 1 MHz e para 2 MHz.

Buraco 1	
1 MHz	2 MHz

depth [mm] ± 0,1 mm	HF [V] ± 0,001 V	NF [V] ± 0,001 V	TGC [dB] ± 0,001 dB	depth [mm] ± 0,1 mm	HF [V] ± 0,001 V	NF [V] ± 0,001 V	TGC [dB] ± 0,001 dB
0,2	0,544	-0,129	0,787	0,5	0,274	-0,069	1,113
0,3	0,649	0,290	0,934	0,6	0,467	0,342	1,260
0,5	0,736	0,781	0,556	0,8	0,708	0,707	0,945
0,6	0,798	0,686	0,787	0,9	0,941	0,505	1,102
0,7	0,830	-0,118	0,850	1,1	1,101	-0,258	1,123
0,9	0,830	-0,942	0,871	1,2	1,148	-0,975	1,176
1,0	0,800	-1,039	0,819	1,3	1,092	-1,105	1,144
1,2	0,745	-0,443	0,787	1,5	0,980	-0,700	1,102
1,3	0,670	0,178	0,651	1,6	0,861	-0,196	1,092
1,4	0,587	0,360	0,682	1,7	0,756	0,137	1,102

Buraco 6							
1 MHz				**2 MHz**			
***depth* [mm] ± 0,1 mm**	**HF [V] ± 0,001 V**	**NF [V] ± 0,001 V**	**TGC [dB] ± 0,001 dB**	**depth [mm] ± 0,1 mm**	**HF [V] ± 0,001 V**	**NF [V] ± 0,001 V**	**TGC [dB] ± 0,001 dB**
0,2	0,548	-0,128	1,260	0,5	0,274	-0,068	1,123
0,3	0,654	0,295	1,407	0,6	0,467	0,342	1,260
0,5	0,742	0,788	1,018	0,8	0,708	0,707	0,955
0,6	0,804	0,690	1,249	0,9	0,940	0,505	1,113
0,7	0,837	-0,119	1,291	1,1	1,098	-0,256	1,165
0,9	0,837	-0,946	1,291	1,2	1,144	-0,972	1,186
1,0	0,807	-1,044	1,270	1,3	1,089	-1,104	1,165
1,2	0,751	-0,445	1,228	1,5	0,981	-0,703	1,102
1,3	0,677	0,182	1,176	1,6	0,866	-0,201	1,092
1,4	0,594	0,367	1,186	1,7	0,761	0,137	1,102

Buraco 10 (10-1 e 10-2)							
1 MHz				**2 MHz**			
***depth* [mm] ± 0,1 mm**	**HF [V] ± 0,001 V**	**NF [V] ± 0,001 V**	**TGC [dB] ± 0,001 dB**	**depth [mm] ± 0,1 mm**	**HF [V] ± 0,001 V**	**NF [V] ± 0,001 V**	**TGC [dB] ± 0,001 dB**
0,2	0,548	-0,128	1,155	0,5	0,274	-0,068	1,249
0,3	0,653	0,296	1,270	0,6	0,468	0,344	1,396
0,5	0,741	0,788	0,945	0,8	0,711	0,709	0,955
0,6	0,804	0,689	1,102	0,9	0,943	0,506	1,260
0,7	0,836	-0,120	1,260	1,1	1,101	-0,257	1,260
0,9	0,837	-0,947	1,260	1,2	1,147	-0,975	1,260
1,0	0,807	-1,044	1,239	1,3	1,093	-1,107	1,260
1,2	0,751	-0,445	1,102	1,5	0,986	-0,707	1,207
1,3	0,677	0,181	1,102	1,6	0,871	-0,202	1,134
1,4	0,594	0,367	1,102	1,7	0,766	0,139	1,165

Tabela 9 – Dados obtidos (apenas uma pequena porção) da profundidade, *depth*, e de HF, NF, TGC, no estudo dos buracos 1, 6, e 10-1 e 10-2, para 1 MHz e para 2 MHz – na parte B do trabalho, A-Scan.

Anexo 2 – Cálculos das incertezas (e outros cálculos complementares)

É de salientar que grande parte destas expressões são provenientes da fórmula da propagação de erros.

