

Geofísica Aplicada a Sísmica de Exploração

Fundamentos de Sísmica

Carlos H. S. Barbosa¹ & Luana N. Osório²

15 de Outubro de 2018



¹c.barbosa@nacad.ufrj.br

²luana.n.osorio@gmail.com

Sumário

» DIA 1

- Motivações
 - Levantamento Sísmico
 - Perspectivas da Indústria do Petróleo
- Fundamentos de Sísmica
 - Tipos de Ondas Sísmica
 - Interpretação Geométrica: Traçados de Raios
 - O Sismograma
 - Processamento Sísmico: Aspectos Gerais
- Aquisição Sísmica: *Onshore* e *Offshore*

» DIA 2

- Introdução
- Equação da Onda Sísmica
 - Domínio do Tempo - Equação Escalar da Onda
 - Domínio da Frequência - Equação de Helmholtz
- Método das Diferenças Finitas
 - Teoria
 - Discretização da Equação Escalar da Onda
- Ambiente Seismic Unix (SU)

» DIA 3

- Introdução
- Implementação Modelagem Sísmica
 - Linguagem de Programação C
 - Explicação da Estrutura do Código
- Aplicações Numéricas
 - Modelo de Velocidade Homogênea
 - Modelo de Velocidades Camadas Paralelas
 - Modelo de Velocidades Marmousi

Referências

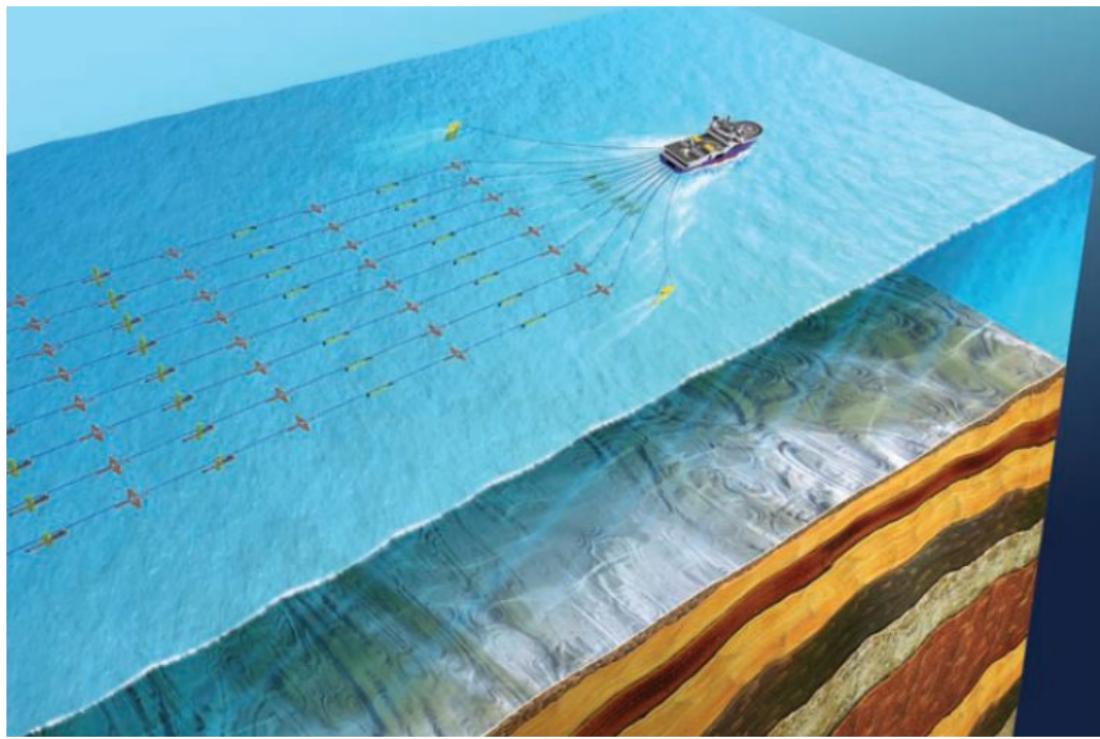
» **Curso baseado no livro "An Introduction to Geophysical Exploration"** escrito por Philip Kearey, Michael Brooks e Ian Hill e ministrado sem fins lucrativos na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ).

- Imagens de autoria® dos escritores do livro (imagens do primeiro dia de curso).
- Exceto as imagens que contém referências na própria página.

» **Referências complementares:**

- Manual do Seismic Unix (SU).
- Chapman, C. H. 2004. Fundamentals of seismic wave propagation, Cambridge UP.
- Ajo-Franklin, J. B. 2005. Frequency domain modeling techniques for the escalar wave equation: An introduction. s.l.: MIT.

