

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

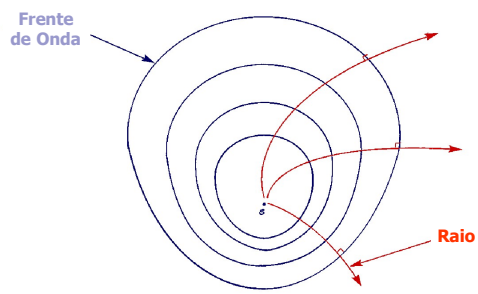
Propagação meio isotrópico



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

4

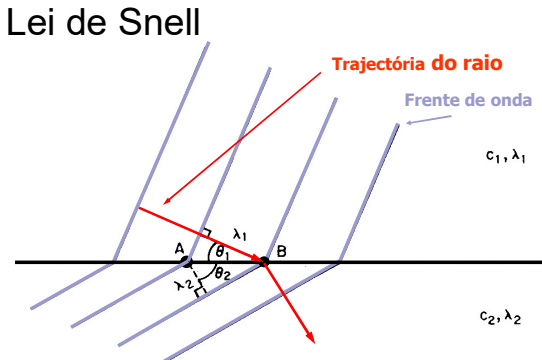
Frente de Onda & Raio Acústico



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, λ_1

c_2, λ_2

θ_1

θ_2

λ_1

λ_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:

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

θ_1 – Ângulo de inclinação raio acústico incidente (Grazing Angle)

θ_2 – Ângulo de inclinação raio acústico transmitido

7

7

Lei de Snell

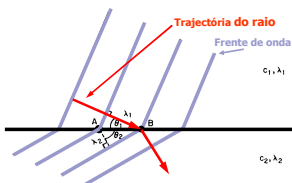
Se em vez do ângulo de Inclinação utilizarmos o ângulo de **Incidência** (ângulo que o raio faz com a normal à superfície de separação) obtém-se:

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

8

8

Lei de Snell



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

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

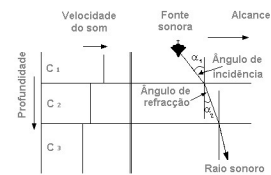
$$C_1 > C_2 \Rightarrow \theta_1 < \theta_2$$

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

9

9

Lei de Snell



10

10

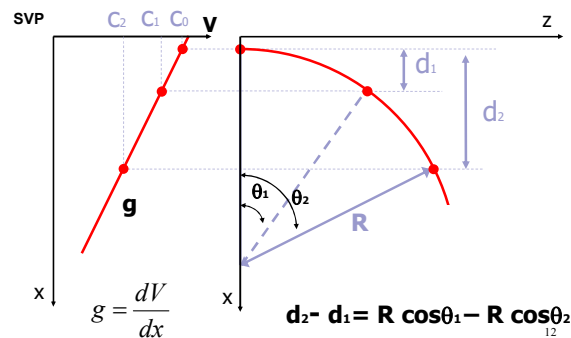
Lei de Snell

" 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:

- $g = 0.017 \text{ /s}$
- $C_0 = 1490 \text{ m/s}$
- $R = 87647 \text{ m} \approx 87.6 \text{ Km}$

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

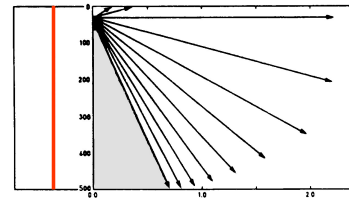
Perfis do som:

- 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

Perfis do som

Propagação com gradiente zero SVP:

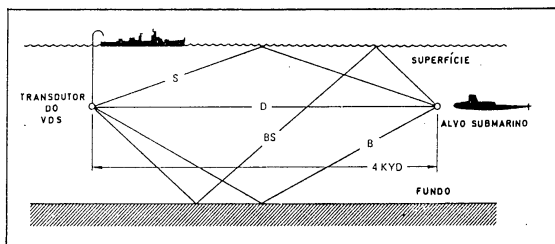


- O Som propaga-se em linhas rectas em todas as direcções, não há refracção do som;

20

Gradiente zero SVP

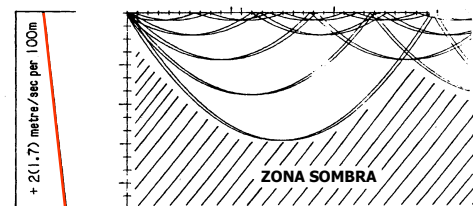
- Propagação directa, reflectida no fundo e na superfície;