No cálculo de $u(\Delta t)$:

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i$$

$$u(\Delta t) = \pm\sqrt{u^2(t_{i+1}) + u^2(t_i)}$$

Como, no caso desta atividade, $u(t_i) = u(t_{i+1}) = 0{,}1$ µs, então,

$$u(\Delta t) = \pm 0{,}1 \text{ µs}$$

No cálculo de $u(\overline{\Delta t})_{pde}$:

$$\overline{\Delta t} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \Delta t_i = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \cdots + \Delta t_n}{n}$$

$$u(\overline{\Delta t})_{pde} = \pm\sqrt{\sum_{i}^{n}\left(\frac{\partial \overline{\Delta t}}{\partial \Delta t_i}\right)^2 \cdot u^2(\Delta t_i)} = \pm\frac{1}{n}\cdot\sqrt{u^2(\Delta t_1) + \cdots + u^2(\Delta t_n)}$$

Como $u(\Delta t) = \pm 0{,}1$ µs, em todos os casos, então,

$$u(\overline{\Delta t})_{pde} = \pm\frac{0{,}1}{\sqrt{n}}\ \mu s$$

Valor a ser usado, se este for superior ao valor do desvio padrão da média; caso contrário, uso este último.

No cálculo de $u\left(\overline{h_{cilindro}}\right)_{pde}$:

Análogo ao cálculo de $u(\overline{\Delta t})_{pde}$, ainda com a condição de usar o valor se for superior ao do desvio padrão da média; caso contrário, uso este último.

No cálculo de $u\left(v_{som_{exp}}\right)$:

$$v_{som_{exp}} = c = \frac{2}{m(declive)}$$

$$u\left(v_{som_{exp}}\right) = u(c) = \pm\frac{2}{m^2}\cdot u(m)$$

No cálculo de $u\left(v_{som_{calc}}\right)$:

$$v_{som_{calc}} = c_{calc} = 2\cdot\frac{(s_1 - s_2)}{(t_1 - t_2)}$$

$$u\left(v_{som_{calc}}\right) = u(c_{calc}) = \pm 2\sqrt{\left(\frac{1}{t_1 - t_2}\right)^2 \cdot \left(u^2(s_1) + u^2(s_2)\right) + \left(\frac{s_1 - s_2}{(t_1 - t_2)^2}\right)^2 \left(u^2(t_1) + u^2(t_2)\right)}$$

No cálculo de $u(V_{normalizado})$:

$$V_{norm_i} = V_i \times 10^{\frac{(dB_{máx} - dB_i)}{20}}$$

Sendo "dB_i" o valor de TGC e V_i o de HF medidos em cada instante t_i.

$$u\left(V_{norm_i}\right) = \pm\sqrt{\left(10^{\frac{(dB_{máx}-dB_i)}{20}}\right)^2 \cdot u^2(V_i) + \left(\ln(10) \cdot V_i \times 10^{\frac{(dB_{máx}-dB_i)}{20}}\right)^2 \cdot \left(u^2(dB_{máx}) + u^2(dB_i)\right)^2}$$

Sendo $u(dB_{máx}) = u(dB_i) = 0{,}001 \text{ dB}$

No cálculo de $\boldsymbol{u\left(\ln\left(V_{norm_i}\right)\right)}$:

$$u\left(\ln\left(V_{norm_i}\right)\right) = \pm\frac{u\left(V_{norm_i}\right)}{V_{norm_i}}$$

No cálculo de $\boldsymbol{u(\mu_{exp})}$:

Se em cm^{-1},

$$\mu = m(declive)$$
$$u(\mu) = u(m)$$

Se em dB/cm,

$$\mu[\text{dBcm}^{-1}] = \mu[\text{cm}^{-1}] \cdot 20\log_{10}(e)$$
$$u(\mu[\text{dBcm}^{-1}]) = \pm u(\mu[\text{cm}^{-1}]) \cdot 20\log_{10}(e)$$

Nos desvios percentuais:

$$Desvio\ percentual = \frac{\left|X_{referência} - X_{experimental}\right|}{X_{referência}} \times 100\ (\%)$$

Nas incertezas relativas:

$$Incerteza\ relativa = \frac{u(X)}{X} \times 100\ (\%)$$

Anexo 3 – Registos no Logbook

Laboratório de Física III
Trabalho nº 7
Caracterização de materiais através de ultrassons
Francisco Samuel Neves Fidalgo
PL5

201907354

Objetivos

— Aprender a manusear transdutores piezo-elétricos para gerar e captar ondas sonoras.

