

Acústica – Parte 1

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

Acústica

Victor Lobo

Mestrados Integrados de M (Acústica, Sonar e Armas Submarinas)
e EN-AEL (Sistemas de Detecção e Armamento Submarino)

1

O Som

- O Som é uma forma de **energia mecânica** que consiste no movimento regular de moléculas de um meio elástico.
 - É uma onda longitudinal
- Modulação da pressão ambiente:

Delocamento das partículas e Pressão

2

O Som

Acoustic Longitudinal Wave

Sound Pressure

Wavelength

Max
 P_{atm}
Min

3

O Som

- A existência de um **meio físico de propagação** é fundamental:
 - Necessita de um suporte mecânico.
 - O som não se propaga no vácuo.
 - A propagação depende das características do meio
- Para a formação do som, propagação e detecção por parte de um de receptor, é necessário:
 - Fonte sonora (**emissor**);
 - Meio de propagação (**canal**);
 - Sensor de som (**receptor**).

4

Características do Som

Intensidade auditiva (*loudness*):

- Qualidade fisiológica vs física
 - Física – **amplitude** da variação de pressão
 - Como as amplitudes variam muito, usa-se uma escala logarítmica (**dB**) de rácios entre a amplitude e uma amplitude padrão
 - Referência para a escala logarítmica é 20µP no ar 1µP na água
 - Fisiológica – sensação produzida no ser humano, escala dB(A)
- Permite distinguir se um som é mais forte ou mais fraco (intensidade sonora), dependendo da amplitude da vibração das partículas:
 - Com amplitude reduzida temos percepção de som fraco;
 - Com amplitude elevada temos percepção de som forte.(voltaremos a este conceito mais tarde)

5

Características do Som

Altura (*pitch*):

- característica que permite distinguir um som agudo de um grave;
- Altura de um som está ligada à **frequência** de vibração:
 - Sons baixos ou graves -> Baixa Frequência
 - Sons altos ou agudos -> Alta Frequência

6

Acústica – Parte 1

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

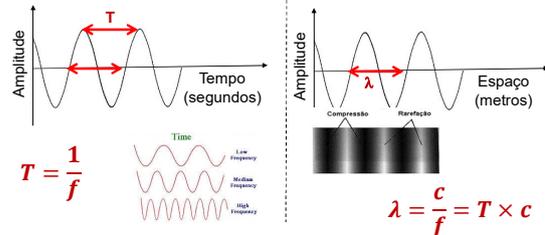
Características do som

- A **frequência** (f) mede-se em Hertz (Hz) no Sistema Internacional (SI)
 - 1 Hz = 1 ciclo por segundo (dimensão = s^{-1})
- O **período** (T) é o tempo entre repetições
 - Mede-se em segundos
$$T = \frac{1}{f}$$
- O **Comprimento de onda** (λ) é a distância entre pontos em fase
 - Mede-se em metros
 - Depende de f e da velocidade de propagação c
$$\lambda = \frac{c}{f} = T \times c$$

7

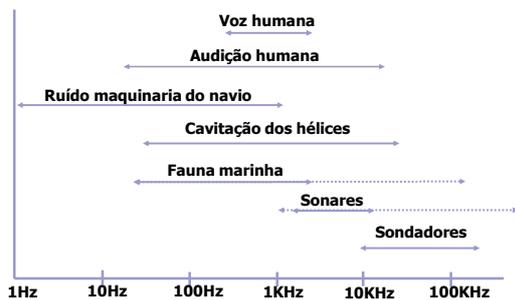
Características do som

- Frequência vs Período vs Comprimento de onda
 - Comprimento de onda depende do meio
 - Varia !
 - Importante para perceber o espaçamento dos sensores



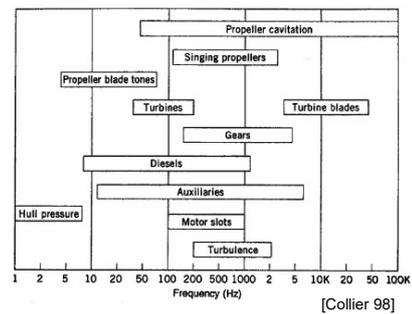
8

Espectro de Frequências comuns no meio marinho



9

Espectro de Frequências Geradas pelo movimento de navios



10

Características do Som

Timbre (Quality), cor, ou conteúdo espectral

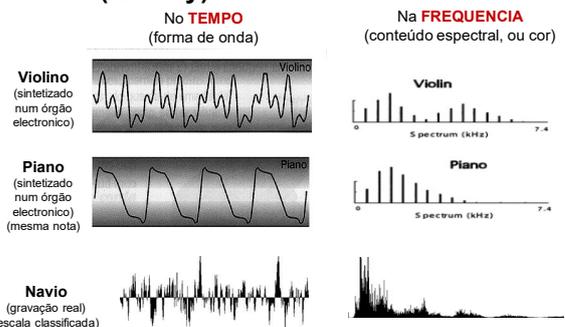
- É a característica que nos permite **distinguir dois sons com a mesma intensidade e a mesma frequência**, mas com diferentes formas de onda;
 - Permite-nos distinguir o som produzido por dois instrumentos diferentes apesar de estarem a tocar a mesma nota musical (mesma frequência fundamental);
- Está ligado à forma de onda:
 - Permite-nos distinguir o som produzido por dois instrumentos diferentes apesar de estarem a tocar a mesma nota musical (mesma frequência fundamental);



11

Características do Som

Timbre (Quality)



12

Acústica – Parte 1

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

Características do Som

Limiar de audibilidade:

- É a mínima intensidade acústica que pode ser detectada a uma dada frequência;
- O ouvido humano tem boa sensibilidade para frequências dos 500Hz aos 6000Hz;
- O envelhecimento contribui para a deformação da sensibilidade auditiva principalmente nas altas frequências.