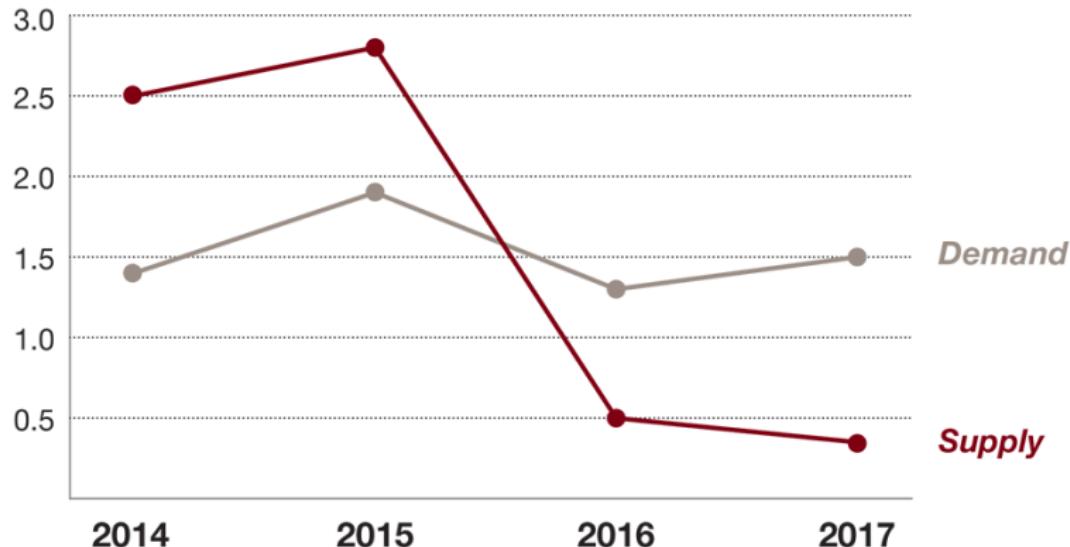
Levantamento Sísmico



Motivações: Indústria do Petróleo

Indústria do Petróleo: Strategy& Report 2018

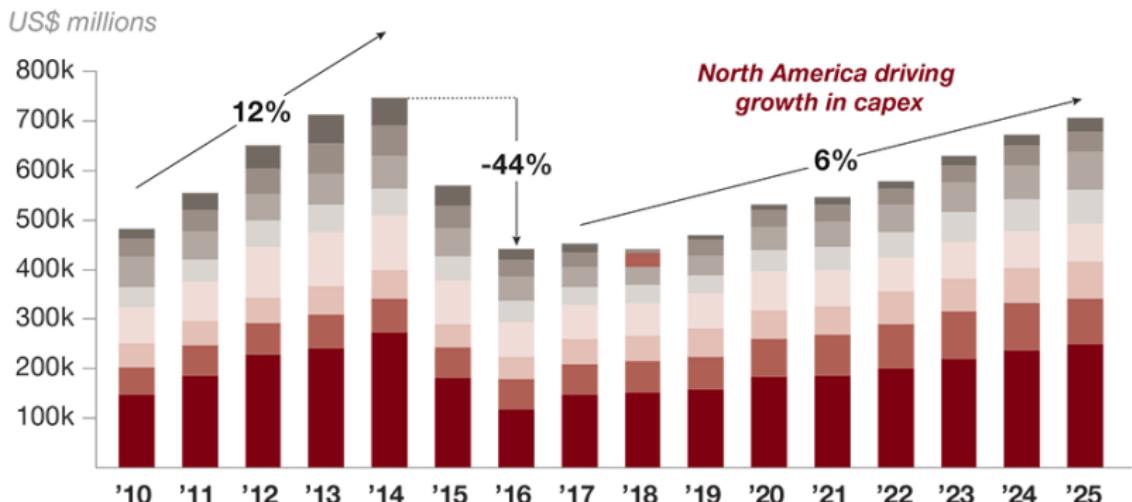
Million barrels/day



Source: IEA Oil Market Report, December 2017; Strategy& research

Indústria do Petróleo: Strategy& Report 2018

Global oil and gas capital expenditures

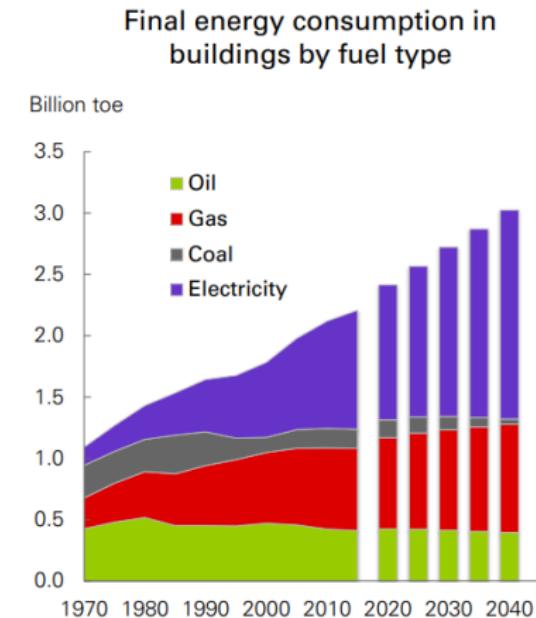
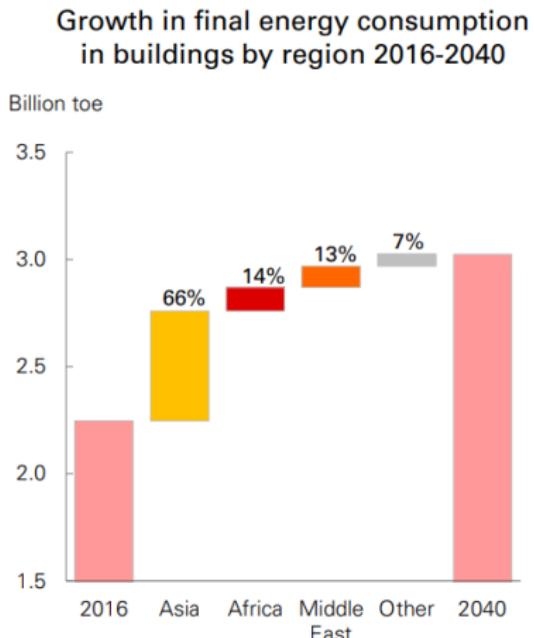


Source: Rystad Energy; Strategy& research

Australia
Europe
Africa
South America

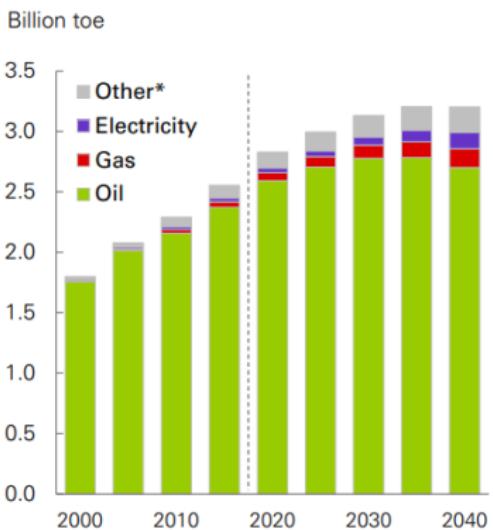
Asia
