

# Acústica – Parte 2

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

## Acústica Lei de Snell

Victor Lobo (Baseado nas apresentações do CFR EN-AEL Mendes Abrantes)

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

1

## Propagação dos raios sonoros

- Lei de Snell;
- Propagação em Função do Gradiente da Temperatura;
- Propagação em Águas Pouco Profundas;
- Propagação em Águas Profundas;

2

## Refracção

- Uma onda sonora, ou raio sonoro, que atravessa dois meios com **densidades diferentes**, sofre mudanças de **velocidade**, e conseqüentemente, desvio de **direcção**.

3

## Frente de Onda & Raio Acústico

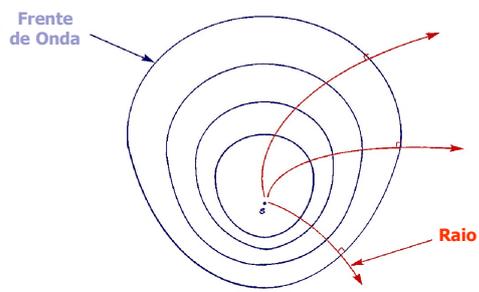
Propagação meio isotrópico



Frente de Onda – Pontos com a mesma fase  
Raio – Linha perpendicular à frente de onda

4

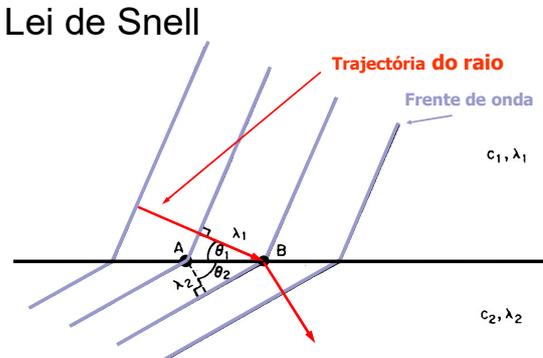
## Frente de Onda & Raio Acústico



Frente de Onda – Pontos com a mesma fase  
Raio – Linha perpendicular à frente de onda

5

## Lei de Snell



Trajectória do raio

Frente de onda

$c_1, \lambda_1$

$c_2, \lambda_2$

$\theta_1$

$\theta_2$

$\lambda_1$

$\lambda_2$

A B

6

# Acústica – Parte 2

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

## Lei de Snell

Quando um raio sonoro se propaga de uma camada de água onde a velocidade do som é  $C_1$ , para outra camada adjacente onde a velocidade do som é  $C_2$ , o raio sonoro sofre uma **inclinação** ao incidir na fronteira de separação das duas camadas, cujo valor é dado pela seguinte expressão:

$$\frac{C_1}{\cos \theta_1} = \frac{C_2}{\cos \theta_2}$$

$\theta_1$  – Ângulo de inclinação raio acústico incidente (Grazing Angle)

$\theta_2$  – Ângulo de inclinação raio acústico transmitido

7

7

## Lei de Snell

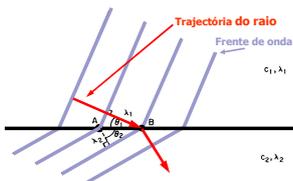
Se em vez do ângulo de Inclinação utilizarmos o ângulo de **Incidência** (ângulo que o raio faz com a normal à superfície de separação) obtém-se:

$$\frac{C_1}{\text{sen} \alpha_1} = \frac{C_2}{\text{sen} \alpha_2}$$

8

8

## Lei de Snell



$$\frac{C_1}{\cos \theta_1} = \frac{C_2}{\cos \theta_2}$$

$$\frac{C_1}{\text{sen} \alpha_1} = \frac{C_2}{\text{sen} \alpha_2}$$

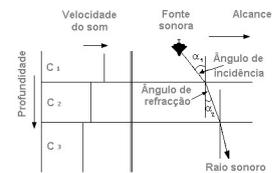
$$C_1 > C_2 \Rightarrow \theta_1 < \theta_2$$

$$C_1 > C_2 \Rightarrow \alpha_1 > \alpha_2$$

9

9

## Lei de Snell



10

10

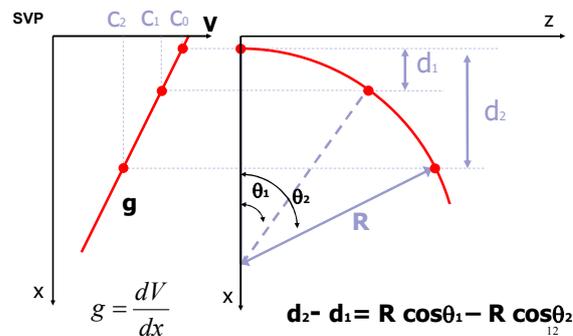
## Lei de Snell

" num meio cuja **velocidade do som varie linearmente com a profundidade**, os raios sonoros são arcos de circunferência, isto é, têm um **raio de curvatura constante**"

