

## **2º Trabalho Prático: COMO FUNCIONA O SONAR - MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM NO AR<sup>1</sup>**

### **1. O conhecimento do fundo dos mares**

Os oceanos e mares cobrem cerca de 70% da <sup>exto</sup>superfície do Globo e os seus fundos não estão diretamente acessíveis à observação humana. De facto, a 100 m de profundidade toda a radiação electromagnética emitida à superfície já foi absorvida (em particular a luz visível) e o homem apenas pode investigar diretamente estas zonas mediante custosos meios submersíveis e usando luz artificial. No entanto, a investigação dos fundos marinhos é essencial para o geólogo:

- para conhecer a natureza dos fundos
- para conhecer a forma dos fundos

A forma dos fundos é reveladora dos processos tectónicos e sedimentares a que essas regiões estiveram e estão sujeitas, às escalas local e regional. Na sua maior parte estes processos são os atuais ou recentes, mas os fundos marinhos também revelam processos que operam à escala global e ao longo das épocas geológicas, como a tectónica de placas (o fundo oceânico mais antigo tem “apenas” 180 milhões de anos, 180 Ma).

O conhecimento mais elementar relativamente ao fundo dos oceanos é a sua profundidade, também designada por batimetria. Antes de 1920 as sondagens batimétricas eram realizadas largando uma massa agarrada a um cabo e medindo o comprimento desse cabo que era desenrolado até se atingir o fundo. Trata-se de um processo bastante moroso, sobretudo em regiões de grandes fundos, as medidas eram muito espaçadas e a sua localização era bastante imprecisa. A figura 1 mostra um mapa batimétrico realizado em meados do século XIX. A figura 2 ilustra o conhecimento atual que temos da mesma região.

### **2. O princípio de funcionamento do sonar**

Foi apenas a partir de 1920 que a propagação do som na água passou a ser usada de forma corrente na medição da profundidade dos oceanos. Este desenvolvimento só foi possível porque, ao contrário das ondas electromagnéticas, o som sofre na água uma atenuação muito menor.

---

<sup>1</sup>Trabalho inspirado num dos protótipos desenvolvidos pelo projeto Nónio “O Oceano no Laboratório Escolar” (ver <http://nonio.fc.ul.pt/oceano/index.htm>). Este projeto foi apoiado pelo programa Ciência Viva e foi desenvolvido pelo IO (coordenação da Professora Doutora Isabel Âmbar) e pelo Departamento de Física da FCUL (Prof. Jorge Alves). Montagem realizada pelo Prof. Joaquim Dias.

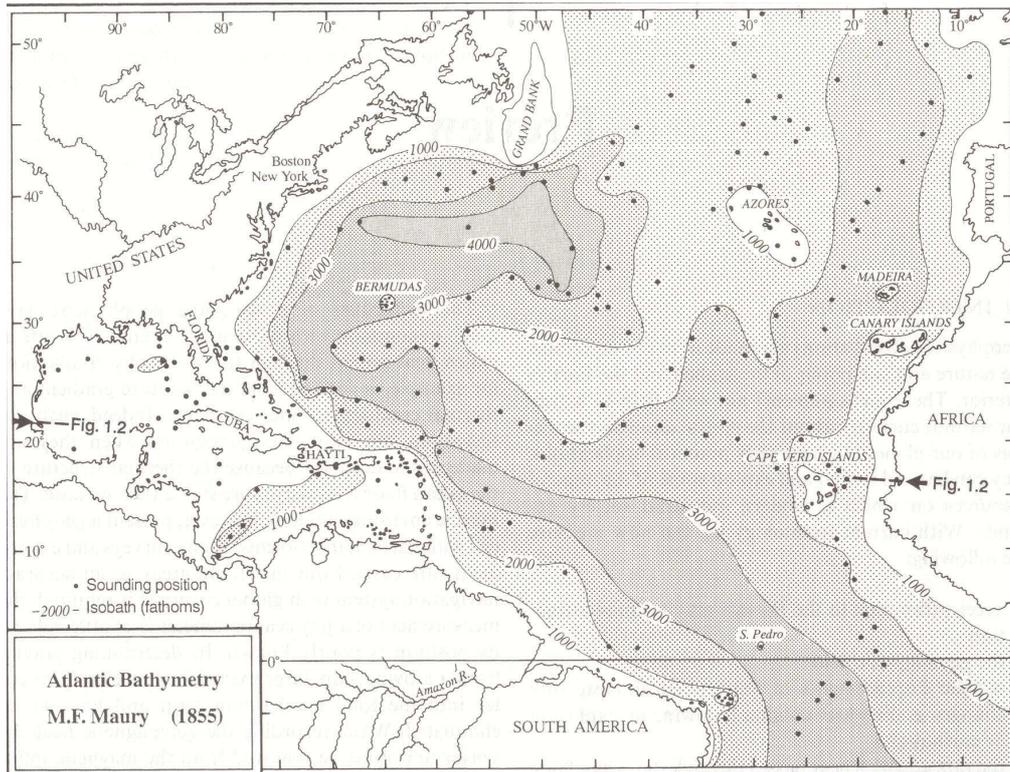


Figura 1 – Mapa batimétrico do Atlântico Central produzido em 1855.