Russia
Middle East
North America

Indústria do Petróleo: BP Energy Outlook 2018

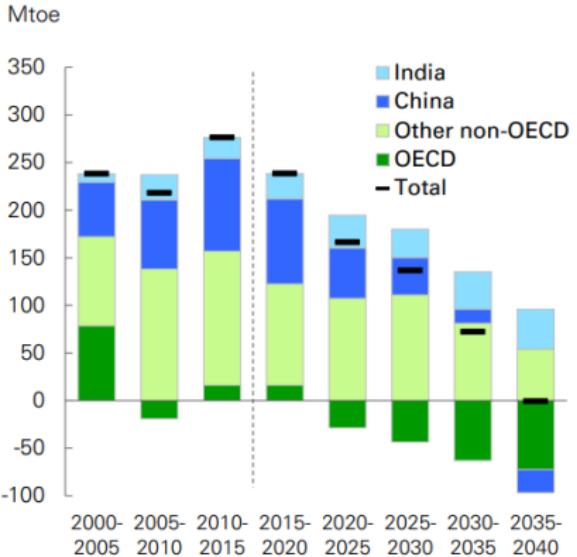


Indústria do Petróleo: BP Energy Outlook 2018

Transport energy consumption
by fuel type

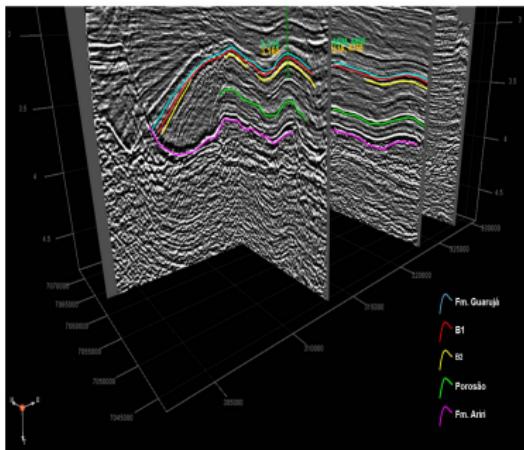


Transport energy consumption
growth by region



Indústria do Petróleo: Motivações Gerais

Construção de atributos sísmicos com a finalidade de auxiliar a interpretação sísmica, tais como, caracterização de reservatórios, definição das rotas de migração de hidrocarbonetos, entendimento dos sistemas deposicionais, etc...



