

# Geofísica Computacional Aplicada

## Fundamentos de Sísmica

Carlos H. S. Barbosa<sup>1</sup>  
José Luis Drummond Alves

10 de Julho de 2023



<sup>1</sup>[clshenry@lamce.coppe.ufrj.br](mailto:clshenry@lamce.coppe.ufrj.br)

## **PRINCIPAIS REFERÊNCIA:**

- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. An introduction to geophysical exploration (Vol. 4). John Wiley & Sons, 2002

Obs.: Imagens de autoria® dos escritores do livro (Exceto as imagens que contém referências na própria página).

## **REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES:**

- Chapman, C. Fundamentals of seismic wave propagation. Cambridge university press, 2004

# UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

## » SÍSMICA: ASPECTOS GERAIS

- Fundamentos de Sísmica
  - Tipos de Ondas Sísmica
  - Propagação da Onda com Traçados de Raios
  - Construção Geométrica do Sismograma
  - Velocidade Sísmica: Empilhamento, RMS e Intervalar
  - Reflexões Múltiplas
  - Arranjos fonte-receptor e seus Respectivos Sismogramas
  - Modelo Convolucionar
  - Exemplos Sismogramas

## » SÍSMICA: ASPECTOS GERAIS

- Fundamentos de Sísmica
  - Tipos de Ondas Sísmica
  - Propagação da Onda com Traçados de Raios
  - Construção Geométrica do Sismograma
  - Velocidade Sísmica: Empilhamento, RMS e Intervalar
  - Reflexões Múltiplas
  - Arranjos fonte-receptor e seus Respectivos Sismogramas
  - Modelo Convolucionar
  - Exemplos Sismogramas

# Motivação



Acquisition and processing of marine seismic data, Derman Dondurur.

# **FUNDAMENTOS DE SÍSMICA**

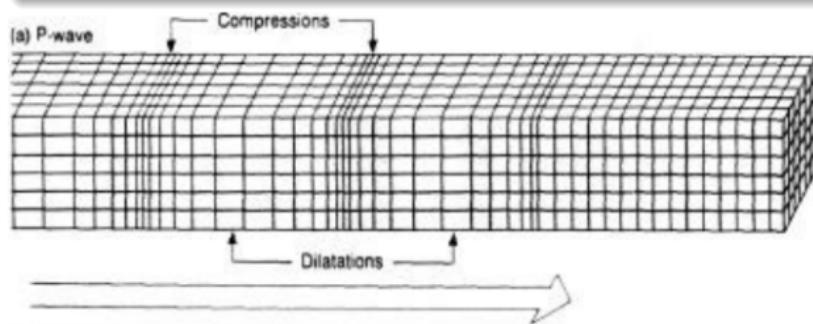
## Tipos de Ondas Sísmica

# Fundamentos de Sísmica: Tipos de Ondas

## **Onda Sísmica de Corpo (Body Waves)**

### Onda Compressional

- Outras denominações: onda P, onda primária ou onda longitudinal  
Compressões e dilatações ocorrem na direção de propagação da onda; e mais, perpendicular a frente de onda (*wavefront*).



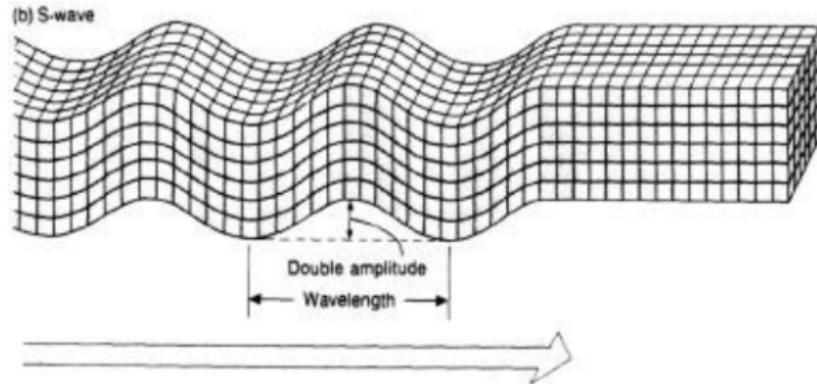
# Fundamentos de Sísmica: Tipos de Ondas

## **Onda Sísmica de Corpo (Body Waves)**

### Onda Cisalhante

- Outras denominações: onda S, onda secundária ou onda transversal

Os deslocamentos das partículas do material ocorrem na direção perpendicular à propagação da onda.



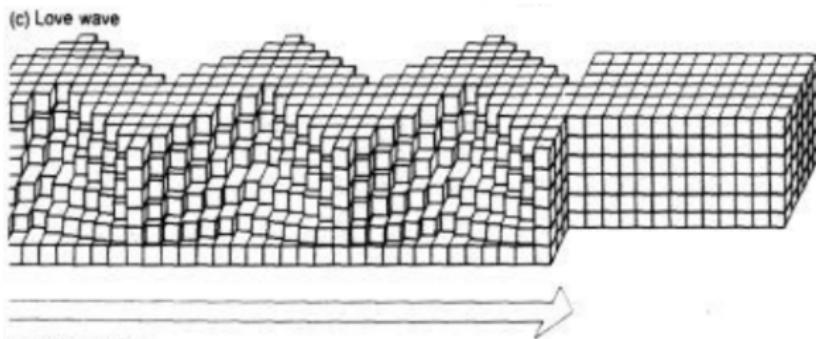
# Fundamentos de Sísmica: Tipos de Ondas

## **Onda Sísmica de Superfície (Surface Wave)**

### Onda Love

- Outras denominações: onda L ou onda de comprimento.

Os deslocamentos das partículas são paralelos a superfície livre e perpendiculares a direção de propagação.



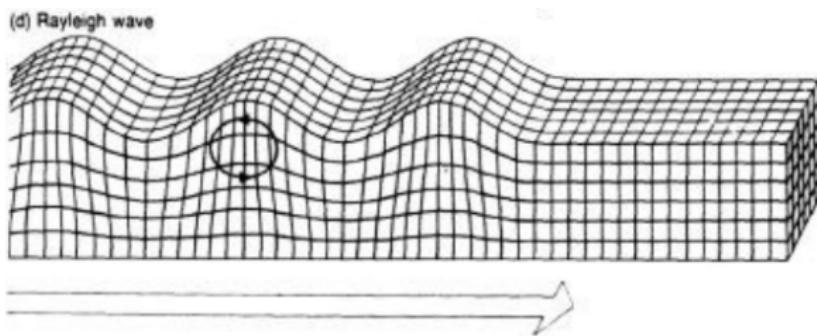
# Fundamentos de Sísmica: Tipos de Ondas