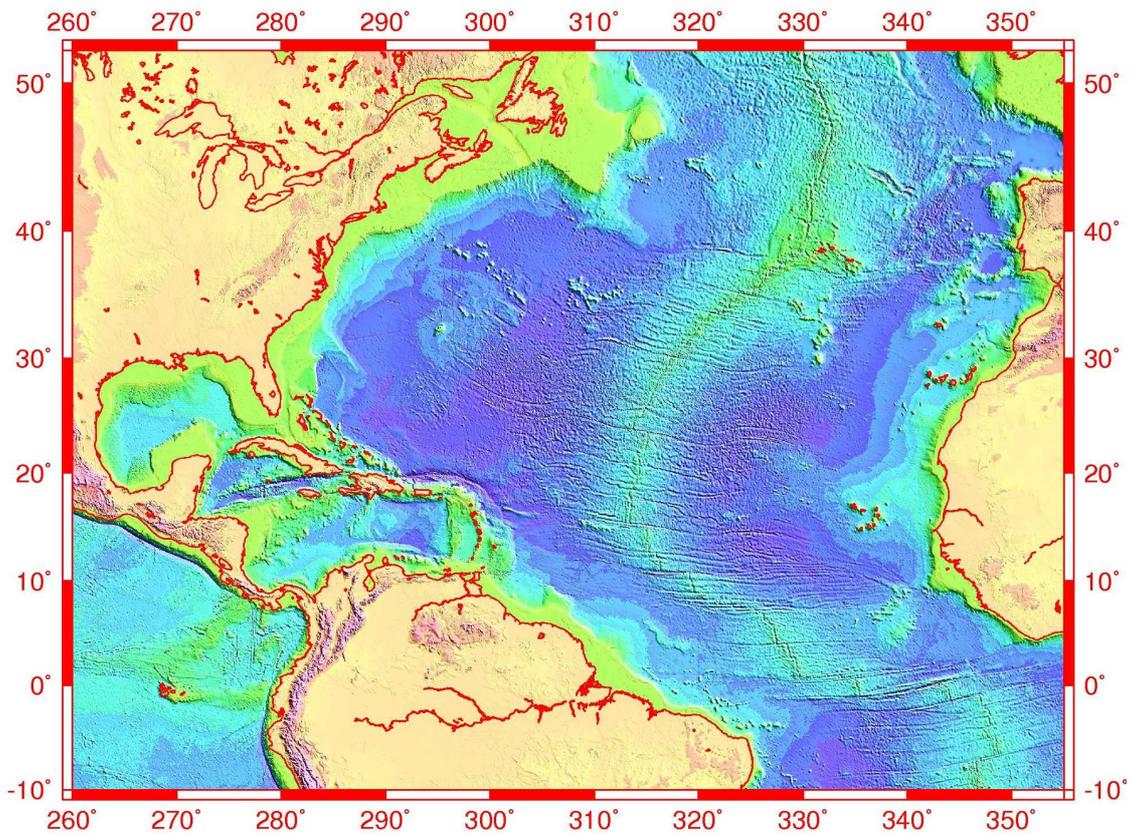


Figura 2 – Mapa atual da mesma região da figura 1.

O princípio das sondas batimétricas acústicas (e também do sonar, de “*sound navigation and ranging*”) é bastante simples, encontrando-se ilustrado na figura 3. Inicialmente é emitido um

impulso sonoro por um dispositivo instalado no navio. A sua frequência dominante é normalmente de 10 kHz a 30 kHz. O sinal sonoro propaga-se na água em todas as direções até encontrar um obstáculo, que pode ser o fundo do mar (nas sondas batimétricas) ou um objeto (caso do sonar). O sinal sonoro é então reflectido (o eco) dirigindo-se uma parte da energia de volta para o navio onde é detectado por um hidrofone. O intervalo de tempo entre o impulso e a recepção do eco,  $T_{eco}$  pode ser convertido em distância ou profundidade ( $h$ ), desde que seja conhecida a velocidade média de propagação do som na água  $\bar{V}_w$ :

$$h = \frac{T_{eco}}{2} \bar{V}_w \quad (1)$$

O factor de 2 surge devido ao trajeto de ida e volta seguido pelo som. Se o emissor e o receptor sonoros estiverem dirigidos na vertical do navio, então  $h$  será o valor da profundidade do fundo do mar imediatamente por baixo do navio. Na realidade a situação não é tão simples pois de facto o sinal reflectido é originado por uma zona larga do fundo o que pode originar imagens confusas em regiões de terreno irregular (figura 4). Se o relevo do fundo do mar for muito elevado, o eco pode mesmo não chegar a ser registado.