Processamento Sísmico 2D/3D:

Pré-processamento: modelo de velocidades

Processamento: migração sísmica

Core: modelagem sísmica

Pós-processamento: atributos sísmicos

Interpretação Sísmica:

Interpretação de fraturas/falhas

Zonas de reservatório, rotas de migração, ...

Modelos deposicionais (ambientais, facies, ...)

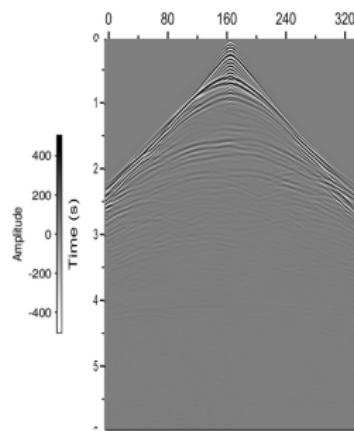
Indústria do Petróleo: Motivações Gerais

Fenômeno Físico Verdadeiro \neq Ferramentas de Simulação

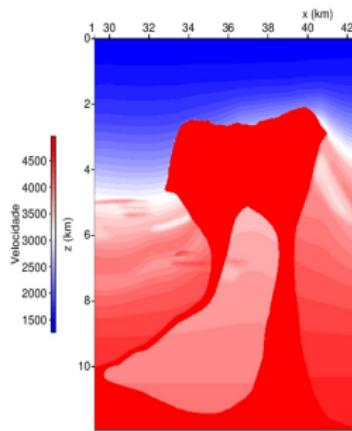
Equações resolvidas corretamente? | Equações e parâmetros corretos?

Existem **Erros** (Aproximações Numéricas, limite de convergência, etc) e **Fontes de Incertezas** (falta de conhecimento)

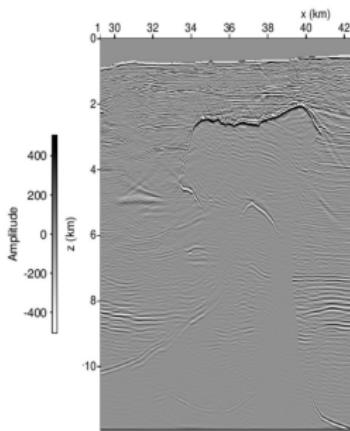
Aquisição



Análise de Velocidades



Migração



Indústria do Petróleo: Motivações para o Futuro

- Aumento de tecnologias digitais
 - Transformar operações/funcionalidades de tal forma a aproveitar as tecnologias digitais
 - Isto permitirá melhorar a eficiência dos processos e a abrir novas oportunidades
- Novos talentos para as tecnologias emergentes
 - Perfil do trabalhador da indústria está mudando
 - Os novos profissionais devem se adaptar as tecnologias digitais
 - Profissionais das áreas de **ciência da dados** e engenharia de software serão bastantes requisitados

Cientista de Dados: profissionais com conhecimentos nas áreas de matemática, física, estatística, linguagens de programação (C/C++, Python, Java, ...).

FUNDAMENTOS DE SÍSMICA

Tipos de Ondas Sísmica

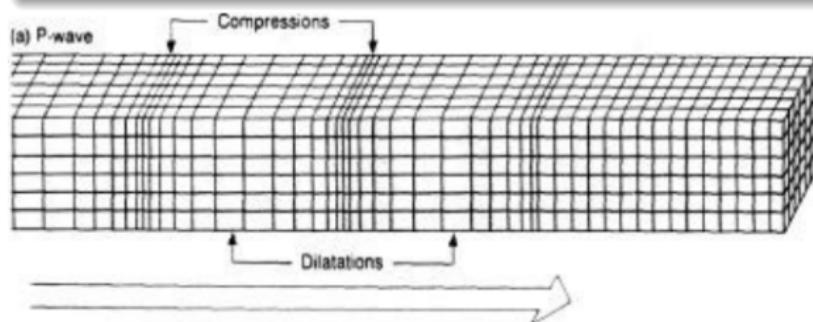
Fundamentos de Sísmica: Tipos de Ondas

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*).



$$v_p = \left[\frac{\psi}{\rho} \right]^{1/2}$$

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*).

- A onda P é a mais rápida em materiais sólidos,
- A energia dessa onda é a primeira a ser registrada,
- Estas ondas contêm, geralmente, os menores e maiores frequências em contraposição aos outros tipos de ondas.