## **Onda Sísmica de Superfície (Surface Wave)**

### Onda Ground Roll

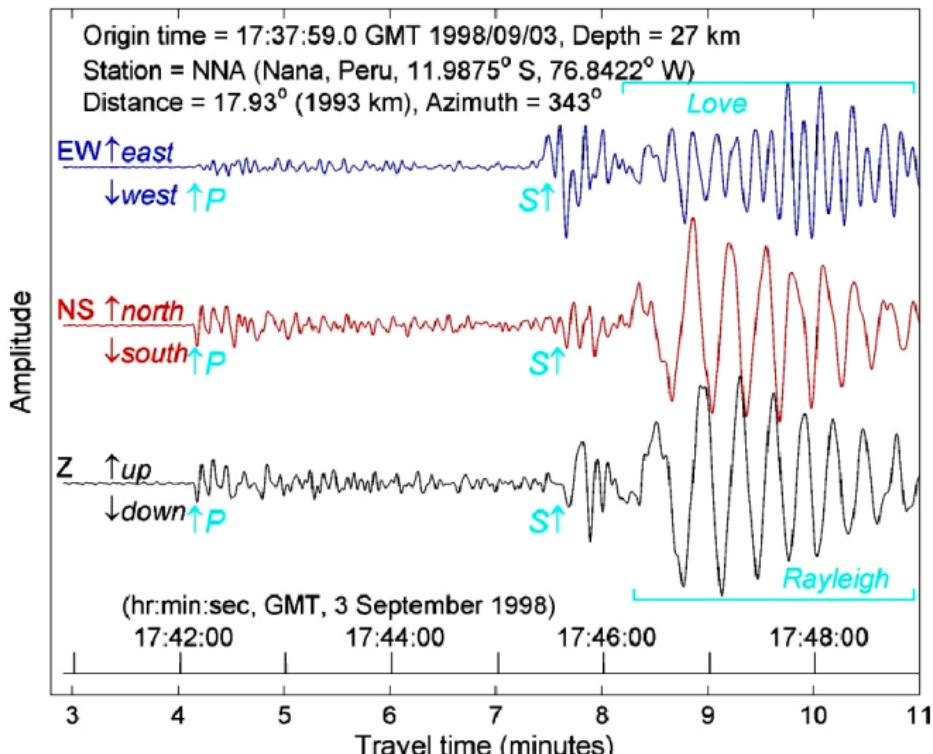
- Outras denominações: onda R ou onda Rayleigh

Os deslocamentos das partículas são ambos na direção de propagação da onda e perpendicular a ela, geralmente o deslocamento é elíptico, podendo ser progressivo ou retrógrado.



# Fundamentos de Sísmica: Tipos de Ondas

Magnitude 6.5 earthquake, near coast of central Chile,  $29.2934^{\circ}$  S,  $71.5471^{\circ}$  W



# Fundamentos de Sísmica: Ondas Sísmicas

## **Velocidades das Ondas Sísmicas: Observações**

- Velocidade de propagação de uma onda sísmica é a velocidade com que a energia sísmica se propaga através de um meio,
- Esta velocidade é independente da velocidade da partícula do meio perturbada pela passagem da onda,
- Os movimentos oscilatórios associados envolvem as velocidades da partícula, que dependem da amplitude da onda,
- Levantamento sísmico típico:
  - Velocidade da partícula: da ordem de  $10^{-8} \text{ ms}^{-1}$ ,
  - Deslocamento da partícula do meio: da ordem de  $10^{-10} \text{ m}$ .

# Fundamentos de Sísmica: Ondas Sísmicas

## Velocidades das Ondas Sísmicas: Observações

- Os módulos elásticos e densidades das rochas são diferentes. Isto implica em velocidades sísmicas diferentes. Tais diferenças são devidas às:
  - Variedades da composição da rocha,
  - Textura dos grãos - p.ex. formas de grãos e graus de seleção,
  - Porosidade e
  - Fluidos nos poros.
- Composição típica da rocha:
  - Matriz: parte da rocha que contém os grãos minerais,
  - Poros: é o volume restante que é ocupado por espaços vazios.

# Fundamentos de Sísmica: Ondas Sísmicas

## Velocidades das Ondas Sísmicas: Medições

- Estimada em campo através de um levantamento sísmico de reflexão ou refração,
- Medida diretamente em poços (*wells*) perfurados em uma região de interesse:
  - Utiliza-se para isto uma sonda sônica,
  - A sonda emite pulsos de alta frequência e, com isso, mede-se o tempo de trânsito desses pulsos através de um pequeno intervalo vertical da parede rochosa.
- Medida em laboratório com pulsos acústicos de alta frequência (aprox. 1MHz) com amostras cilíndricas de rochas.

# **FUNDAMENTOS DE SÍSMICA**

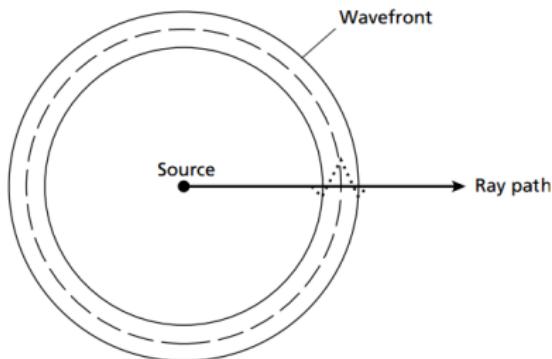
## Traçado de Raios

# Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

## Raios Sísmicos (seismic rays)

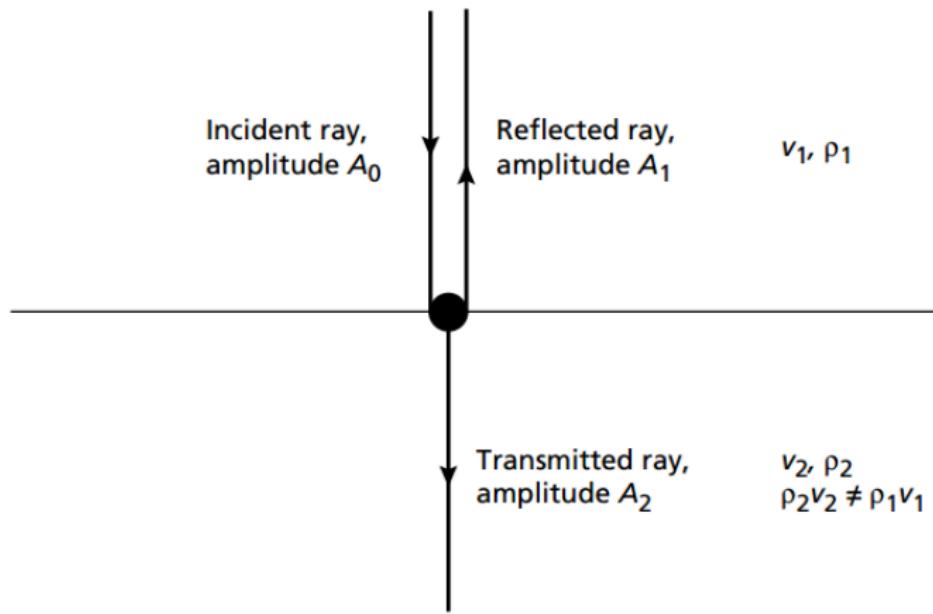
Definidos como finos feixes de energia sísmica avançando ao longo de trajetórias de raios que, em um meio isotrópico, são, em qualquer ponto, perpendiculares à frente de onda.

- Raios sísmicos não possuem significado físico,
- Representam bem o conceito das trajetórias da energia da onda em um determinado meio.



# Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

## Reflexão e transmissão de raios sísmicos normalmente incidentes



# Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

## Coeficiente de Reflexão

Medida numérica do efeito de uma interface sobre a propagação de onda, e é calculado como a razão entre a amplitude  $A_1$  do raio refletido e a amplitude  $A_0$  do raio incidente:

$$R = \frac{A_1}{A_0}.$$

## Coeficiente de Transmissão

Razão entre a amplitude  $A_2$  do raio transmitido e a amplitude  $A_0$  do raio incidente:

$$T = \frac{A_2}{A_0}.$$

# Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

## Coeficiente de Reflexão

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}.$$

## Coeficiente de Transmissão

$$T = \frac{2\rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}.$$

# Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

## Impedância Acústica

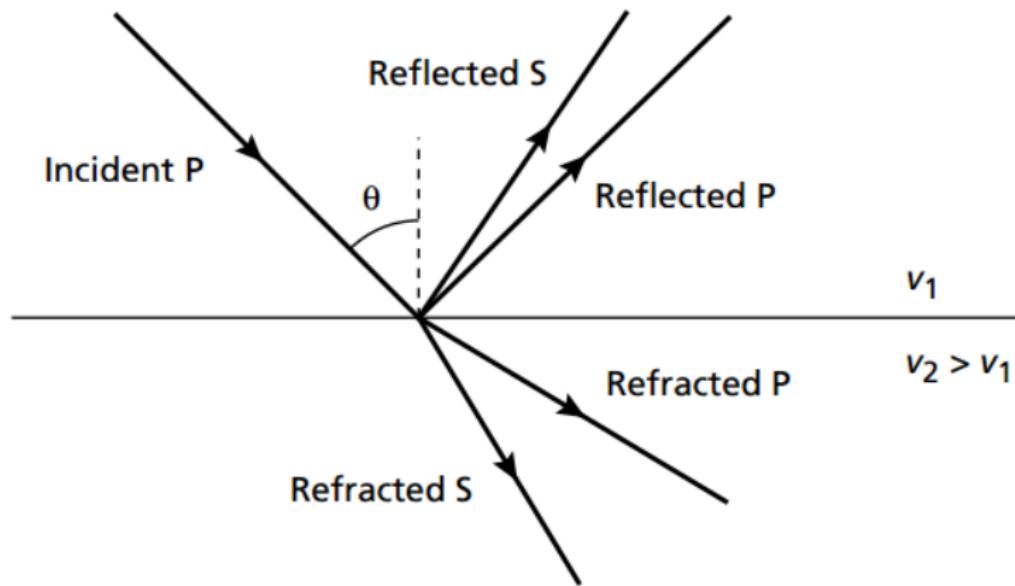
Produto da densidade ( $\rho$ ) da rocha pela velocidade de propagação da onda ( $v$ ) na mesma:

$$Z = \rho v.$$

- Energia total dos raios refletido e transmitido deve ser igual a energia do raio incidente,
- No geral, quanto mais rígida a rocha, mais alta é a sua impedância acústica.

# Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

## Reflexão e refração de raios sísmicos obliquamente incidentes



# Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

- A Lei de Refração de Snell aplica-se igualmente à óptica e à sísmica

## Lei de Snell

$$p = \frac{\sin i}{v},$$

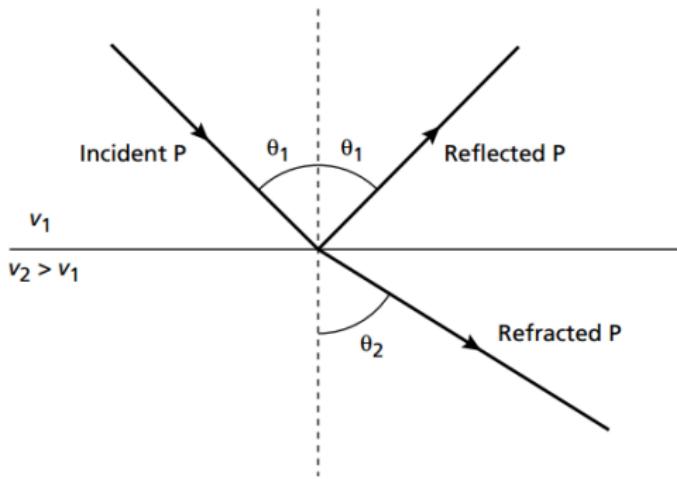
- $p$  é o parâmetro do raio,
- $i$  é o ângulo de inclinação em relação a normal.

## Lei de Snell Generalizada

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2}.$$

- $\theta_1$  e  $\theta_2$  são os ângulos de inclinação da onda incidente e refratada,
- $v_1$  e  $v_2$  são as velocidades das camadas 1 e 2, sendo  $v_2 > v_1$ .

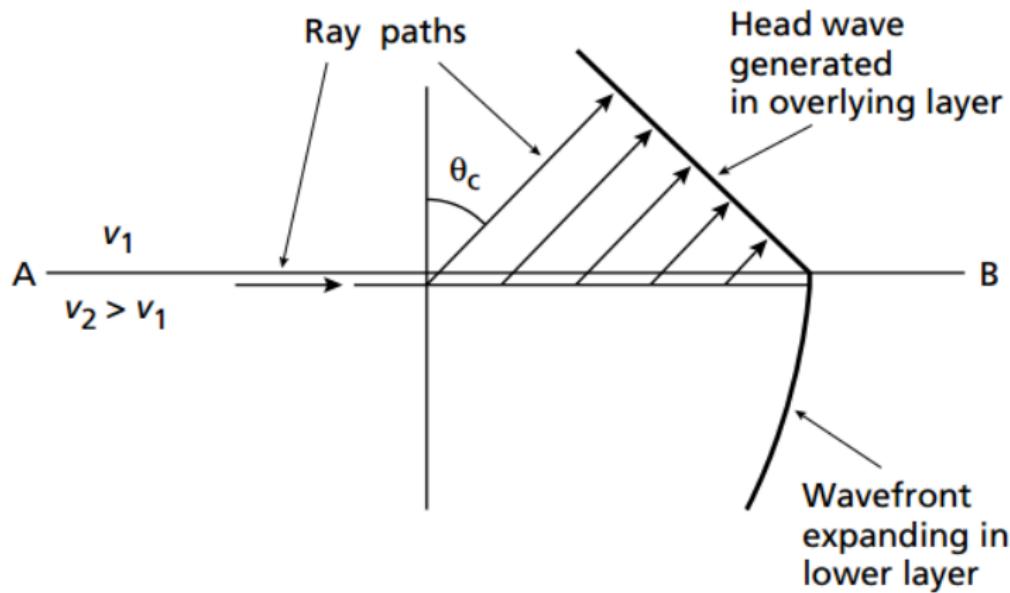
# Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios



- Se  $v_2 > v_1$ , o raio é refratado,
- Logo, o raio refratado se distancia da normal à interface, assim,  $\theta_2 > \theta_1$ ,
- A Lei de Snell também se aplica ao caso ao raio refletido:
  - Ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência.

# Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

## Refração Crítica



# Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

## Ângulo Crítico

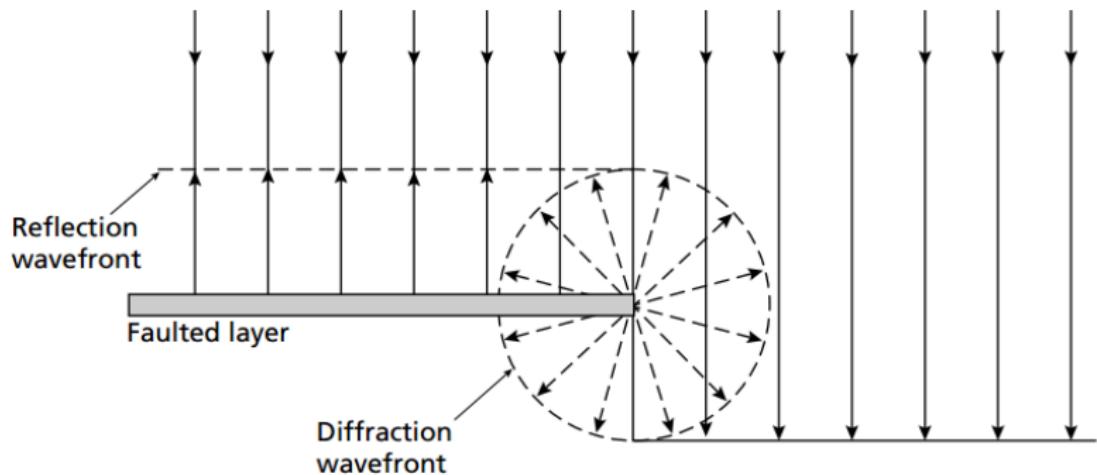
$$\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{v_1}{v_2} \right).$$

- $v_2 > v_1$  para que este fenômeno ocorra,
- Neste caso o ângulo de refração é de  $90^\circ$ ,
- Em sísmica a onda refratada com o ângulo de  $90^\circ$  é conhecida como onda frontal (*head wave*).

*A passagem do raio criticamente refratado ao longo do topo da camada inferior causa uma perturbação na camada superior que se propaga a uma velocidade  $v_2$ , que é maior que a velocidade sísmica  $v_1$ .*

# Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

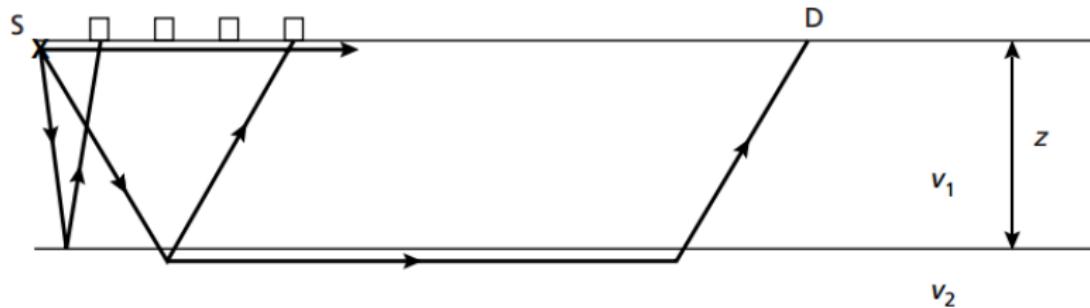
## Difração



# Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

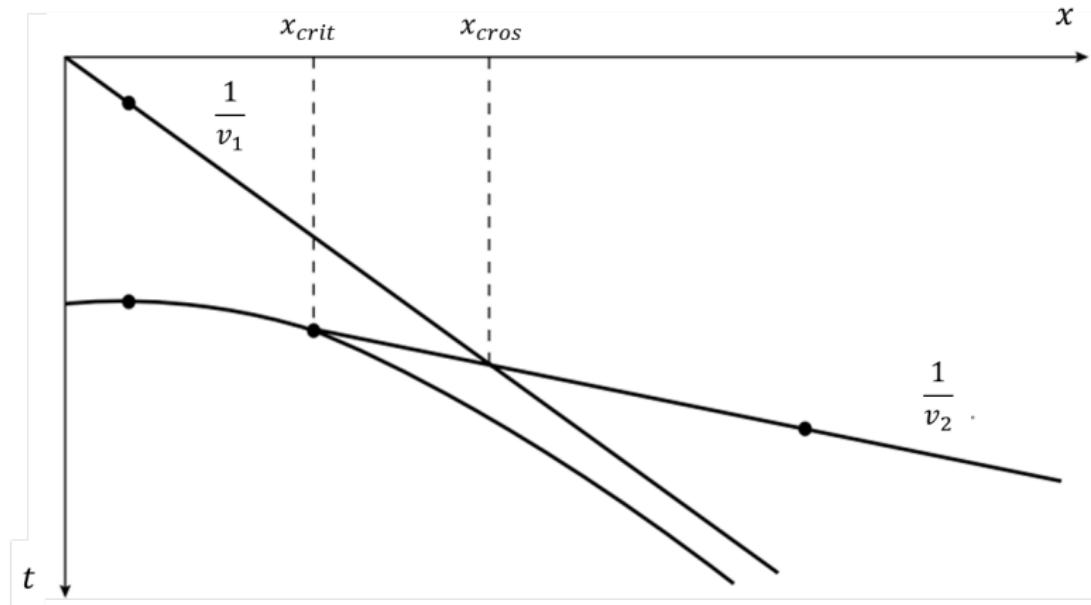
## Caminho dos Raios (*Ray Paths*)

- Onda direta,
- Onda refletida,
- Onda refratada.



# Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

## Curvas tempo de trânsito



# Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

**Equações que regem as trajetórias dos raios direto, refletido e refratado.**

Raio Direto

$$t_{dir} = \frac{x}{v_1}.$$

Raio Refletido

$$t_{refl} = \frac{(x^2 + 4z^2)^{1/2}}{v_1}.$$

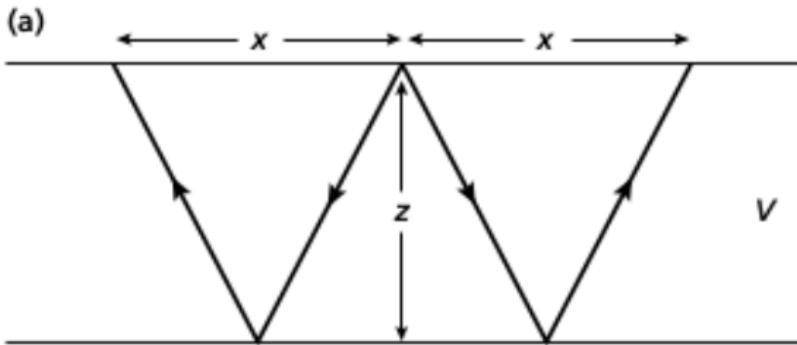
Raio Refratado

$$t_{refr} = \frac{x}{v_2} + \frac{2z \cos \theta_c}{v_1}.$$

# **FUNDAMENTOS DE SÍSMICA**

## Geometria das Trajetórias do Raio Refletido

# Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios



**Trajetória Oblíqua**

$$t = \frac{(x^2 + 4z^2)^{1/2}}{V}.$$

**Trajetória Normal**

$$t_0 = \frac{2z}{V}.$$

**Equação para determinar a velocidade  $V$  da camada:**

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{V^2}.$$

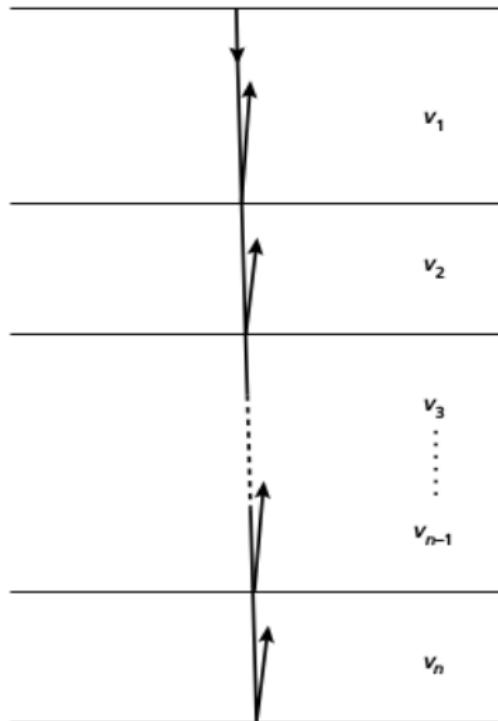
- Modo mais simples para a determinação da velocidade,
- Elimina a dependência da espessura da camada,
- O gráfico é uma reta de inclinação  $1/V^2$ , sendo a abcissa  $x^2$  e a ordenada  $t^2$ ,

# Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

## Considerações:

- Amplamente utilizada, explícita ou implicitamente, no processamento e na interpretação de dados de reflexão,
- Utilizado no cálculo das velocidades com os dados de reflexão, tal como, é feita na etapa de Análise de Velocidades,
- Esta velocidade é conhecida como velocidade de empilhamento,
- Estas análises são feitas em computador devido a enorme quantidade de camadas e trajetórias dos raios refletidos.

# Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios



## Velocidade Intervalar

$$v_i = \frac{z_i}{\tau_i}.$$

- $v_i$  corresponde a velocidade uniforme dentro de uma unidade geológica homogênea.
- $\tau_i$  é o tempo simples de percurso dentro da camada  $i$ .

## Velocidade Tempo Médio

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \tau_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i}.$$

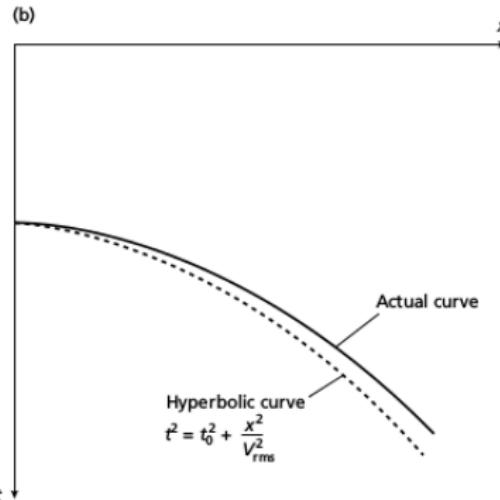
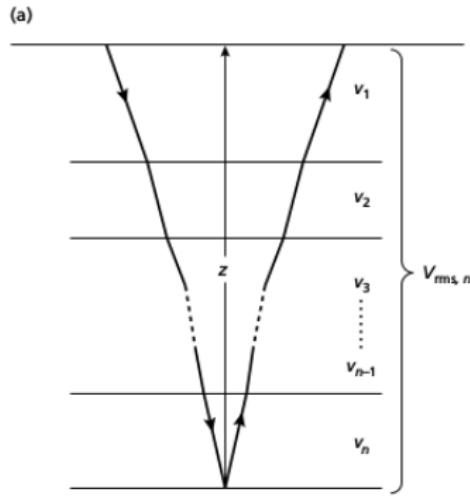
## Velocidade Quadrática Média

$$V_{rms,n} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n v_i^2 \tau_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i} \right]^{1/2}.$$

- Pequenos afastamentos quando comparados as profundidades dos refletores produz uma curva de tempo de percurso hiperbólica,
- As velocidades das camadas superiores a camada  $n$  são substituídas pela velocidade quadrática média (*RMS - Root Median Square*).

# Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

- Distanciamento da curva de tempo de percurso aumenta em relação à curva real conforme o aumento do afastamento.



# Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

## Fórmula de Dix

$$V_n = \left[ \frac{V_{rms,n}^2 t_n - V_{rms,n-1}^2 t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \right]^{1/2}.$$

- Velocidade intervalar  $v_n$  para a enésima camada,
- Notar que a velocidade RMS é convertida para profundidade utilizando a relação de Dix.

# Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

## Tipos de velocidades

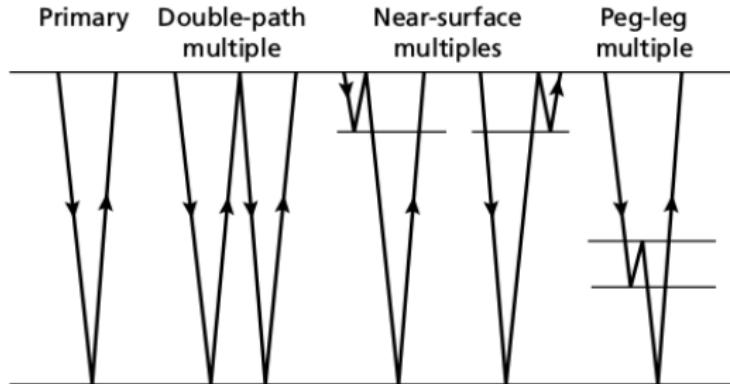
- **Velocidade de Empilhamento:** é uma relação entre distância e tempo determinada pela análise *normal moveout* (NMO) na família CMP do dado sísmico. A velocidade de empilhamento é utilizada para corrigir os tempos de chegada de eventos nos traços devido as variações nos afastamentos (*offset*) nos pares fonte-receptor.
- **Velocidade RMS (Root Mean Square):** é o valor da raíz quadrada da soma dos quadrados dos valores de velocidades dividido pelo número de valores. A velocidade RMS é aquela em que a onda atravessa as camadas em subsuperfície com diferentes velocidades intervalares ao longo de uma trajetória específica da onda.
- **Velocidade Intervalar:** velocidade, tipicamente da onda-P, de uma camada de rocha ou camadas de rochas. Ela é simbolizada por  $v_{int}$  e comumente calculada de perfis acústicos ou da mudança da velocidade de empilhamento entre os eventos sísmicos na família CMP.

Glossário Schlumberger

## **FUNDAMENTOS DE SÍSMICA**

Trajetórias de Raios de Reflexões Múltiplas

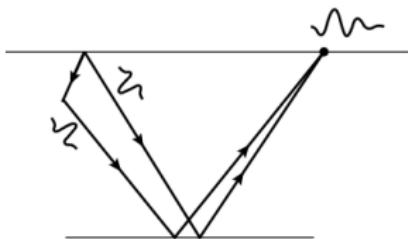
# Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios



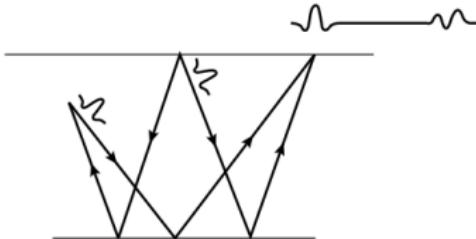
- **Reflexões primárias:** raios que retornam à superfície após refletir em uma interface,
- **Reverberações ou reflexões múltiplas:** trajetórias em um pacote multiestratificado pelas quais os raios podem retornar à superfície após reflexão em mais de uma camada.

# Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

## Múltipla Curto Período



## Múltipla Longo Período



- Comprimento da trajetória tão curto quanto o evento primário,
- Os pulsos se confundem como sendo um único sinal.

- Comprimento da trajetória mais longo do que o evento primário,
- Os pulsos podem ser distinguidos como eventos separados.

# Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

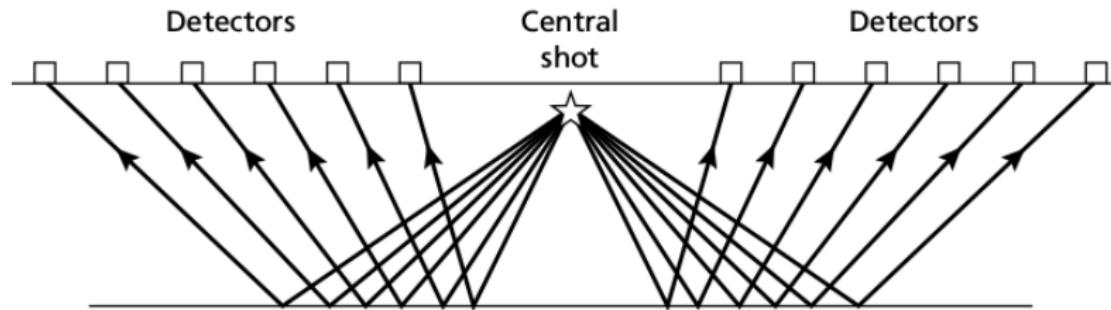
## Considerações:

- Geralmente as reflexões múltiplas tendem a ter amplitudes mais baixas que as reflexões primárias,
- As reflexões-fantasma (*ghost reflections*) e as reverberações da lâmina d'água possuem coeficientes de reflexão comparáveis às primárias,
- O reconhecimento das reflexões primárias é essencial para evitar erros de interpretação do dado final,
- As múltiplas podem ser suprimidas por meio de técnicas apropriadas,
- Ou podem ser processadas para o enriquecimento dos resultados finais.

# **FUNDAMENTOS DE SÍSMICA**

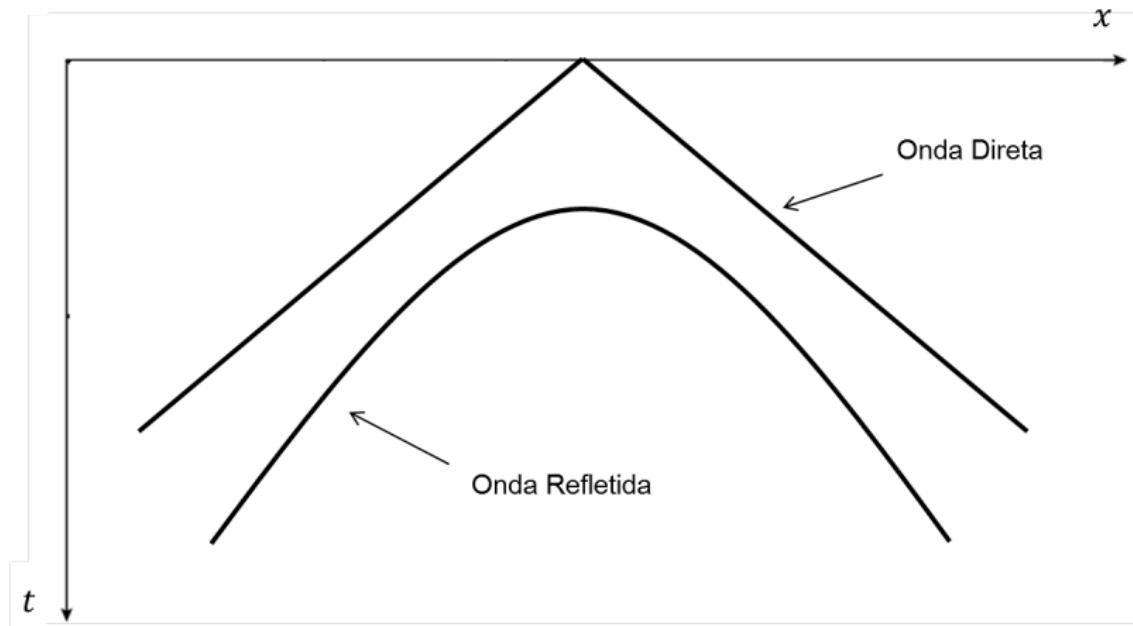
## Principais Arranjos Fonte-receptores

# Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

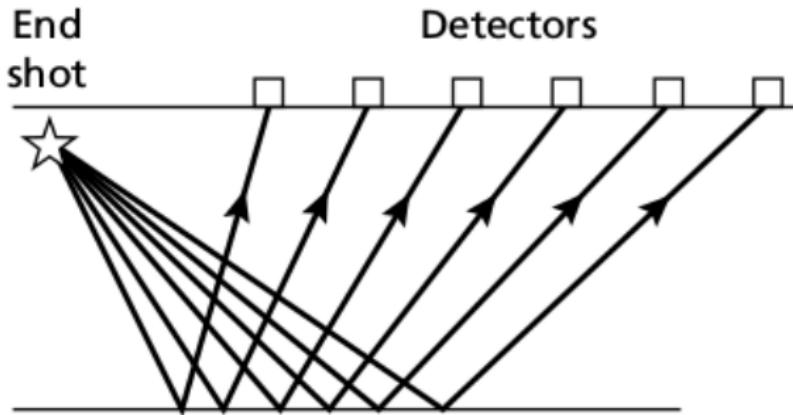


- A disposição dos dados apresenta grupos de traços sísmicos registrados a partir de um tiro comum,
- Este grupo de informação é conhecido como **família de tiro comum**,
- Arranjo conhecido como **Split-spread**.

# Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

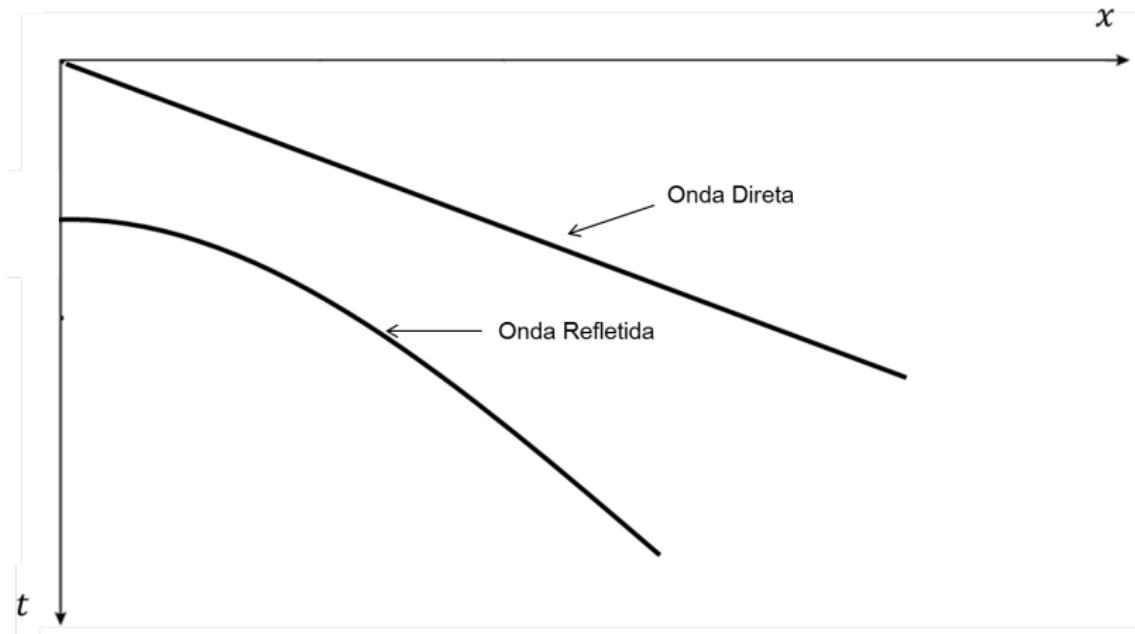


# Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios



- A disposição dos dados apresenta grupos de traços sísmicos registrados a partir de um tiro comum,
- Este grupo de informação é conhecido como **família de tiro comum**,
- Arranjo conhecido como **End-on**.

# Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios



# **FUNDAMENTOS DE SÍSMICA**

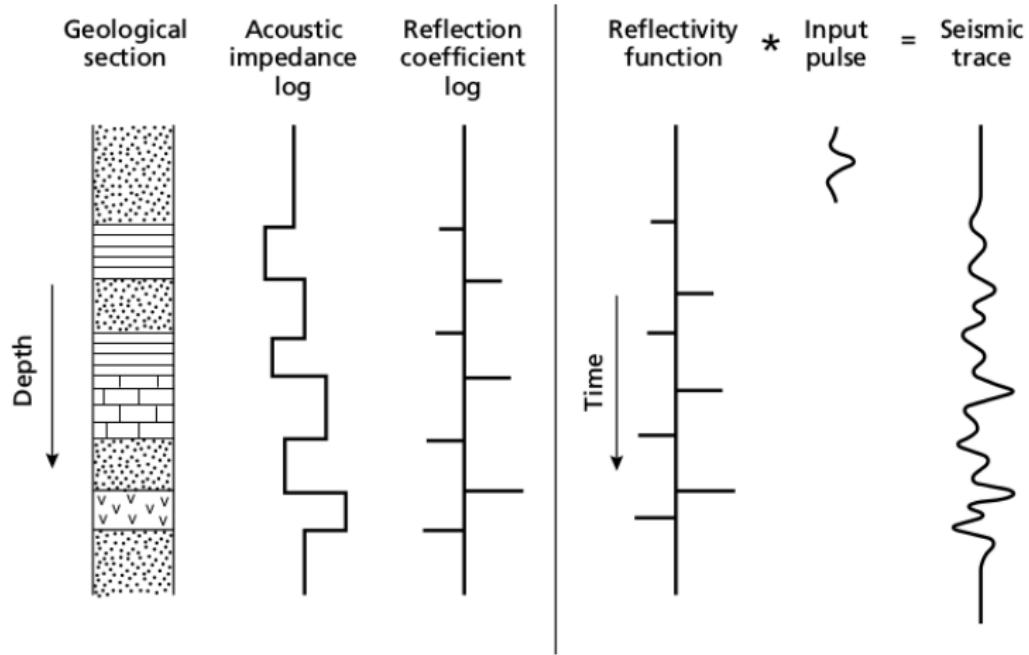
## O Sismograma

# Fundamentos de Sísmica: Sismograma

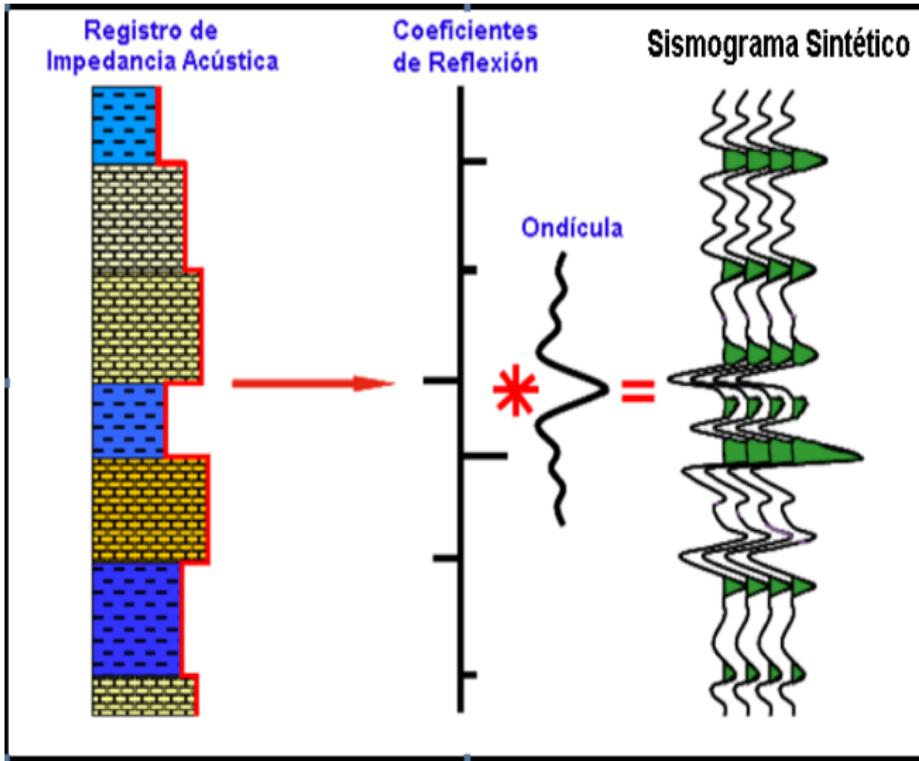
- O traço sísmico é a representação visual do padrão local do movimento vertical do solo (em terra) ou da variação da pressão (no mar),
- Esse traço sísmico representa a resposta combinada do meio estratificado e do sistema de registro do pulso,
- Os pulsos chegam em tempos determinados pelas profundidades das interfaces e pelas velocidades de propagação entre elas,

**Modelo Convolucional:** Assumindo o pulso inalterado enquanto se propaga através do meio estratificado, o **traço sísmico** pode ser interpretado como sendo a **convolução** do **pulso** de entrada com uma série temporal conhecida como **função refletividade**.

# Fundamentos de Sísmica: Sismograma



# Fundamentos de Sísmica: Sismograma



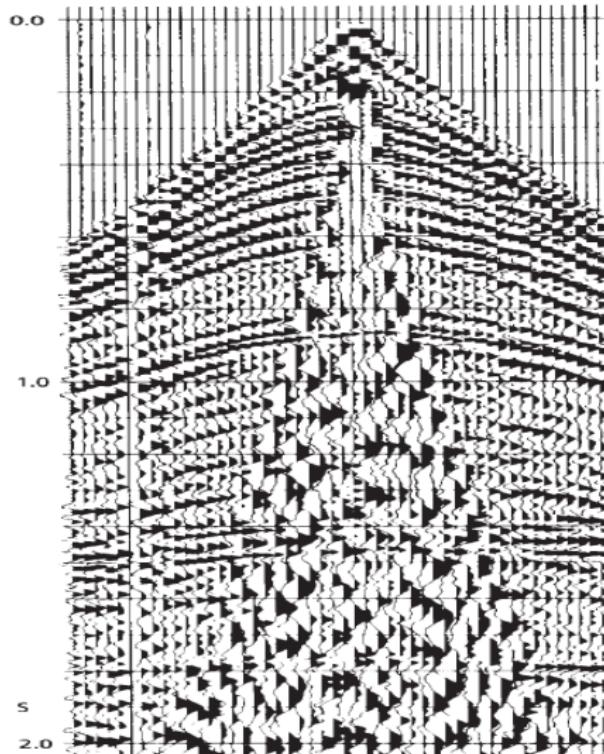
# Fundamentos de Sísmica: Sismograma

- Superposição de vários tipos de ruídos,
- Ruídos coerentes e incoerentes não relacionados à fonte sísmica,
- Ondas diretas, refratadas, onda se superfície (*ground roll* no caso terrestre),
- Além das reflexões primárias existem as reflexões múltiplas,
- Há limitações nos sistemas de registro dos sinais sísmicos.