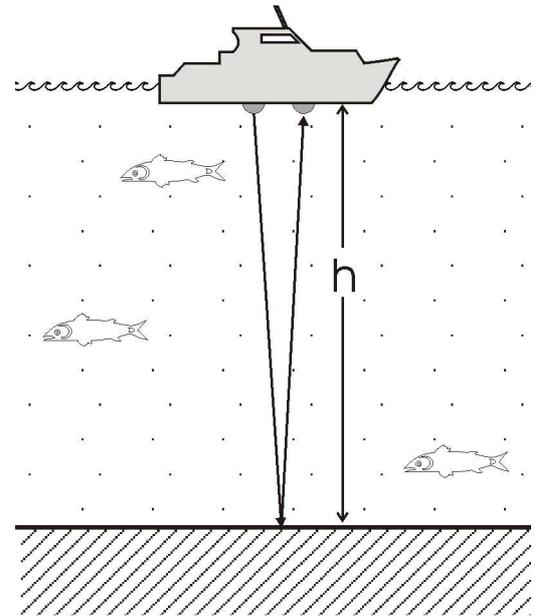


Figura 3

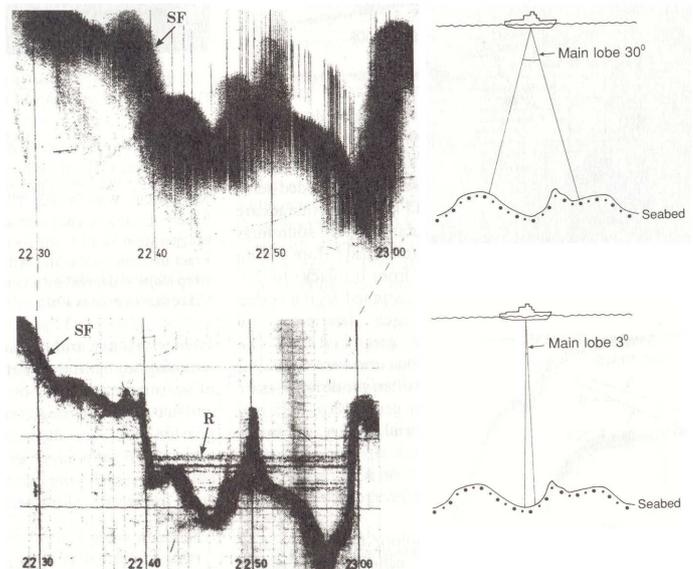


Figura 4

### 3. O que sabemos hoje sobre os fundos oceânicos à escala Global

Usando uma sonda acústica batimétrica é possível obter com rigor a profundidade do fundo do mar apenas ao longo do trajeto do navio, segundo um perfil. O conhecimento, a duas dimensões, dos fundos oceânicos vai depender da conjugação dos rumos de muitos navios que, pela sua natureza, são muito irregulares, cobrindo de forma desigual as diferentes regiões do Globo. Por esta razão, na década de 60 do século XX a batimetria dos fundos marinhos era menos conhecida que a topografia da face escondida da Lua. Mesmo nos dias de hoje, persistem muitas regiões do Globo que são menos conhecidas que as superfícies de Marte ou Vénus.

Os dados de altimetria de satélite disponíveis a partir da década de 90 do século XX vieram permitir uma cobertura global da batimetria dos fundos oceânicos onde as principais estruturas, com dimensão superior a 40 km, se tornaram evidentes (ver figura 2):

- As zonas de fractura
- As dorsais médio-oceânicas
- As fossas abissais
- A sucessão plataforma, talude, planície abissal

Por exemplo, o afundamento dos fundos oceânicos a partir das dorsais é explicado pelo progressivo envelhecimento e arrefecimento da litosfera oceânica gerada na dorsal, segundo uma lei física simples (Parsons and Sclater, 1977):

$$h(t) = h_{dorsal} + 0.35\sqrt{t} \quad (2)$$

onde  $h$  se exprime em km e  $t$  em Ma. Esta constitui, sem dúvida, uma das mais extraordinárias demonstrações da tectónica de placas.

#### 4. Os fundos oceânicos às escalas regional e local

O conhecimento fornecido pela altimetria de satélite é no entanto insuficiente para a investigação geológica a escalas menores, onde se exige um conhecimento de detalhe da batimetria, muitas vezes com uma resolução métrica. Para este tipo de estudos a realização de perfis densos é impraticável e em vez disso foi desenvolvida uma nova tecnologia que permite a observação simultânea da batimetria em vários pontos do fundo dispostos segundo uma faixa perpendicular ao rumo do navio. Esta tecnologia designa-se por batimetria multifeixe e o seu princípio de funcionamento encontra-se ilustrado na figura 5.