13

Nível Sonoro

- **Pressão de referência**
 - $P_{ref} = 20 \text{ uPa}$;
- Mínimo valor de pressão sonora detectada por um ouvido humano normal @ 1KHz;
- Limiar de audibilidade à frequência de 1KHz;



14

Espectro de Frequências

Para ouvido humano, divide-se em 3 bandas:

- Infrassónica ou subsónica - abaixo 20Hz
- Sónica - 20Hz aos 20KHz
- Ultra-sónica - acima 20KHz

15

Introdução à Acústica

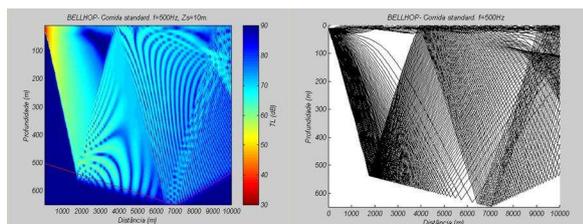
- Introdução
- Agentes de observação;
- O som;
- Características do som;

QUESTÕES

16

Acústica Submarina

Comportamento do som na água;



17

Acústica Submarina

- **Comportamento do som na água;**
 - Factores que influenciam a velocidade de propagação do som na água;
 - Factores que afectam a distribuição de temperatura no Mar.

18

Acústica – Parte 1

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

Velocidade de Propagação do Som na Água (VPSA)

- Valores típicos:
 - de 1432 a 1554 m/s.
- É afectada pelas **condições oceanográficas**;
- **Refracção** - Encurvamento do feixe sonoro na passagem entre meios com velocidades de propagação diferentes (Lei de Snell);
 - Encurvamento é sempre na direcção da menor velocidade de propagação;

19

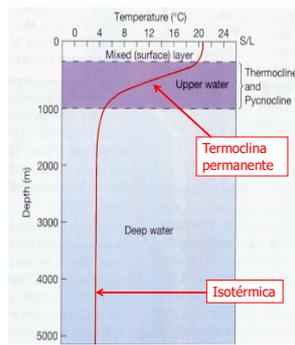
Velocidade de Propagação do Som na Água (VPSA)

- Principais factores que afectam a VPSA:
 - Temperatura (aumenta a velocidade);
 - Pressão (aumenta a velocidade)
 - Salinidade (aumenta a velocidade)

20

Temperatura

- Factor mais importante na variação da VPSA;
- Aumento de 1°C provoca um aumento de 3 m/s da VPSA;
- A influência da Temperatura faz-se sentir até aos 1000 metros.



21

Salinidade

- Valores médios na água do mar :
 - 30 a 35 ‰ (partes-por-mil);
- Grandes variações:
 - Em estuários;
 - Mares interiores;
 - Regiões polares, durante o verão;
 - Lagoas, etc.;
- Um aumento de 1 ‰ provoca um aumento de 1,4 m/s na VPSA;

22

Salinidade

- Constituída principalmente por íões de:
 - Sódio;
 - Potássio;
 - Cálcio;
 - Magnésio;
 - Cloro;
 - Sulfatos;
 - Bicarbonatos;

23

Salinidade das Massas de água

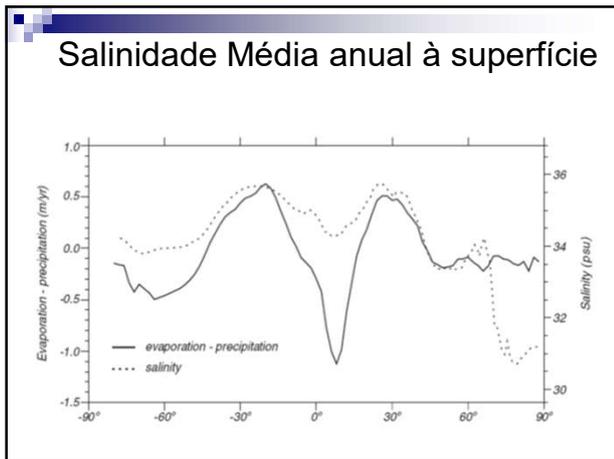
Salinidade média dos oceanos é cerca de 35 ‰

- Oceano atlântico: 35,4 ‰
- Oceano Índico: 34,8 ‰
- Oceano Pacífico: 34,5 ‰
- Mar Negro: 17 - 18 ‰
- Golfo Pérsico: 40 ‰
- Mar Vermelho: 40 ‰
- Mar Cáspio: 13 ‰
- Mar Báltico: 8 ‰
- Baía de Kiel (Alemanha): 15 ‰
- Golfo da Finlândia e golfo da Bótnia: 1 ‰
- Mar do Norte: 35 ‰
- Mar Mediterrâneo: 37,4 ‰
- Mar Morto: 270 ‰ em média
- Mar Morto: 326,6 ‰ a 50 metros de profundidade
- Lago Assal: 348 ‰ em média, salinidade mais alta do mundo (Djibouti)
- Lago Assal: 388 ‰ a 20 metros de profundidade
- Mais pequenos
 - Lago Gaetale 433 ‰ (Etiópia)
 - Lago Retba 400 ‰ (Senegal)