— Estudar a atenuação de ultrassons em materiais e a sua dependência relativamente à frequência acústica.

— Avaliar o poder de resolução em função da frequência.

— Compreender a informação de varrimentos "A-scan" e "B-scan" ultrassónicos.

Fundamento teórico

É o transdutor piezo-elétrico gera impulsos ultrassónicos com frequência f_{US} e cujas ondas de pressão (variável), sonoras, são detetadas, uma vez refletidas, pelo cristal do transdutor, levando à geração de sinais elétricos (sinais ultrassons).

O tempo de viagem (voo) do impulso (desde que é emitido até que retorna e é detetado) possibilita o estudo das formas e das dimensões de objetos inseridos em meios materiais.

A nota que $T_{max} = f_{imp}^{-1}$, sendo a profundidade máxima $2 \times d_{max} = v_{US} f_{imp}^{-1}$, pois o tempo máximo de espera é condicionado pela repetição periódica da geração de impulsos.

Resolução espacial axial ≡ menor distância entre dois pontos que são distinguíveis.

Num material de faces paralelas a velocidade do som pode determinar-se no material c:
$$c = \frac{2s}{t}, \text{ contudo, } c = \frac{2(s_1 - s_2)}{t_1 - t_2} \text{ é preferível,}$$
pois elimina o erro da incerteza do detetor.

Com $s = \frac{1}{2} c \Delta t$ e $t_{2L} = t - \frac{2s}{c}$, tem-se a medida calibrada da
(posição extração espessura) localização/profundidade z: $z = \frac{1}{2} c (t - t_{2L})$

Também a atenuação da onda cuja amplitude é A pode ser obtida (o coeficiente) da lei
$$A = A_0 \exp(-\mu s) \iff \ln\left(\frac{A}{A_0}\right) = -\mu \cdot s$$

1

3

Perguntas da Preparação do Trabalho

a. $v_{som_{acrílico\ ref}} = 2730\ m/s$ olympus-ims.com

1. Com $c = \lambda f_{US} \Leftrightarrow \lambda = \frac{c}{f_{US}} \rightarrow \lambda_{1MHz} = \frac{2730}{10^6} = 2{,}730 \times 10^{-3}\ m$ ✓

$\lambda_{2MHz} = \frac{2730}{2 \times 10^6} = 1{,}365 \times 10^{-3}\ m$

2. $T = \frac{1}{f_{US}} \rightarrow T_{1MHz} = 10^{-6}\ s$

$T_{2MHz} = 5 \times 10^{-7}\ s$

b. $Z_{acrílico} = 3{,}15 \times 10^6\ kg/m^2 s$ a $3{,}51 \times 10^6\ kg/m^2 s$

$Z_{ar} = 430\ kg/m^2 s$

$Z_{água} = 1{,}483 \times 10^6\ kg/m^2 s$

1. $R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \rightarrow R_{água-acrílico} = 0{,}129$

$R_{água-ar} = 0{,}9988$

$R_{ar-acrílico} = 0{,}9995$

2. i) $T = 1 - R = 1 - 0{,}9995 = 0{,}0005$

ii) $T = 1 - R = 1 - 0{,}129 = 0{,}871$

c. 1. $\frac{A_0}{A} = \exp(\mu \cdot s)$ e $\frac{A_0}{A} = 10^{\frac{dB}{20}}$

$e^{\mu \cdot s} = 10^{dB/20} \Leftrightarrow \log_{10}(e^{\mu s}) = dB/20 \Leftrightarrow$

$\Leftrightarrow \mu s \log_{10}(e) = dB/20 \Leftrightarrow \mu_{\text{em } cm^{-1}} = \left(\frac{1}{20 \log_{10}(e)}\right)\underbrace{\left(\frac{dB}{s}\right)}_{\mu \text{ em } dB/cm} \Rightarrow \mu[cm^{-1}] = \left(\frac{1}{20 \log_{10}(e)}\right)\mu[dB/cm]$