Com esta tecnologia, em poucos dias um navio oceanográfico pode produzir uma imagem a duas dimensões e com grande detalhe de uma vasta região. Na figura 6 mostra-se um exemplo da aplicação desta metodologia à zona da falha do Marquês de Pombal, situada 100 km a Oeste do Cabo de S. Vicente, e que foi identificada como a falha que provavelmente terá originado o sismo que destruiu Lisboa a 1 de novembro de 1755.

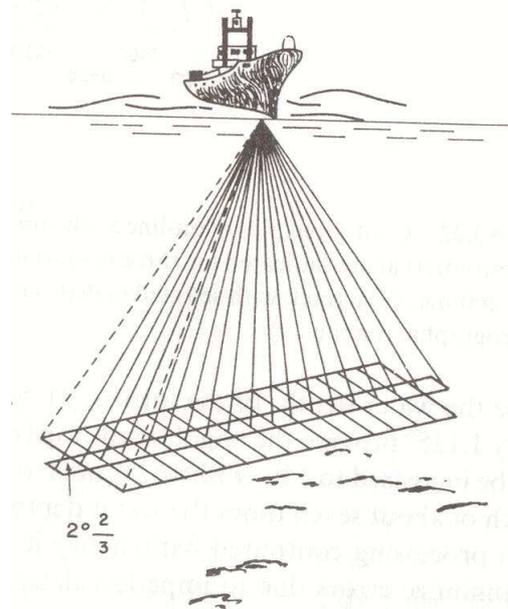


Figura 5

O registo da amplitude dos ecos gerados pela técnica do sonar permite também identificar a natureza dos fundos e através dela estudar os processos tectónicos e/ou sedimentares que lhe deram origem. Na figura 7 mostra-se uma imagem da refletividade do fundo obtida também na área do Marquês de Pombal, onde se identificam alguns elementos de interesse geológico.

#### 5. O som

Devemos agora recordar que todas as técnicas descritas anteriormente usadas na determinação da profundidade dos fundos marinhos se baseiam na medição do tempo de ida e volta de um impulso sonoro, o eco. A profundidade (ou distância) é apenas medida indiretamente pela equação (1) e para isso é necessário conhecer a velocidade de propagação do som na água.

O som é uma forma de propagação de energia mecânica. Ele consiste na alternância regular de pressão num meio elástico (uma sucessão de compressões e rarefações), propagando-se essas

flutuações como uma onda. O som transmite-se de forma muito mais eficiente e rapidamente na água, (onde a sua velocidade média é de cerca de 1450 m/s) do que no ar (velocidade média de 340 m/s).