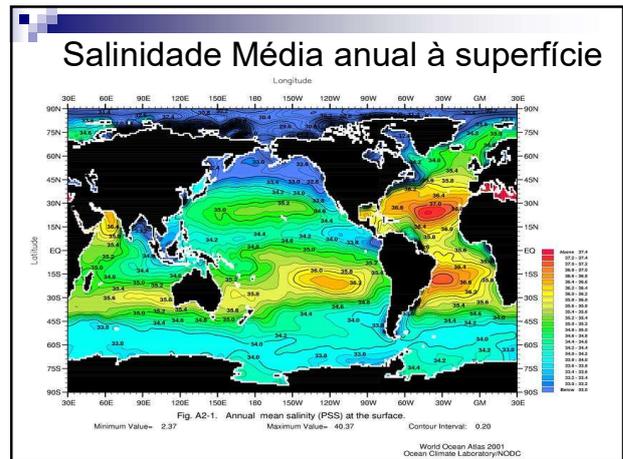
24

Acústica – Parte 1

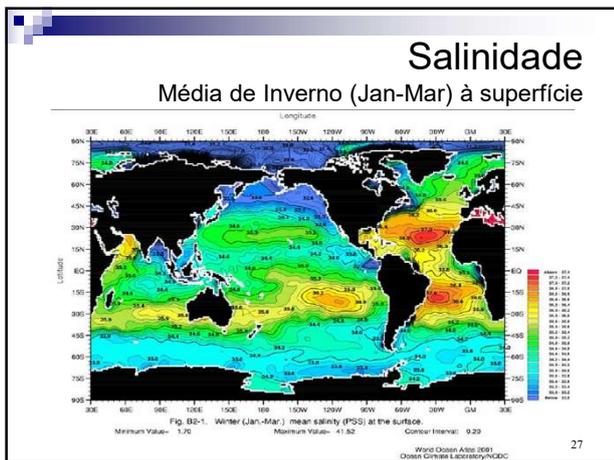
4ºAno EN-AEL, 3ºAno M



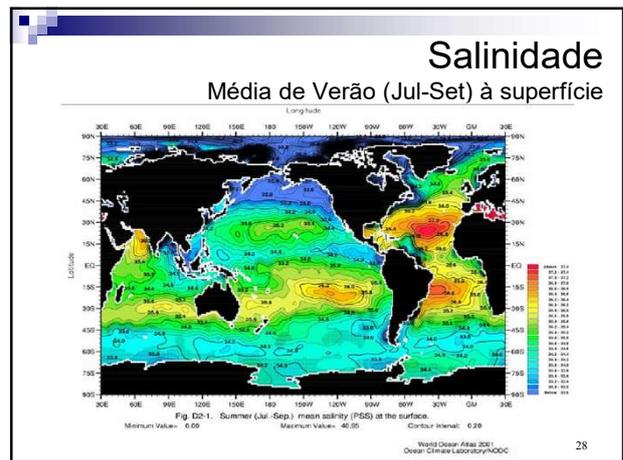
25



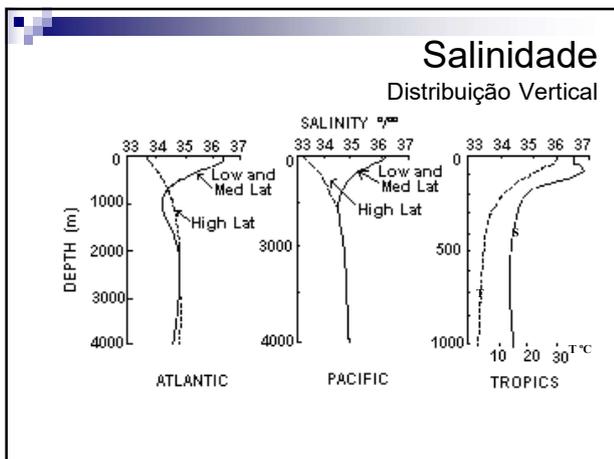
26



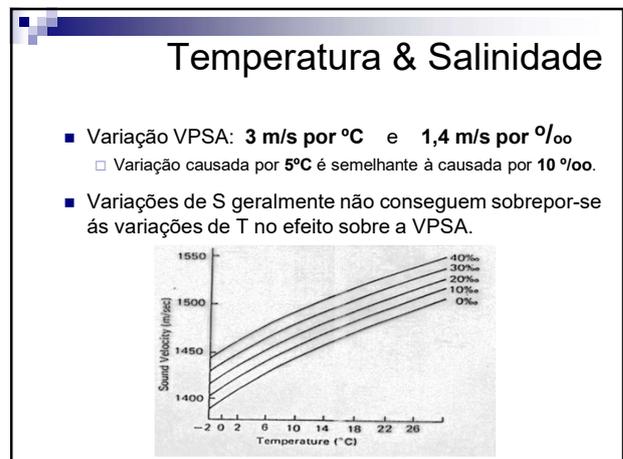
27



28



29



30

Acústica – Parte 1

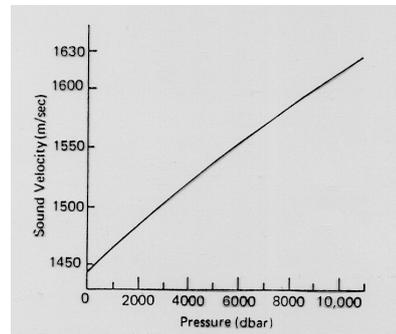
4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

Pressão

- Em baixas profundidades, não tem grande influência na VPSA;
- Grandes profundidades (> 1000m), grande influência na variação da VPSA, provocando um gradiente positivo na VPSA;
- Importante em situações onde a temperatura e a salinidade são constantes;
- Um aumento de 10 metros de profundidade provoca um aumento de 0,17 m/s na VPSA.
 - Variação de **0,017m/s** por metro de profundidade.