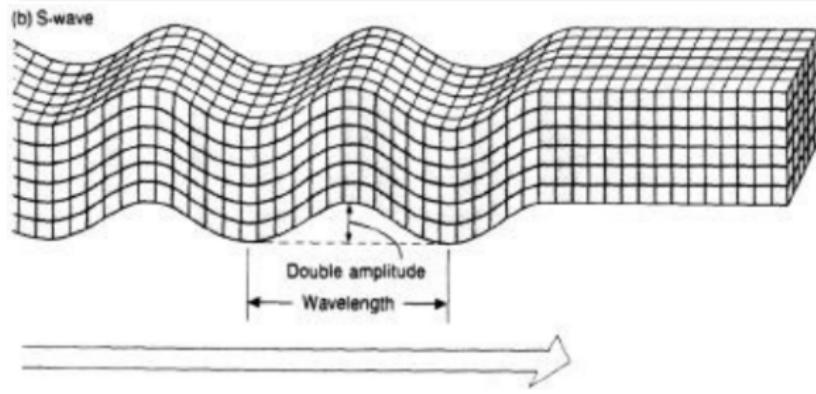
Fundamentos de Sísmica: Tipos de Ondas

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.



$$v_s = \left[\frac{\mu}{\rho} \right]^{1/2}$$

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.

- A onda S não se propaga em fluidos,
- Esta onda se propaga com uma velocidade menor do que a onda P.

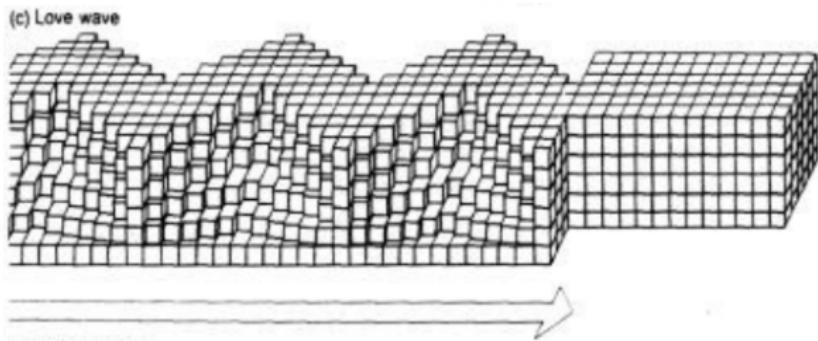
Fundamentos de Sísmica: Tipos de Ondas

Onda Sísmica de Superfície (Surface Wave)

Onda Love

- Outras denominações: onda L ou onda de comprimento.

Os deslocamentos das partículas são paralelos à superfície livre e perpendiculares à direção de propagação da onda, geralmente paralelo à superfície da Terra.



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 à superfície livre e perpendiculares à direção de propagação da onda, geralmente paralelo à superfície da Terra.

- A onda L só existe devido à superfície da Terra,
- Esta onda é dispersiva, ou seja, sua velocidade é dependente da frequência, geralmente com velocidades maiores para as baixas frequências,
- O poder de penetração no Terra também é dependente do conteúdo de frequência (baixas frequências, maior a profundidade).

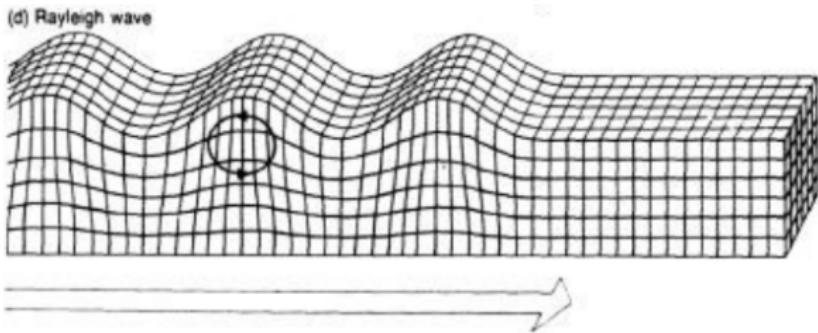
Fundamentos de Sísmica: Tipos de Ondas

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

Onda Sísmica de Superfície (Surface Wave)