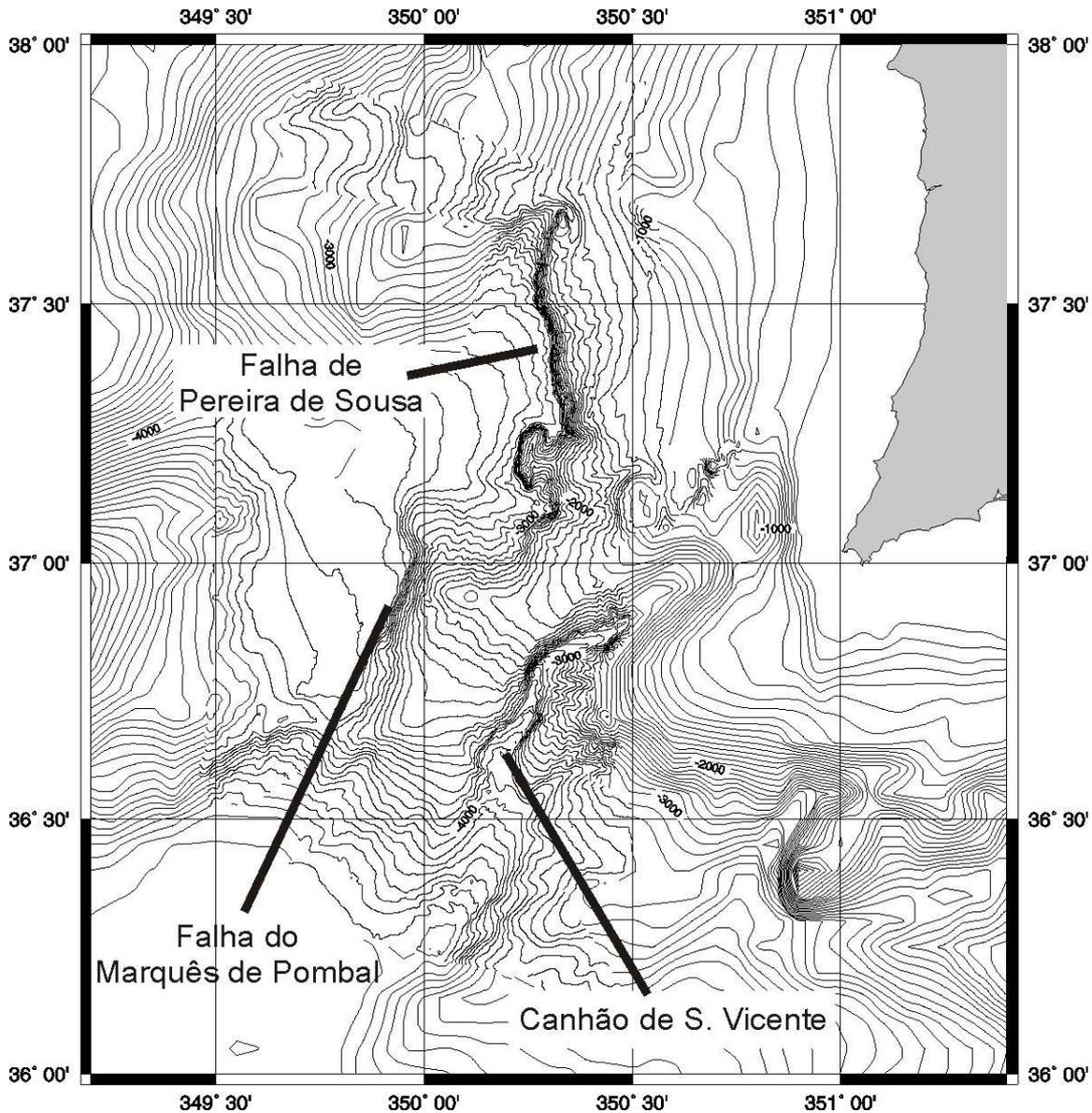


Figura 6 – Batimetria de detalhe dos fundos marinhos fundo na vizinhança da falha do Marquês de Pombal.

No oceano, a velocidade do som depende da temperatura, da pressão e da salinidade (concentração em sais). Esta última é habitualmente medida em partes por mil (*ppm* ou ‰). A velocidade do som aumenta com a temperatura (cerca de 4,5 m/s por cada grau), com a pressão (1,7 m/s por cada 100 m de aumento da profundidade) e com a salinidade (1,3 m/s por cada unidade de aumento de salinidade). Como no oceano os dois factores mais importantes para a variação da velocidade do som são os que têm maiores variações – a temperatura e a pressão – serão esses que determinam o perfil (isto é, a variação com a profundidade) da velocidade do som. Nos primeiros 1000 m de profundidade a temperatura, de modo geral, decresce mas a partir dessa profundidade torna-se quase constante, e como a pressão vai sempre aumentando, então um perfil típico para a velocidade do som no mar é como o indicado na figura 8 (e também Tabela I).