31

Pressão



32

Velocidade do Som

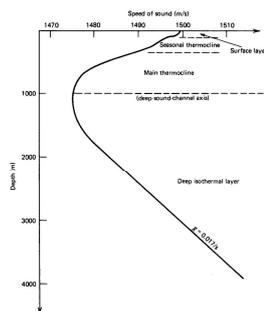


Fig. 15.2. Representative sound-speed profile for midlatitude, deep ocean water.

33

Velocidade do Som

- Equação de Wilson:

$$C = 1449 + 4,6 T - 0,055 T^2 + 1,39 (S-35) + 0,017 D$$

C = Velocidade do som na água (m/s)

T = Temperatura da água (°C)

S = Salinidade em partes por milhar (‰)

D = Profundidade (m)

34

Comportamento do Som na Água

- Factores que influenciam a velocidade de propagação do som na água:
 - Temperatura, salinidade e pressão;
- Factores que afectam a distribuição de temperatura no Mar;

35

Comportamento do Som na Água

- Factores que afectam a distribuição de temperatura no Mar;
 - Insolação (aquecimento solar);
 - Trocas de calor com águas mais profundas;
 - Advecção horizontal devida a correntes.

36

Acústica – Parte 1

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

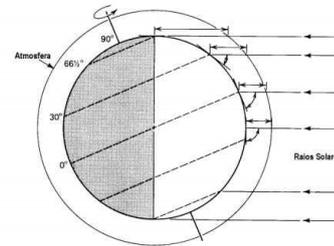
Insolação

- A insolação (aquecimento solar) depende de:
 - Quantidade de calor absorvido pela atmosfera;
 - Efeito da latitude;
 - Efeito sazonal;
 - Nebulosidade.

37

Insolação

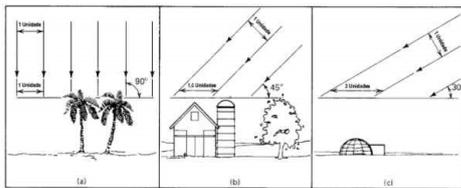
- Absorção atmosférica;



38

Insolação

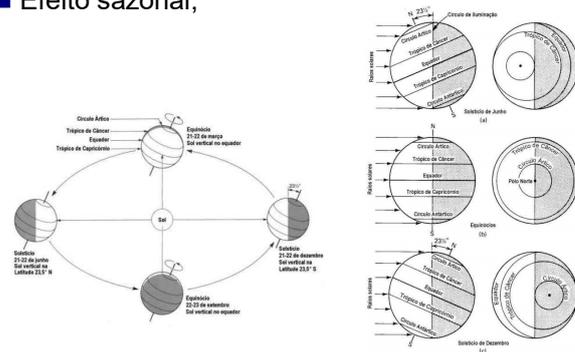
- Efeito da latitude;



39

Insolação

- Efeito sazonal;



40

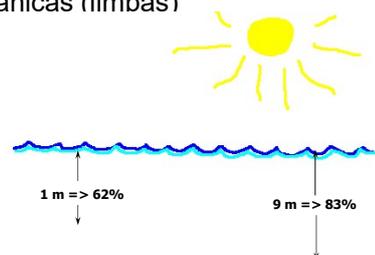
Insolação - Nebulosidade

- Num dia com céu **completamente coberto** (num dia escuro e chuvoso), a radiação recebida do sol pode ser **reduzida a menos de 10%** daquela que seria recebida num dia limpo.
- Quando o céu está **parcialmente coberto** a quantidade de radiação recebida pode **exceder** a recebida num dia de céu limpo por causa da radiação **reflectida** para a terra pelas nuvens.

41

Insolação - Absorção Oceânica

- Absorção da energia solar em águas oceânicas (limpas)



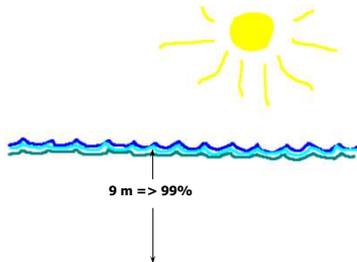
42

Acústica – Parte 1

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

Insolação - Absorção Costeira

- Absorção da energia solar em águas costeiras (não limpas)



43

Insolação

Conclusão:

- Na ausência de outros processos meteorológicos ou oceanográficos o aquecimento da água pelo sol ficará confinado a uma camada de 9 m;
- Pouco calor atinge as camadas mais profundas;
- Origina o efeito da tarde => “transient thermocline”.