Onda Ground Roll

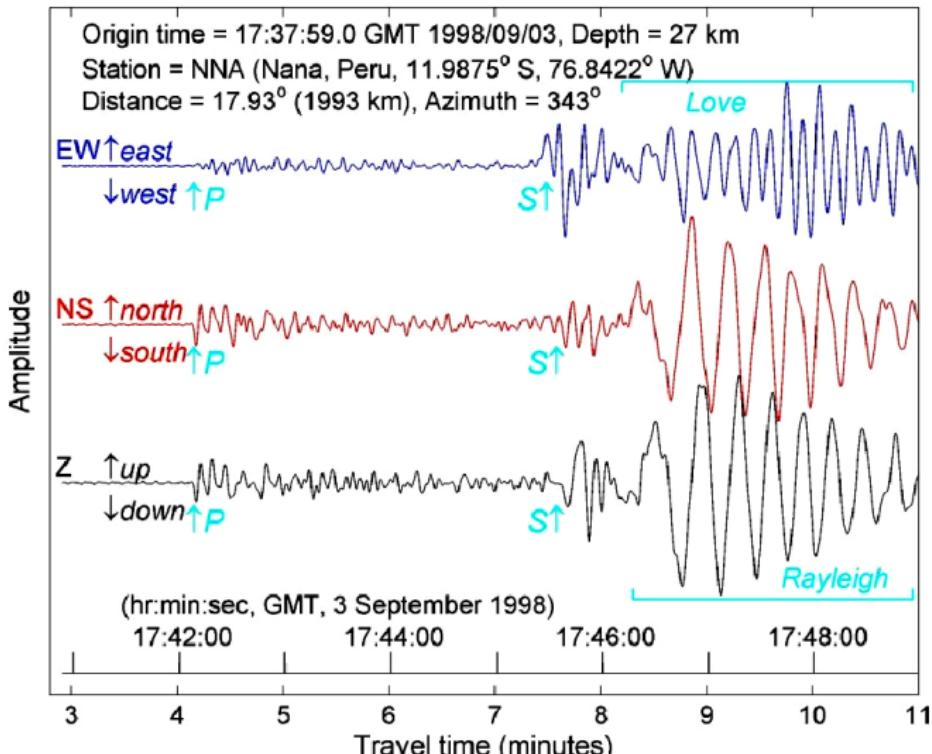
- Outras denominações: onda R ou onda Rayleigh

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.

- O Ground Roll também são dispersivos e só ocorrem em aquisições terrestres,
- A aparência e o deslocamento da partícula são similares a ondas que se propagam em líquidos,
- Geralmente, esta onda possui velocidade de propagação levemente menor do que a onda Love.

Fundamentos de Sísmica: Tipos de Ondas

Magnitude 6.5 earthquake, near coast of central Chile, 29.2934° S, 71.5471° W



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} ms^{-1} ,
 - Deslocamento da partícula do meio: da ordem de 10^{-10} m .

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

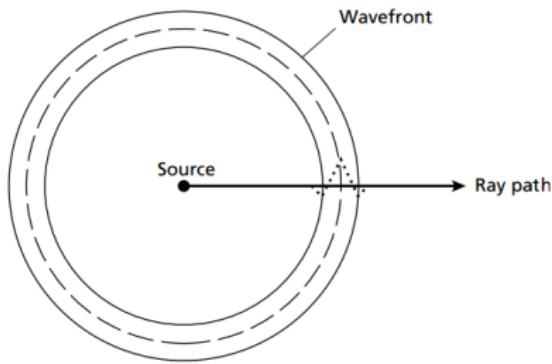
Traçado de Raios

Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

Raios Sísmicos (seismic rays)

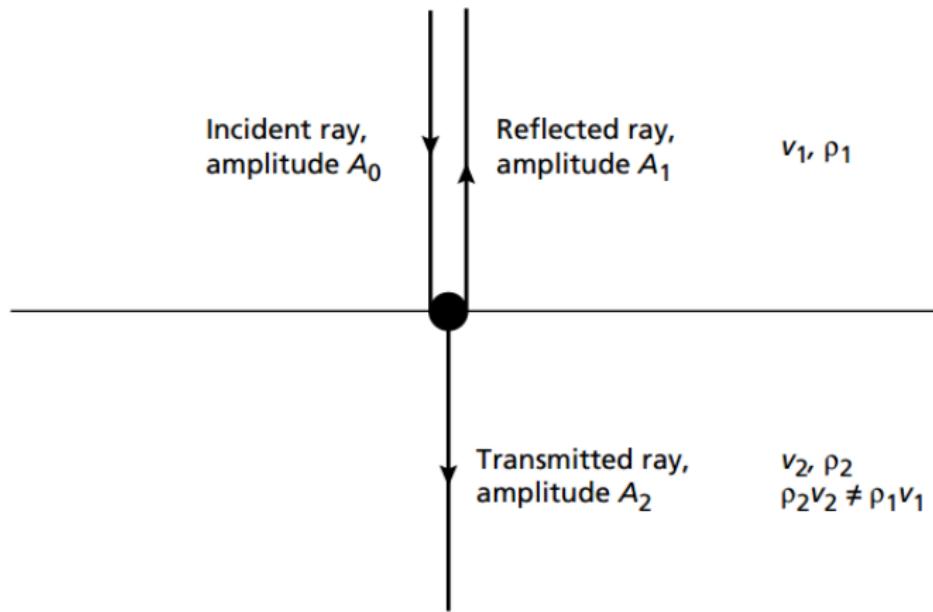
Definidos como finos feixes de energia sísmica avançando ao longo de trajetórias de raios que, em um meio isotrópico, são, em qualquer ponto, perpendiculares à frente de onda.