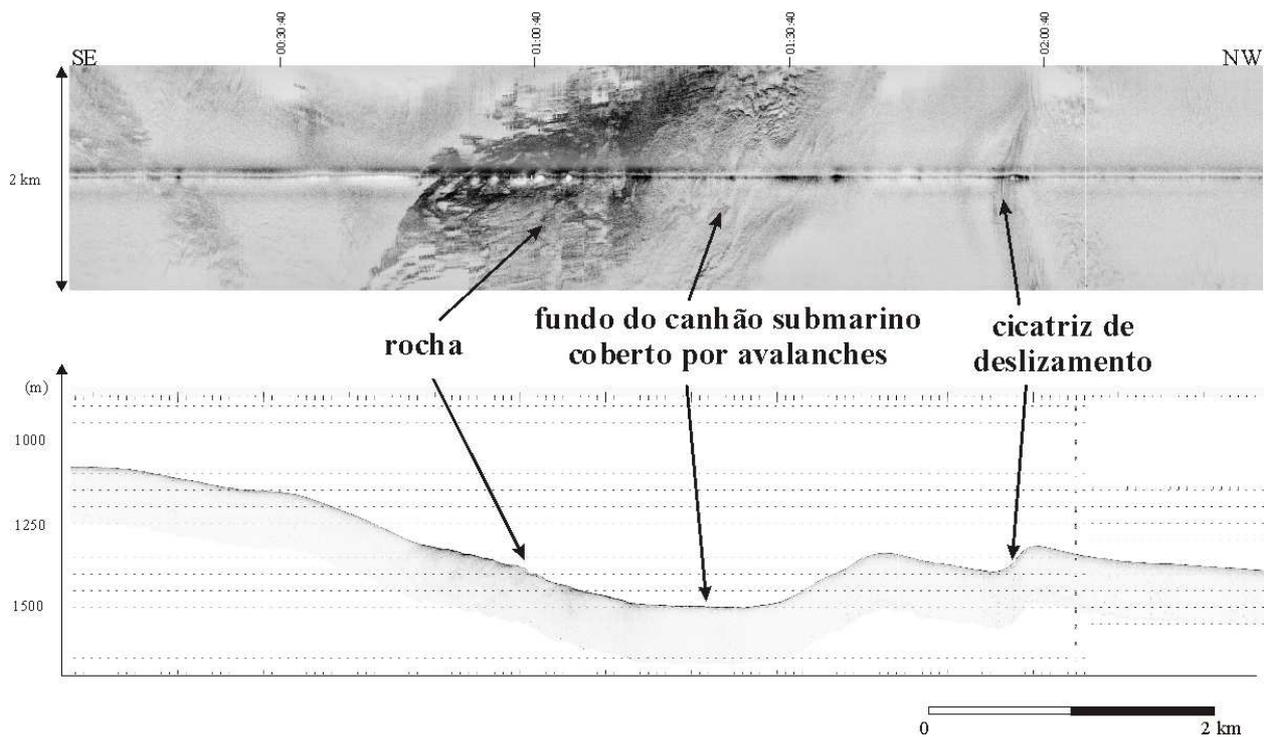


Figura 7 – Imagem da refletividade de fundo na vizinhança do traço da falha do Marquês de Pombal (adaptado de Terrinha et al., 2003).

Tabela I – Velocidade do som (m/s) em função da Temperatura e Salinidade							
T(°C) \ S(ppm)	0	10	20	25	30	35	40
10	1448	1459	1471	1478	1484	1490	1496
15	1466	1478	1489	1495	1501	1507	1513
20	1483	1494	1505	1510	1516	1522	1527
25	1497	1507	1518	1524	1529	1535	1540
30	1509	1520	1530	1535	1541	1546	1551
35	1520	1529	1540	1545	1550	1555	1560
40	1529	---	---	---	---	---	---
45	1537	---	---	---	---	---	---
50	1543	---	---	---	---	---	---

Devido à variação da velocidade do som com a profundidade, um raio sonoro sofre efeitos de refração, isto é, sofre mudanças de direção. Como resultado geral da refração, podemos dizer que os raios sonoros têm tendência para curvar para as regiões de menores velocidades do som. Consequentemente, a zona próxima dos 1000 m de profundidade (mínimo da velocidade do som) funciona como uma zona de “concentração” dos raios sonoros (venham eles da camada acima ou abaixo desse nível) ou seja, como um guia de ondas sonoras. É o chamado canal SOFAR – “*Sound Fixing and Ranging*”. Este canal de som é muito eficiente na transmissão acústica porque a energia sonora ao ser focalizada não sofre dispersão e pode ser transmitida a grandes distâncias. As ondas sísmicas que entram no SOFAR sofrem pouca atenuação e podem ser registadas por estações sismográficas a grandes distâncias, constituindo as ondas-T (de Terciárias).

Tal como o homem, também os animais marinhos, como por exemplo as baleias e os golfinhos, utilizam o som para detectar as presas ou para comunicar entre si.

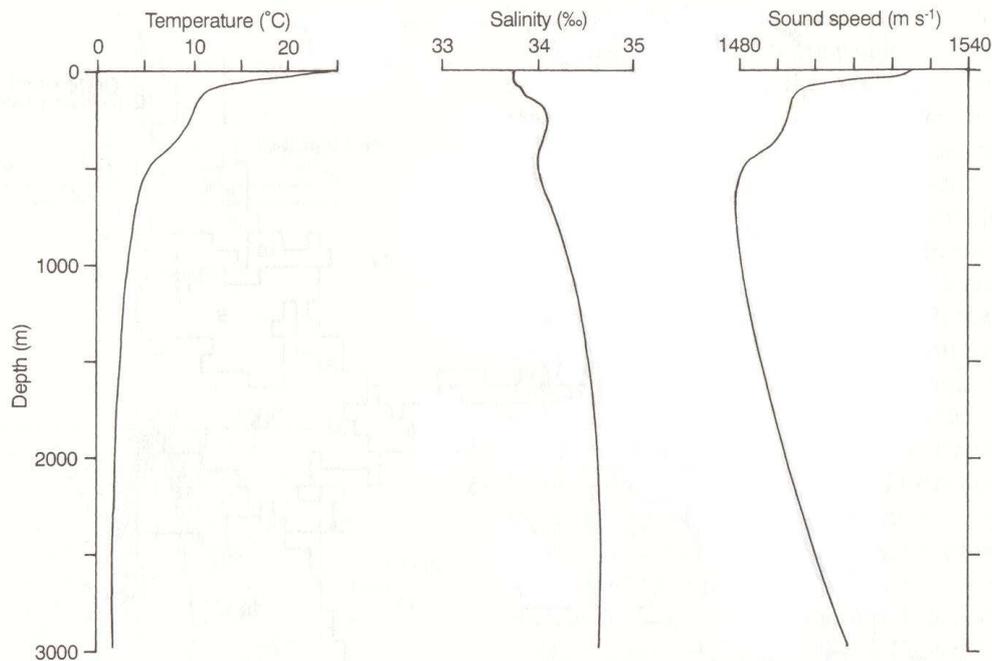


Figura 8 – Variação da temperatura, salinidade e velocidade do som com a profundidade nos oceanos.