44

Factores Que Afectam a Distribuição de Temperatura

- Insolação (aquecimento solar);
- **Trocas de calor com águas mais profundas;**
- Advecção horizontal devida a correntes.

45

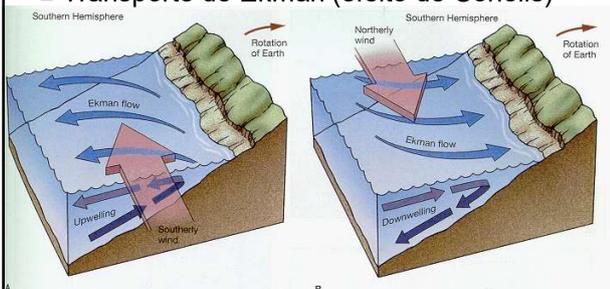
Trocas de Calor Com Águas Mais Profundas

- **Mistura física** das águas de superfície, em profundidade por **ventos ou correntes;**
- Arrefecimento das camadas de superfície por:
 - **Convecção;**
 - “**Upwelling**”;

46

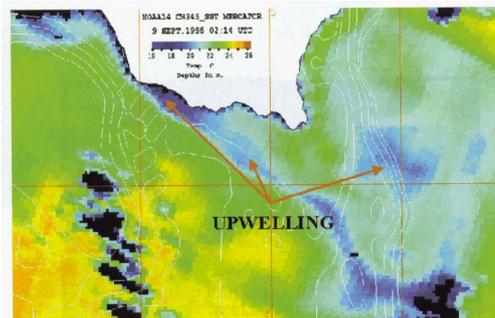
UPWELLING

- Transporte de Ekman (efeito de Coriolis)



47

UPWELLING



48

Acústica – Parte 1

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

Factores Que Afectam a Distribuição de Temperatura

- Insolação (aquecimento solar);
- Trocas de calor com águas mais profundas;
- **Advecção horizontal devida a correntes.**

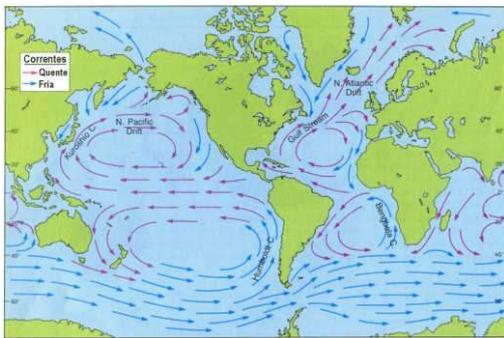
49

Advecção Horizontal

- É devida ao transporte de massas de água por correntes;
- Em zonas onde existam correntes significativas, o aquecimento devido à insolação será afectado por estas correntes;

50

Advecção Horizontal



51

Factores que afectam a distribuição de temperatura

- Insolação (aquecimento solar);
 - Nebulosidade, absorção oceânica e costeira;
- Trocas de calor com águas mais profundas;
 - Convecção e “Upwelling”;
- Advecção horizontal devida a correntes;
 - Transporte de massas de água por correntes;

52

Estrutura da Temperatura

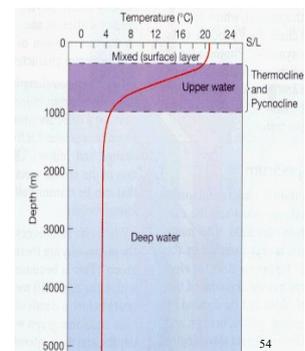
- Camada de Superfície;
- Termoclina;
- Camada Profunda;
- Profundidade Camada;
- Efeito da Tarde;
- Trópicos;
- Latitudes Médias;
- Latitudes Elevadas;
- Ondulação e Vaga
- Ondas Internas

53

53

Estrutura da Temperatura

- Camada de superfície;
- Termoclina;
- Camada profunda;



54

54

Acústica – Parte 1

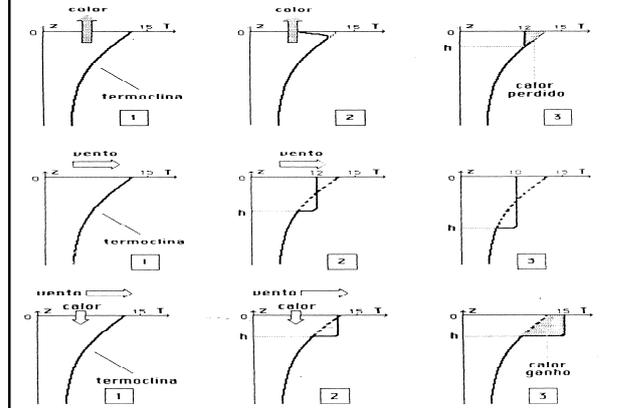
4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

Camada de Superfície

- Camada de Superfície (**Mixed Layer**);
- Influenciada pelas condições meteorológicas;
- Camada turbulenta;
- Tem profundidade variável;
 - **MLD – Mixed Layer Depth**;
- Sujeita a variações sazonais.

55

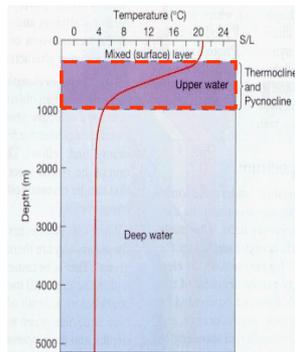
A camada turbulenta superficial Os mecanismos da turbulência



56

Termoclina

- Corresponde a um **gradiente negativo** da temperatura em profundidade;
- Depende :
 - Aquecimento da camada superficial;
 - Acção do vento;
- Existem dois tipos:
 - Termoclina sazonal;
 - Termoclina permanente (ou principal).