- 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:

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

Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

- Relacionar o coeficiente de reflexão às propriedades físicas dos materiais na interface é um problema complexo,
- A onda P depende dos módulos elásticos de volume e cisalhamento, assim como da densidade do material,
- Materiais diferentes implica em relações entre tensão e deformação diferentes para cada um deles,
- Outro fato importante é a orientação da tensão e deformação com relação a interface,
- A solução formal para este problema são conhecidas como equações de Zoeppritz (1919).

Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

Impedância Acústica

Produto da densidade (ρ) 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

Coeficiente de Reflexão

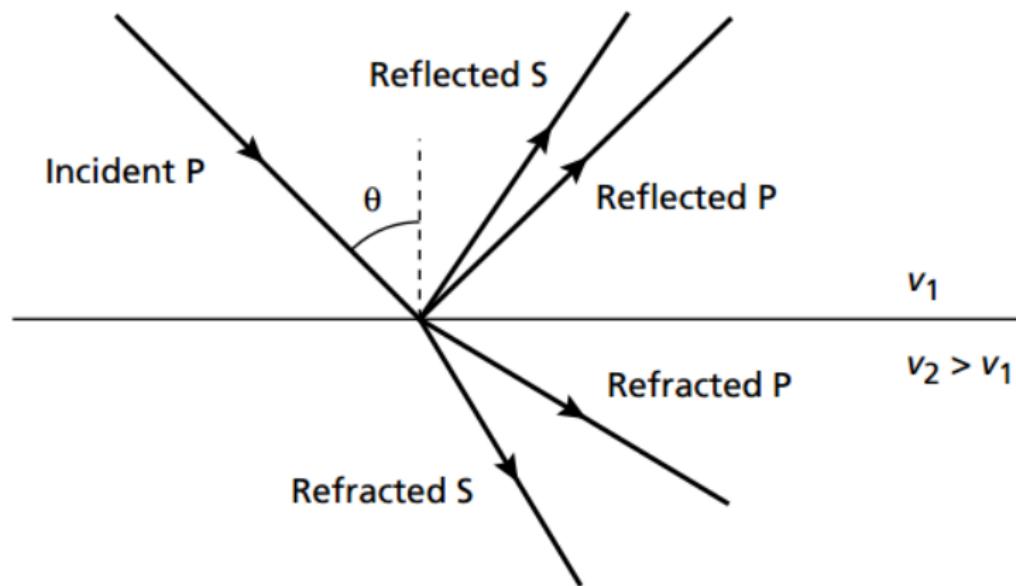
$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}.$$

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

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

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

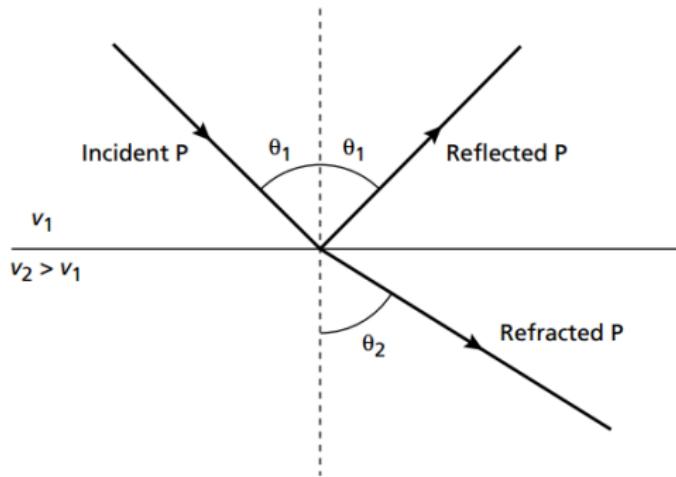
- p é o parâmetro do raio,
- i é o ângulo de inclinação em relação a normal.

Lei de Snell Generalizada

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

- θ_1 e θ_2 são os ângulos de inclinação da onda P incidente e refletida,
- v_1 e v_2 são as velocidades das camadas 1 e 2, sendo $v_2 > v_1$.