## 6. Objetivo do trabalho e dispositivo experimental

O presente trabalho pretende ilustrar o princípio de funcionamento do sonar e das sondas batimétricas atuais através do estudo de algumas das causas responsáveis pela variação da velocidade do som na água. Para este efeito tem à sua disposição um tanque de aquário. Em oceanografia, uma vez que a salinidade das massas de água varia pouco, é o factor Temperatura que mais influencia a velocidade de propagação do som na água. Este estudo é complementado com a determinação da velocidade do som no ar.

As ondas acústicas (ultrassons) são emitidas e detectadas por dispositivos piezoelétricos que são formados essencialmente por um cristal de quartzo cortado de certa forma. As suas propriedades piezoelétricas determinam que quando solicitado por vibrações acústicas, se estabeleça uma diferença de potencial (ddp) entre as suas faces. Esta ddp é então observada num osciloscópio. Simetricamente, se aos terminais de um cristal piezoelétrico for aplicado um sinal eléctrico, o cristal entrará em vibração emitindo ultrassons. Para facilitar a visualização dos sinais eléctricos produzidos nos detectores, o emissor é ligado a um gerador de pulsos obrigando-o a emitir pulsos de forma periódica.

A velocidade de propagação da onda acústica é determinada a partir do intervalo de tempo entre a partida e a chegada dos impulsos observados, para diferentes posições dos dispositivos emissor e receptor. O elemento receptor distingue-se do emissor pela presença de uma caixa de pré-amplificação.

## 7. Leitura Complementar

O Osciloscópio (Apêndice 1, *Física Experimental - Uma Introdução*, de Abreu et al., 1994).

## **2º Trabalho Prático: COMO FUNCIONA O SONAR - MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM NO AR**

### **1. EQUIPAMENTO NECESSÁRIO**

- Gerador de impulsos
- Um emissor e um detector de ultrassons para o ar com íman
- Um emissor e um detector de ultrassons para a água com tubo de suporte
- Aquário com barra de apoio para sensores
- Osciloscópio
- Fita métrica, régua metálica
- Termómetro e tripé de suporte
- Tubo transparente
- Resistência de aquecimento
- Sal, *gobelet* de 2L

### **2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Notas:

- 1) Todos os valores medidos devem ser registados com o erro de leitura.
- 2) As tarefas indicadas com (\*) destinam-se a ser realizadas apenas na fase de análise de dados, posterior ao cumprimento de todas as tarefas de medição exigidas.

#### ***2.1 Montagem do dispositivo básico de observação***

Ligue o canal I do osciloscópio à saída do detector (1) do gerador de impulsos. Ligue o sinal de controlo do gerador de impulsos (na parte de trás da caixa) à entrada do canal II do osciloscópio. Verifique se a entrada do *trigger* está seleccionada para o canal II. Ligue o gerador de impulsos e o osciloscópio. Deverá observar os impulsos de ultrassons no canal I do osciloscópio.

#### ***2.2 O funcionamento do sonar***

Monte o par emissor e detector de ultrassons na barra de ferro, usando os ímans de fixação. Ligue ambos os dispositivos ao gerador de impulsos na sua posição correcta. Use apenas o receptor (1) do gerador. Rode o botão de amplificação para o máximo. Ajuste os ganhos vertical e horizontal de forma a obter no osciloscópio uma visão estável do sinal acústico, quando o emissor e receptor apontam um para o outro. Note que pode ter de ajustar o nível do *trigger* do osciloscópio.

**2.2.1** Coloque o emissor a cerca de 20 cm do detector. Meça o período de repetição dos impulsos produzidos pelo gerador, e calcule a sua frequência.

**2.2.2** Meça o período dominante do impulso acústico e calcule a sua frequência. Ajuste a amplitude do sinal receptor de forma conveniente.

**2.2.3** Meça a duração do impulso acústico. Use a amplitude máxima do sinal receptor.

**2.2.4** Descreva e interprete o que acontece quando aproxima e afasta o emissor e o detector.

**2.2.5** Coloque agora o emissor e receptor paralelos, afastados 10 cm, e apontando para a sua frente. Descreva e interprete o que observa quando interpõe no percurso dos ultrassons uma placa.