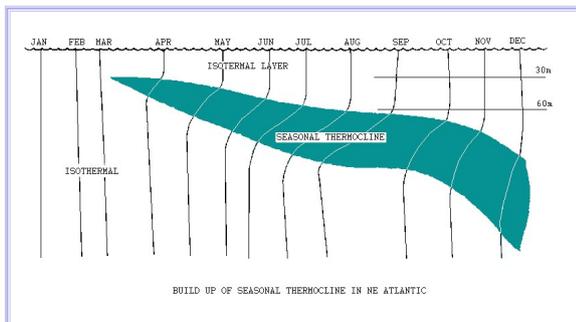
57

Termoclina Sazonal

- Termoclina mais superficial;
- Depende:
 - Aquecimento da camada superficial;
 - Acção do vento;
- Está relacionada com a profundidade da camada superficial;

58

Termoclina Sazonal



59

Termoclina Sazonal

Inverno:

- Menor insolação;
- Arrefecimento da superfície;
- Mistura provocada pelos ventos fortes;

Podem originar o desaparecimento desta termoclina, dando lugar a uma **Isotérmica** (temperatura constante);

60

Acústica – Parte 1

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

Termoclina Sazonal

Verão:

- Ventos fracos e grande insolação:
 - Grande variação de temperatura;
 - Pouca profundidade;

61

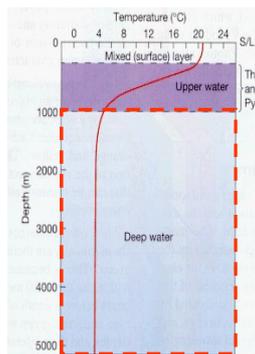
Termoclina Permanente

- É um **gradiente negativo** de temperatura, sujeito somente a **variações regionais de profundidade**;
- Entre esta termoclina e a sazonal, pode aparecer uma **isotérmica** e um gradiente positivo de velocidade do som, e a formação de um canal de som;

62

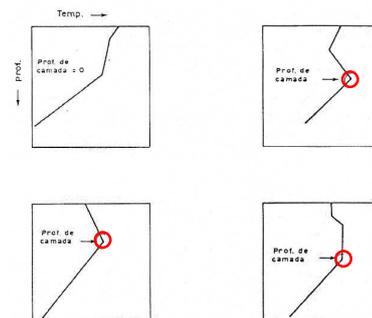
Camada Profunda

- Situa-se abaixo da termoclina permanente;
- Gradiente de temperatura praticamente nulo;
- Massa de água com temperatura baixa, 4 a 5° C;
- Efeito da pressão é dominante na variação da velocidade do som;



63

Profundidade Camada



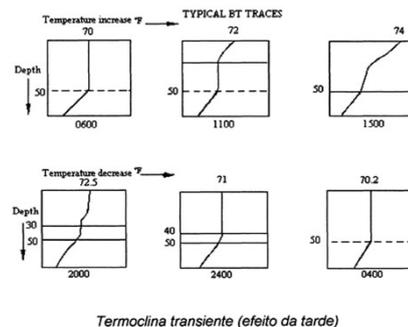
64

Efeito da Tarde

- Resulta do aquecimento da superfície da água durante o dia e arrefecimento à noite, originando Termoclinas de Transiente.
- Este fenómeno é conhecido como “**Efeito da Tarde**” pois é nesta altura que a superfície atinge maiores temperaturas.
- Variações diurnas ocorrem perto da superfície, sobrepondo-se à isotérmica, atingindo pouca profundidade.

65

Efeito da Tarde



Termoclina transiente (efeito da tarde)

66

Acústica – Parte 1

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

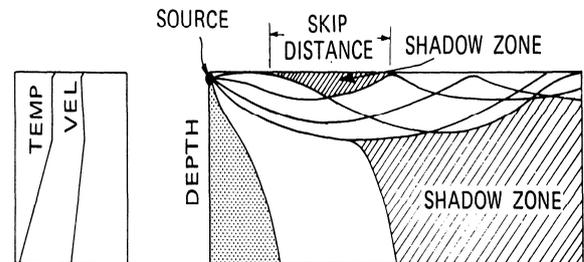
Efeito da Tarde

- Implicações do efeito da tarde
 - Encurvamento do raio sonoro à saída do transdutor;
 - Gradiente negativo a partir da superfície;
 - Afeta os alcances na camada de mistura, associado ao efeito de Skip Distance (cria-se uma zona de sombra na camada).