$\Leftrightarrow \mu[dB/cm] = 20 \log_{10}(e)\ \mu[cm^{-1}]$

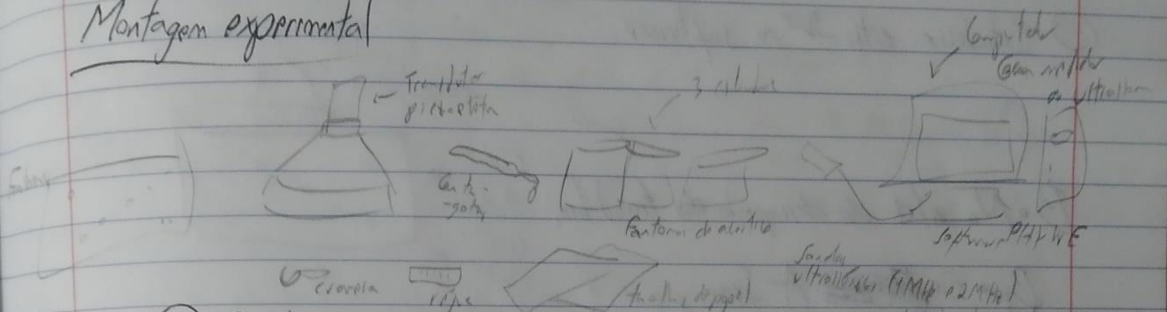
2. $\mu_{1MHz\ ref} = 3{,}15\ dB/cm$ $\mu_{2MHz\ ref} = 4{,}17\ dB/cm$

3. Com o TGC poderemos "normalizar" a amplitude do sinal através de $V_{original_i} \times 10^{\left(\frac{dB_{máx} - dB_i}{20}\right)} = V_{ajustado_i}$, tal que dB_i se obtém dos valores em TGC.

Só uma vez normalizado é que podemos usar o valor das amplitudes para obter μ do $\ln(A)$ vs. s.

2

Montagem experimental

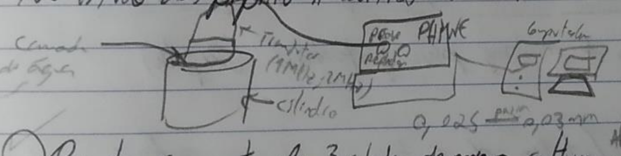


○ Registar os números de série dos transdutores usados. Quais são? SN: 1-007 , 1-059

○ Abrir programa Measure Ultra Echo → Menu options → parâmetros → Desativar "time shift enabled"

Notícia ○ Limpar fantomas e sondas com água imediatamente após o seu uso; não usar álcool/ou outro solvente

A • No estudo das propriedades acústicas do acrílico (com sinais A-scan)



Micrómetro Mitutoyo

0,025 passo 0,03 mm

Altura 1° { 18,740 ± 0,005 mm ; 18,725 ± 0,005 ; 18,760 ± 0,005 } , { 39,900 ± 0,025 ; 40,100 ± 0,025 ; 40,000 ± 0,025 }

○ Registar comprimento dos 3 cilindros de menor altura.

e { 40,500 ± 0,025 ; 40,450 ± 0,025 ; 40,450 ± 0,025 } ; diâmetros (1°) { 40,55 ± 0,025 mm ; 40,500 ± 0,025 ; 40,600 ± 0,025 } , (2°) { 40,250 ± 0,025 mm ; 40,400 ± 0,025 mm ; 40,250 ± 0,025 } , (3°) { 40,500 ± 0,025 ; 40,250 ± 0,025 ; 40,250 ± 0,025 }

○ Ligar Sonda de 1MHz à entrada "Probe (Reflection)" e posicionar seletor em "Reflection".

○ Acoplar a sonda a um dos menores cilindros de teste com uma pequena gota de água.

○ Measure Ultra Echo → ajustar parâmetros do transmissor e recetor $\xrightarrow{\text{para que}}$ altura do pico preenche pelo menos 75% da amplitude da janela.

2740,6 m/s ±0,1

○ Ver sinal; explorar menus.