21

Gradiente positivo SVP

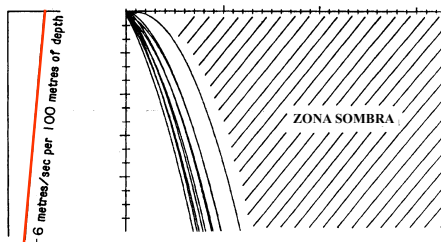
- Ocorre a refracção do raio sonoro na direcção da superfície onde existe menor velocidade do som;



22

Gradiente negativo SVP

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



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

19

20

21

22

23

24

Acústica – Parte 2

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

Propagação som em águas pouco profundas

Conceito de águas pouco profundas:

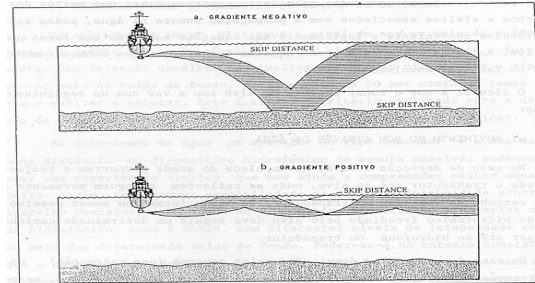
- Águas interiores de bacias e portos, e águas costeiras com **profundidade inferior a 200 metros**
- Águas onde a **proximidade do fundo e da superfície** começa a afectar a eficiência dos sensores e armas ASW

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

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

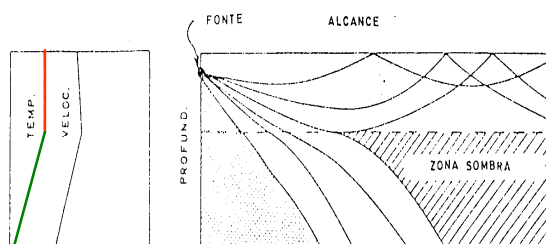
Propagação som em águas profundas

- 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

Propagação som em águas profundas

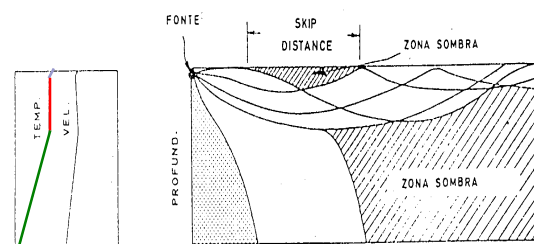
- Isotérmica sobre gradiente negativo



29

Propagação som em águas profundas

- Pequeno gradiente negativo sobreposto a um gradiente positivo



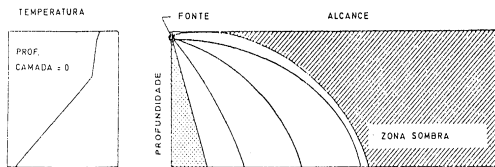
30

Acústica – Parte 2

4ºAno EN-AEL, 3ºAno M

Propagação som águas profundas

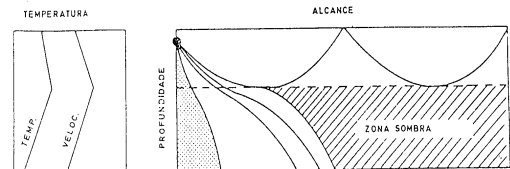
- Gradiente negativo a partir da superfície



31

Propagação som águas profundas

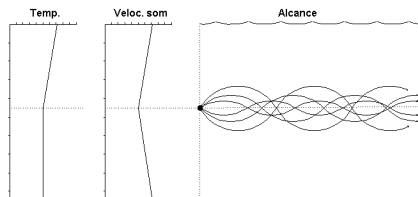
- Gradiente positivo a partir da superfície, sobreposto a um gradiente negativo;



32

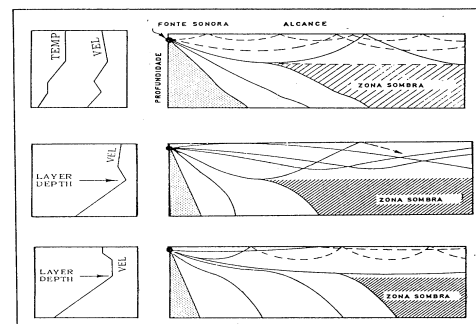
Propagação som águas profundas

- Gradiente negativo sobre isotérmica



33

Propagação som águas profundas



34



35