11

11

## Lei de Snell



12

12

# Acústica – Parte 2

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

## Lei de Snell

$$d_2 - d_1 = R \cos \theta_1 - R \cos \theta_2$$

- Uma vez que o gradiente de velocidade é linear temos:
 
$$c_1 = c_0 + g d_1$$

$$c_2 = c_0 + g d_2$$
- Logo:
 
$$d_2 - d_1 = (c_2 - c_1) / g$$

13

## Lei de Snell

$$d_2 - d_1 = R \cos \theta_1 - R \cos \theta_2 = (c_2 - c_1) / g$$

- De acordo com a lei de snell, o **arco de circunferência** entre P1 e P2 é um raio, logo:
 
$$\frac{c_0}{\cos \theta_0} = \frac{c_1}{\cos \theta_1} = \frac{c_2}{\cos \theta_2}$$
- A circunferência terá um raio:
 
$$R = -c_0 / (g \cos \theta_0)$$

14

## Lei de Snell

- Raio da circunferência:
 
$$R = -c_0 / (g \cos \theta_0)$$
- Logo, pela lei de Snell tem-se:
 
$$R = -\frac{c_0}{g \cos \theta_0} = -\frac{c_1}{g \cos \theta_1} = -\frac{c_2}{g \cos \theta_2}$$

15

## Lei de Snell

$R = -c_{\text{fonte}} / g$   
"O som é preguiçoso"

16

## Lei de Snell

**Termoclina:**

- $g = 0.06 \text{ /s}$
- $c_0 = 1490 \text{ m/s}$
- $R = 24833 \text{ m} \approx 24.8 \text{ Km}$

**Camada profunda:**

- $g = 0.017 \text{ /s}$
- $c_0 = 1490 \text{ m/s}$
- $R = 87647 \text{ m} \approx 87.6 \text{ Km}$

Fig. 11.2. Representative sound-speed profile for midlatitude, deep ocean water.

17

## Propagação dos raios sonoros

- Lei de Snell;
- Propagação em Função do Gradiente da Temperatura;
- Propagação em Águas Pouco Profundas;
- Propagação em Águas Profundas;

18

# Acústica – Parte 2

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

## Propagação dos raios sonoros

### Perfis do som:

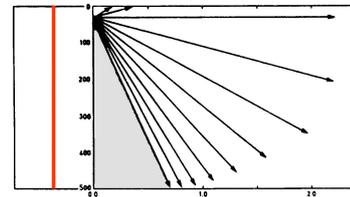
- A **refracção** é devida às **mudanças de velocidade** do som de um ponto para outro;
- Estas alterações de velocidade do som estão relacionadas com **gradientes de temperatura, salinidade e pressão**;
- A descrição gráfica da variação da velocidade do som denomina-se perfil da velocidade do som, usualmente designado por **SVP** (Sound Velocity Profile);

19

19

## Perfis do som

### Propagação com gradiente zero SVP:



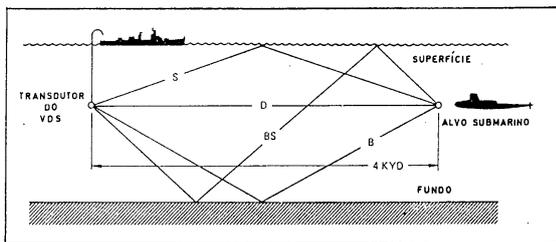
- O Som propaga-se em linhas rectas em todas as direcções, não há refacção do som;

20

20

## Gradiente zero SVP

- Propagação directa, reflectida no fundo e na superfície;

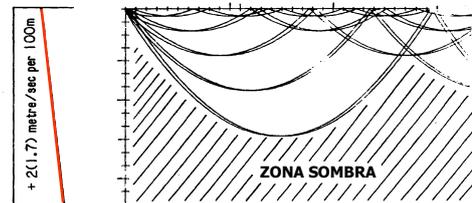


21

21

## Gradiente positivo SVP

- Ocorre a refacção do raio sonoro na direcção da superfície onde existe menor velocidade do som;

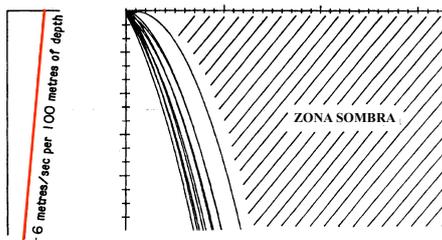


22

22

## Gradiente negativo SVP

- Ocorre a refacção do raio sonoro na direcção do fundo onde existe menor velocidade do som;