○ Se houver osciloscópio → ver e analizar sinais disponíveis nas saídas BNC do equipamento Echoscope.

○ Recolher → período das ondas ultrassónicas refletidas
→ largura do impulso ultrassónico → determinar a posição dos pontos a 50% da máxima amplitude envolvente.

○ Interpretar sinal obtido

○ Identificar medidas que permitem obter → rapidez do som no acrílico
→ tempo de atraso da sonda

3 ○ Realizar medidas para os 3 cilindros

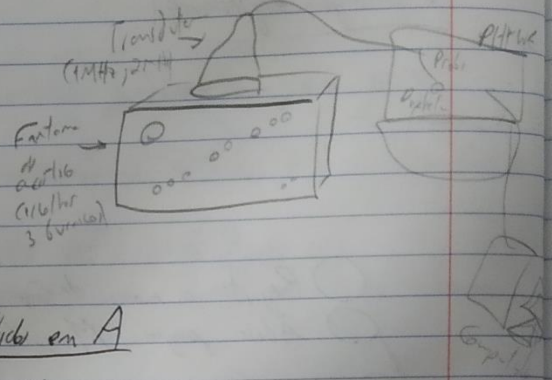
! → ○ Guardar ~~o~~ sinal no computador.

○ Estimar o coeficiente de atenuação do acrílico (ver em modo HF+Amp, talvez)

→ ○ Repetir últimos 6 passos (a partir do "Recolher") para a sonda de 2 MHz.

○ Estimar a velocidade do som e dos tempos de atraso dos transdutores.

○ Introduzir estes → no software.



B • No estudo do desempenho dos transdutores

B_1 • Em [illegible] A-Scan

○ Reconfigurar software usando os valores obtidos em A

○ parâmetros US velocity ← junto A-Scan

○ Ativar e inserir os valores de time shift em parameters.

○ Alterar modo de visualização para profundidade (Depth)

○ Escolher 3 defeitos/estruturas do fantoma para [illegible] adequados ao estudo

○ A-Scan → determinar as posições de localização dos defeitos/estruturas escolhidos e suas dimensões

○ Repetir com a sonda de 1 MHz probe

! → ○ Usar V água (ou craveira) para determinar ↓ e ↓.

B_2 • Em B-Scan

○ Ligar a sonda US (1MHz ou 2MHz)

○ Acoplar junto a uma das extremidades das faces longas do fantoma

→ ○ Aplicar camada muito fina de gel ao longo de toda a face

1 ○ Selecionar modo "B-Mode" → visualização dos ecos como imagem de brilho

2 ○ Aquisição → iniciar no "start"

3 ○ Mover a sonda de forma estável e controlada ao longo do bloco

4 ○ Terminar aquisição quando atingir o extremo do bloco → botão "Stop"

○ Repetir para a outra sonda

5

Cilindro 1 (o mais pequeno)

Entre máximo: Cursor 1 → 42,9 μs Cursor 2 → 56,8 μs Difference → 13,9 μs

Cursor 1 → 14,9 μs Cursor 2 → 28,9 μs Diff → 14,0 μs

Cursor 2 → 57,0,5 μs

Atualizámos o ganho

Amplitude ≈ 1,379 V

Meia altura ≈ 14,1 μs — 18,2 μs

Largura ≈ 4,1 μs

Sound v_{el} = 2740,6 m/s

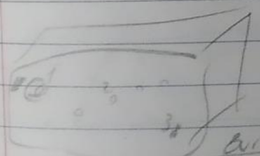
Parte 2 — ... 2 MHz → v = 2736,9

→ tempo de atraso =

medidos repetidamente em cada

1 MHz → v = 2740,8

tempo de atraso =

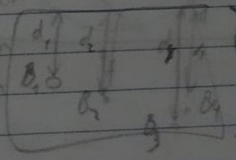


Buraco 1 → d_1 = 15,500 ± 0,025 mm

Buraco 2 → d_2 = 38,550 ± 0,025 mm

Buraco 3 → d_3 = 61,500 ± 0,025 mm

Buraco 4 → d_4 = 60,850 ± 0,025 mm



} 80,750 ± 0,025 mm

Parte dos dados nos ficheiros