67

Efeito da tarde

b Changing Pattern (shallow negative layer over a mixed pattern)



68

Estrutura da Temperatura

Variação do perfil de temperatura com a Latitude:

- Latitudes elevadas;
- Latitudes médias;
- Trópicos;

69

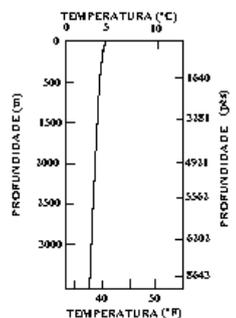
Estrutura da Temperatura

LATITUDES ELEVADAS

70

Latitudes Elevadas

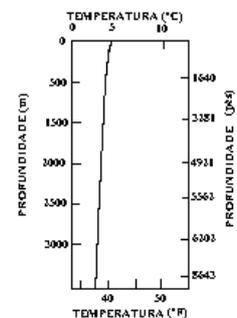
- Existe pequena variação do perfil ao longo do ano;
- No Inverno poderá não existir termoclina sazonal;



71

Latitudes Elevadas

- As perdas de calor da camada superficial para a atmosfera podem ser de tal forma elevadas que provoquem um ligeiro aumento de temperatura em profundidade, junto à superfície;



72

Acústica – Parte 1

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

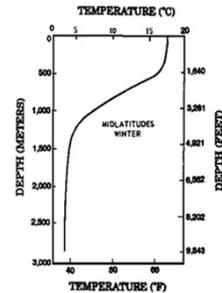
Estrutura da Temperatura

LATITUDES MÉDIAS

73

Latitudes Médias - Inverno

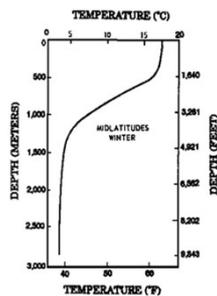
- A isotérmica (prof. camada) estende-se a uma profundidade de **150 metros** ou superior;
- Abaixo da isotérmica de superfície a **temperatura decresce abruptamente até próximo dos 1000 metros** (termoclina permanente);



74

Latitudes Médias – Inverno

- Na camada profunda a temperatura mantém-se praticamente constante, decrescendo ligeiramente com a profundidade;



75

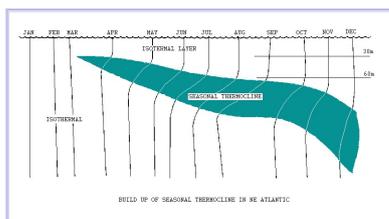
Latitudes Médias - Verão

- Profundidade de camada varia dos 0 aos 30 m;
- Abaixo da camada, a termoclina sazonal que pode atingir valores entre 150 e os 300 m;
- À termoclina sazonal segue-se a termoclina permanente;

76

Latitudes Médias

- Existe um ciclo sazonal bem definido:
 - Influenciado pela insolação e vento que vai afectar a profundidade de camada.



77

Latitudes Médias

- Atlântico Norte:
 - Dezembro
 - Janeiro
 - Fevereiro
 - Março
 - Abril
 - Maio
- Prof. Camada ≥ 150 Metros ;
- Período de transição, ocorre um aquecimento gradual;
- A parte superior da camada isotérmica torna-se mais quente e forma-se a termoclina sazonal;

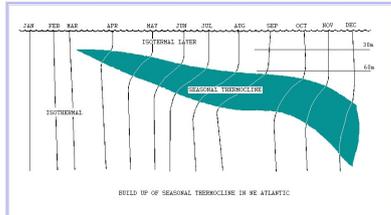
78

Acústica – Parte 1

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

Latitudes médias

- À medida que o vento aumenta no Outono e ocorre arrefecimento da água, a termoclina sazonal acabará por ser destruída e reposta a estrutura de Inverno;



79

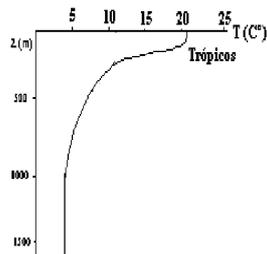
Estrutura da Temperatura

TRÓPICOS

80

Trópicos

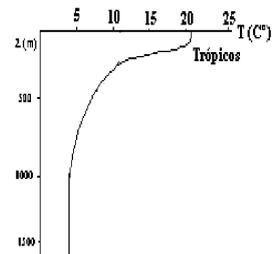
- Temperatura à superfície mais elevada;
- Camada superficial mais reduzida;



81

Trópicos

- Termoclina permanente com declive mais acentuado que nas latitudes médias;
- Geralmente não se verificam termoclinas sazonais;



82

Estrutura da Temperatura



83

Estrutura da Temperatura

- Ondulação e Vaga
- Ondas Internas

84

Acústica – Parte 1

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

Ondulação e Vaga

- A acção do vento sobre a superfície da água é a principal causa da ondulação e da vaga :
 - **Ondulação** - Resultado da acção do **vento a longas distâncias** e que após a propagação no oceano chega ao local onde se verifica;
 - **Vaga** - Resultado directo da acção do **vento no local** onde se faz sentir;

85

Ondulação e Vaga

- A dimensão das ondas depende:
 - Força do vento;
 - Intervalo de tempo em que se faz sentir (duração);
 - Área de actuação do vento (fetch);
- Podem ainda ser afectadas por:
 - Correntes (correntes favoráveis diminuem a altura e aumentam o c.d.o.);
 - Profundidade (diminuição prof. causa aumento da altura);
 - Batimetria (topografia do fundo);
 - Vento local;

86

Ondulação e Vaga

- Em **ASW** a **vaga** é mais prejudicial que a ondulação devido:
 - Aumento do ruído ambiente;
 - Degrada a capacidade de detecção de sistemas passivos / activos;
 - Aumento das reverberações (ecos falsos);

87

Ondulação e Vaga

- Em **ASW** a **vaga** é mais prejudicial que a ondulação devido:
 - Pesquisa visual e radar mais difícil e menos efectiva;
 - Imersão de antenas das Sonobóias;
 - Maior dificuldade na manobra do navio, desconforto a bordo leva a menor eficiência dos operadores;