23

23

## Propagação dos raios sonoros

- Lei de Snell;
- Propagação em Função do Gradiente da Temperatura;
- Propagação em Águas Pouco Profundas;
- Propagação em Águas Profundas;

24

24

# Acústica – Parte 2

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

## Propagação som em águas pouco profundas

Conceito de águas pouco profundas:

- Águas interiores de bacias e portos, e águas costeiras com **profundidade inferior a 200 metros**
- Águas onde a **proximidade do fundo e da superfície** começa a afectar a eficiência dos sensores e armas ASW

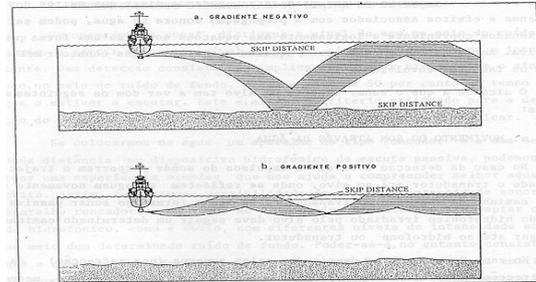
Ou

- Águas em que o **fundo e a superfície actuam como superfícies limite** para a formação de canais sonoros onde a propagação se estende a distâncias várias vezes superiores à profundidade

25

25

## Propagação som em águas pouco profundas



26

## Propagação dos raios sonoros

- Lei de Snell;
- Propagação em Função do Gradiente da Temperatura;
- Propagação em Águas Pouco Profundas;
- **Propagação em Águas Profundas;**

27

27

## Propagação som em águas profundas

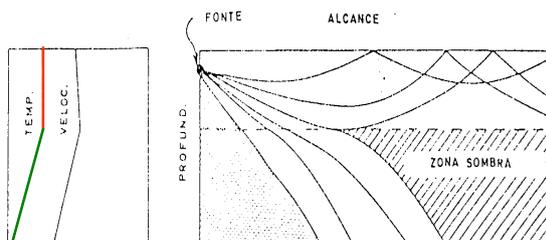
- Existem cinco perfis principais:
  - Isotérmica sobre gradiente negativo;
  - Pequeno gradiente negativo sobreposto a um gradiente positivo;
  - Gradiente negativo a partir da superfície;
  - Gradiente positivo a partir da superfície, sobreposto a um gradiente negativo;

28

28

## Propagação som em águas profundas

- Isotérmica sobre gradiente negativo

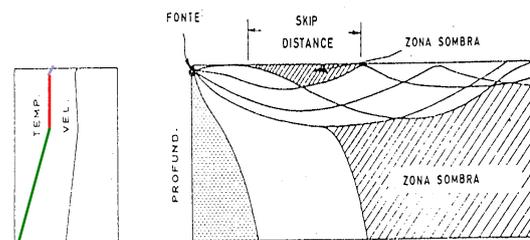


29

29

## Propagação som em águas profundas

- Pequeno gradiente negativo sobreposto a um gradiente positivo



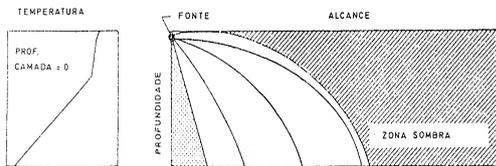
30

# Acústica – Parte 2

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

## Propagação som águas profundas

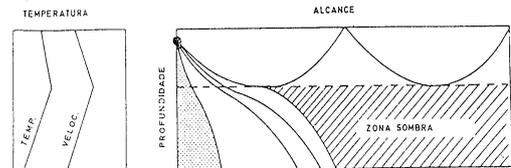
- Gradiente negativo a partir da superfície



31

## Propagação som águas profundas

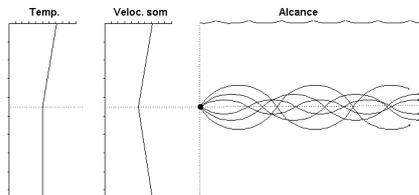
- Gradiente positivo a partir da superfície, sobreposto a um gradiente negativo;



32

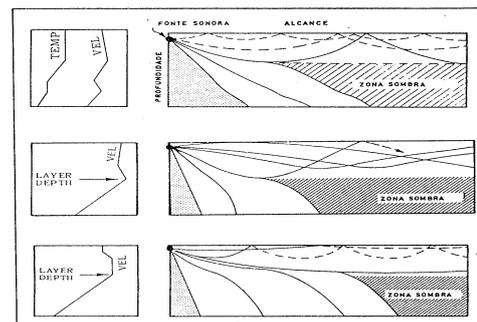
## Propagação som águas profundas

- Gradiente negativo sobre isotérmica



33

## Propagação som águas profundas



34



35