**2.2.6** Descreva e interprete o que observa quando aproxima e afasta a placa. Que sucede quando inclina a placa? Explique.

### **2.3 Medição da velocidade do som no ar**

**2.3.1** Ajuste a base de tempo do osciloscópio para  $20 \mu\text{s/cm}$  Com a entrada I do OSC selecionada para GD (*Ground*), ajuste o botão X-POS de forma a que o início do varrimento se inicie exatamente na primeira divisão da escala. Coloque agora a entrada I do OSC em modo AC. Aproxime o emissor e detector ao máximo possível. Fixe um ponto significativo do pulso de ultrassons que seja sempre identificável quando desloca o receptor ao longo da régua.

**2.3.2** Deve agora proceder à medição tempo de percurso do ultrassom no ar para várias posições do receptor. Deve proceder da seguinte forma: (i) faça coincidir o ponto significativo com um traço exato da escala deslocando o receptor na barra de suporte; (ii) para essa posição meça com a régua a localização exata do receptor. Deve repetir este procedimento para todas as posições possíveis no OSC que estejam espaçadas de 1 cm. (1.0, 2.0, 3.0, ...). Tome nota de ambos os valores.

**2.3.3** Ajuste agora a base de tempo do osciloscópio para  $50 \mu\text{s/cm}$  Com a entrada I do OSC selecionada para GD (*Ground*), ajuste o botão X-POS de forma a que o início do varrimento se inicie exatamente na primeira divisão da escala. Coloque agora a entrada I do OSC em modo AC. Aproxime o emissor e detector ao máximo possível. Fixe um ponto significativo do pulso de ultrassons que seja sempre identificável quando desloca o receptor ao longo da régua.

**2.3.9** Meça o tempo do percurso do ultrassom no ar usando o mesmo procedimento que em 2.3.2 usando o mesmo espaçamento de 1.0 cm entre cada posição (por exemplo 1.0, 2.0, 3.0, ...). Tome nota de ambos os valores.

### **(\*2.4 Determinação da velocidade média de propagação dos ultrassons**

**(\*2.4.1** Faça um gráfico da posição do receptor em função do tempo de percurso dos ultrassons. Use as distâncias em mm e os tempos em  $\mu\text{s}$ .

**(\*2.4.2** A velocidade média dos ultrassons é o declive do gráfico anterior. Determine a velocidade média e a sua incerteza pelo método dos mínimos quadrados. Use cada escala do OSC em separado e todos os valores em conjunto. Converta os resultados obtidos em unidades de m/s. Compare os valores obtidos com o valor referido na introdução.

### **2.5 Estudo da velocidade do som na água**

**2.5.1** Com o aquário vazio, meça as dimensões interiores do aquário e (\*) calcule o seu volume.

**2.5.2** Encha o aquário com água fria, usando o tubo transparente à sua disposição. O enchimento não deve ultrapassar os 15 cm de altura. Meça a altura final da água no aquário. (\*) Calcule o volume de água no interior do aquário.

**2.5.3** Coloque o termómetro no interior do aquário. Meça a temperatura da água.

**2.5.4** Coloque a régua de suporte no aquário. Coloque os dispositivos emissor e receptores preparados para a água nos seus suportes. O emissor deve apontar para o receptor. O emissor deve estar à sua esquerda e o receptor à sua direita. A régua de suporte deve ter os seus valores a aumentar da esquerda para a direita. Encoste o emissor ao bordo esquerdo do aquário. Ajuste o osciloscópio de forma a ver uma imagem nítida do pulso de ultrassons quando o emissor e receptor estão a cerca de 20 *cm* um do outro. Meça a duração do impulso acústico.

**2.5.5** Descreva o que sucede à forma do impulso quando provoca uma ligeira perturbação na superfície da água. (\*) Explique o que observou.

**2.5.6** Introduza sal na água. Meça a duração do impulso acústico. (\*) Compare este valor com o obtido em 2.5.4. Explique as diferenças observadas.

**2.5.6** Com o auxílio de uma resistência de aquecimento aqueça a água. Controle a temperatura e tente obter um valor da temperatura próximo dos 37 °C. Meça a temperatura da água.

**2.5.7** Meça a duração do impulso acústico. (\*) Compare este valor com o obtido em 2.5.6. Explique as diferenças observadas.

### **3. RELATÓRIO**

Indique sempre a turma, o número e nome de cada aluno que constitui o grupo de trabalho assim como a data da realização do trabalho.

Em linhas gerais, o relatório deve ser uma exposição/relato escrito em que se descrevem e analisam todos os factos/dados recolhidos no decorrer de uma experiência. Os registos efetuados servem para responder aos objetivos que originaram a atividade experimental. Faz parte de um relatório o **RESUMO** (sucinto), a **DISCUSSÃO** e as **CONCLUSÕES**. Não se pretende uma introdução.