88

Ondulação e vaga

- Em **ASUW**, para o Submarino, a **vaga** é mais prejudicial que a ondulação devido:
 - Maior dificuldade para se manter à cota periscópica;
 - Maior dificuldade na classificação / identificação dos alvos;
 - Em imersão profunda diminuição significativa nas distâncias de detecção;

89

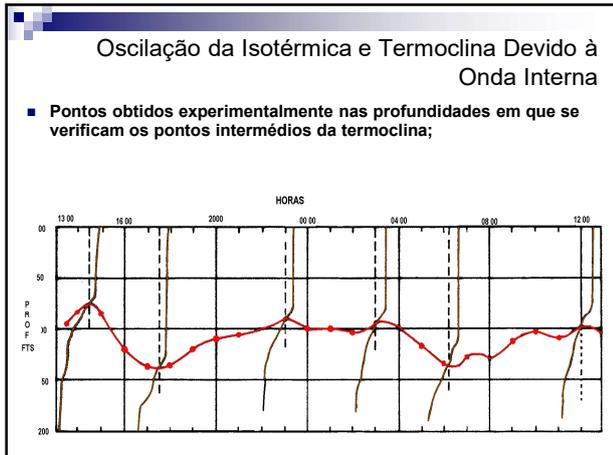
Ondas internas

- Ondas internas são **oscilações do Oceano** que ocorrem devido à existência de **diferenças de densidade em profundidade**;
- Fenómeno frequente entre a camada turbulenta de superfície e a termoclina, e entre a termoclina e a camada profunda
- Se estas diferenças de densidade forem transportadas para um gráfico densidade/profundidade ao longo do tempo, teremos uma linha de descontinuidade com aspecto ondulatório;

90

Acústica – Parte 1

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M



Ondas internas

Características:

- Amplitude – dezenas mts;
 - 30 a 50m entre crista e cava;
- Período – minutos a 5 dias;
- Comprimento onda – Ordem do Km;

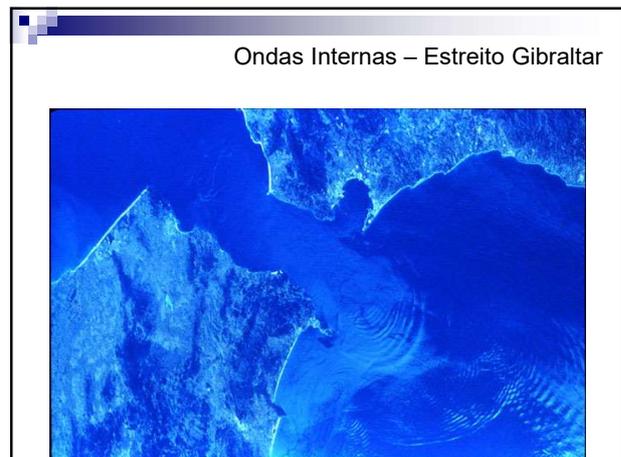
92

Ondas internas

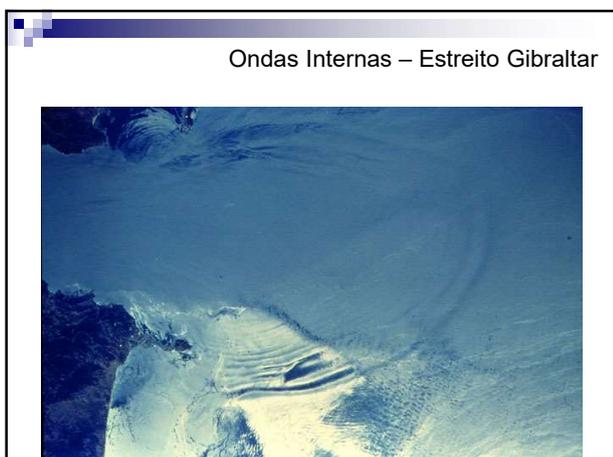
Implicações em ASW:

- Alterações de profundidade das diferentes camadas;
- Alterações da estrutura velocidade de propagação do som (consequência do anterior);
- Origina refrações e "focagem" dos raios sonoros de forma aleatória;
- Podem ser detectadas com uma série de leituras BT;

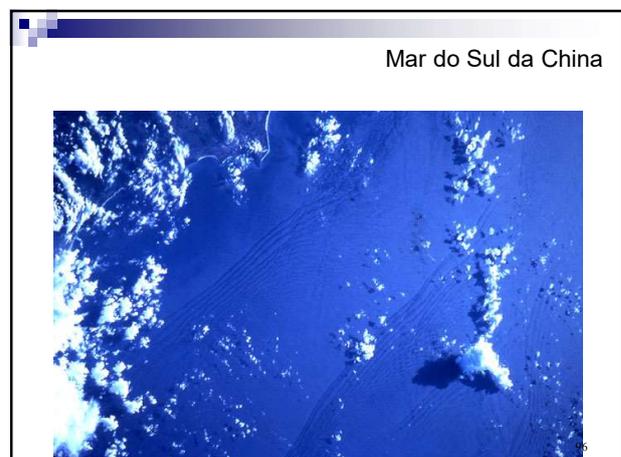
93



94



95



96

Acústica – Parte 1

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M



97