*De posse dos traços sísmicos registrados, o objetivo é a realização do processamento sísmico visando o entendimento das estratificações rochosas. (1) remoção de ruído; (2) estimativa do pulso de entrada; (3) obtenção da função refletividade - deconvolução; (4) determinação da função velocidade; (5) cálculo das impedâncias acústicas (ou propriedades relacionadas) das formações geológicas.*

# Fundamentos de Sísmica: Sismograma

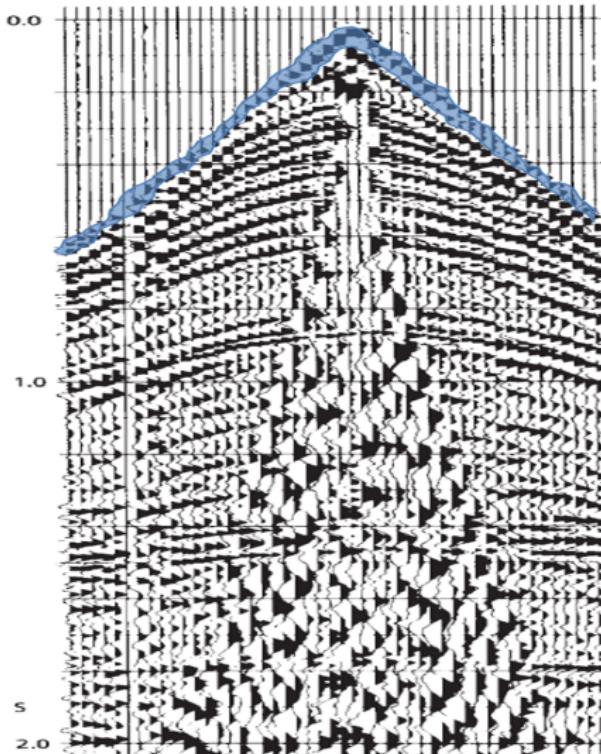
## TRAÇOS WIGGLE



- Onda Direta,
- Reflexões Primárias,
- Reflexões Múltiplas,
- *Ground Roll.*

# Fundamentos de Sísmica: Sismograma

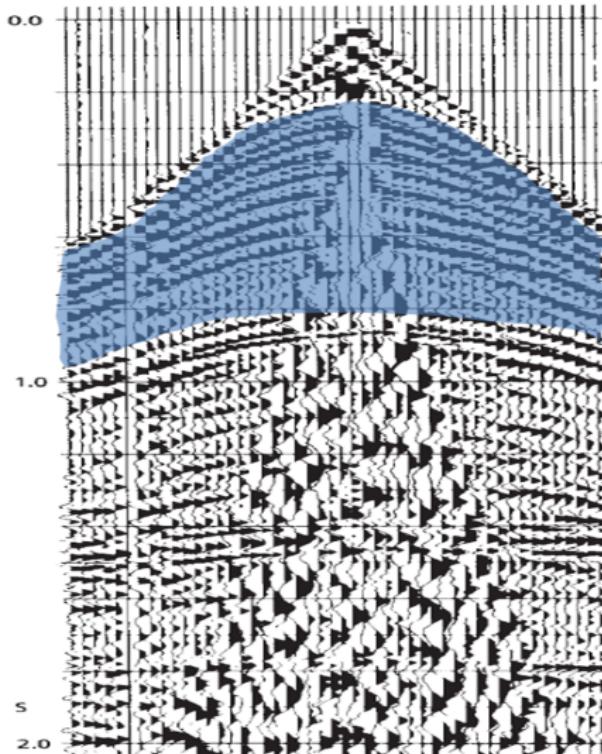
## TRAÇOS WIGGLE



- Onda Direta,
- Reflexões Primárias,
- Reflexões Múltiplas,
- *Ground Roll*.

# Fundamentos de Sísmica: Sismograma

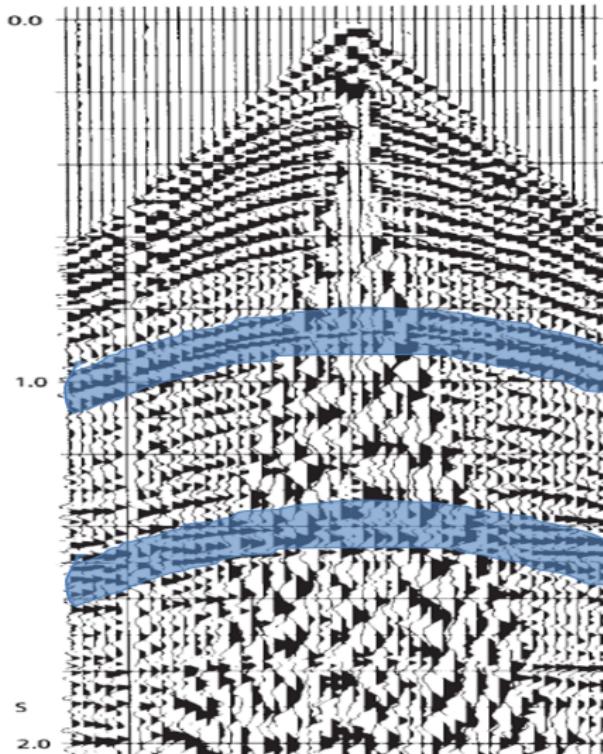
## TRAÇOS WIGGLE



- Onda Direta,
- **Reflexões Primárias,**
- Reflexões Múltiplas,
- *Ground Roll.*

# Fundamentos de Sísmica: Sismograma

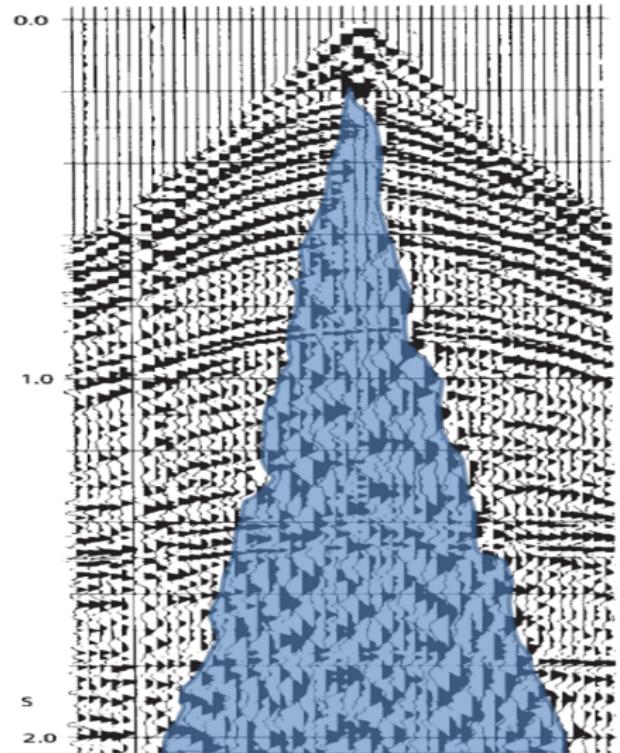
## TRAÇOS WIGGLE



- Onda Direta,
- Reflexões Primárias,
- **Reflexões Múltiplas,**
- *Ground Roll.*

# Fundamentos de Sísmica: Sismograma

## TRAÇOS WIGGLE



- Onda Direta,
- Reflexões Primárias,
- Reflexões Múltiplas,
- **Ground Roll.**

# Fundamentos de Sísmica: Sismograma

## TRAÇOS INTERPOLADOS