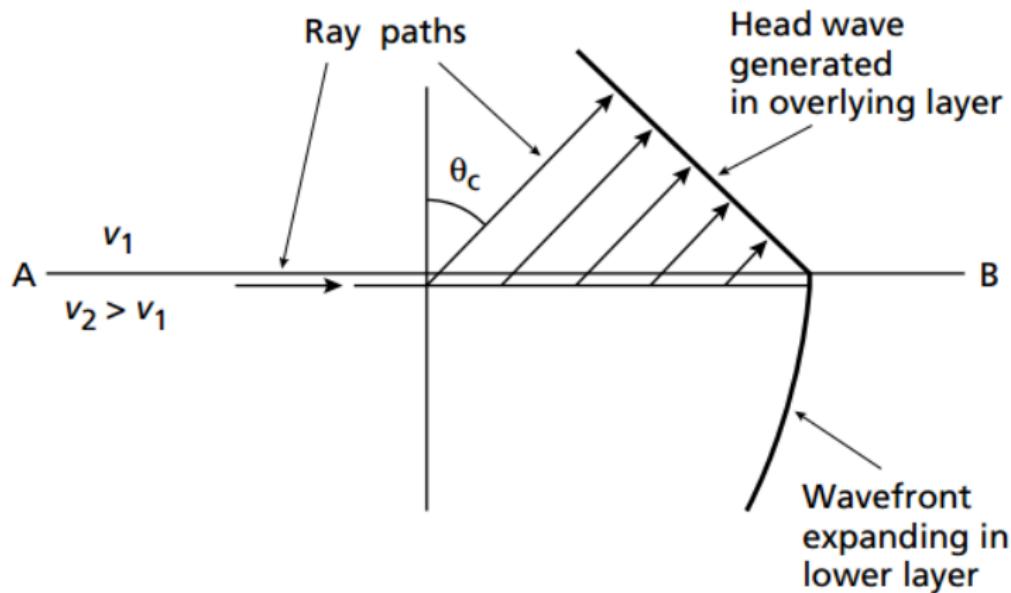
Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios



- 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

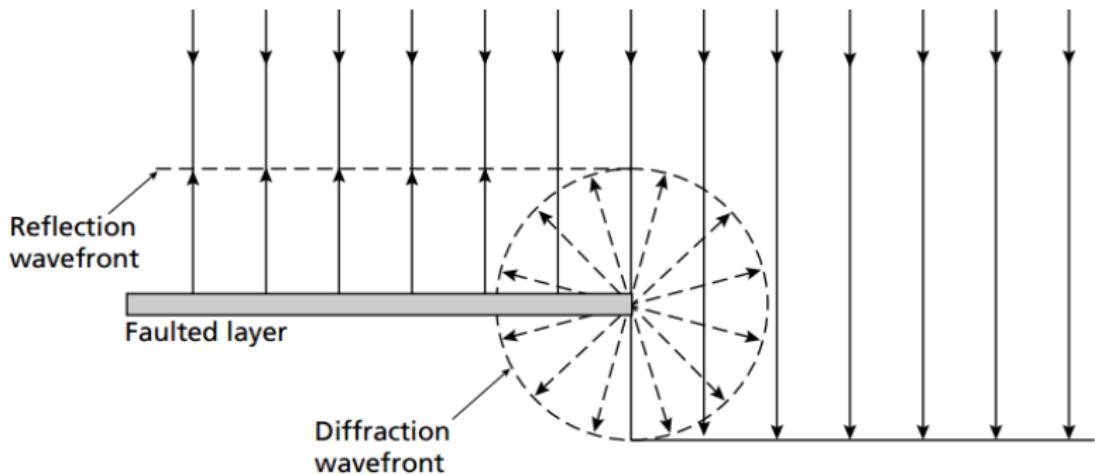
$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{v_1}{v_2} \right).$$

- $v_2 > v_1$ para que este fenômeno ocorra,
- Neste caso o ângulo de refração é de 90° ,
- Em sísmica a onda refratada com o ângulo de 90° é conhecida como onda fronta (*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

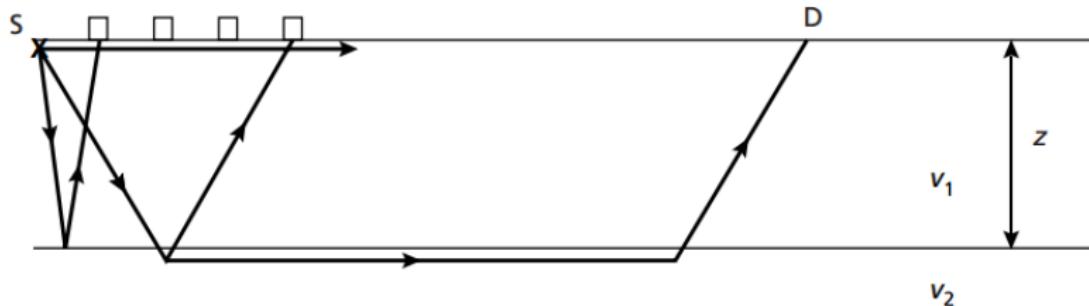
Difração



Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios

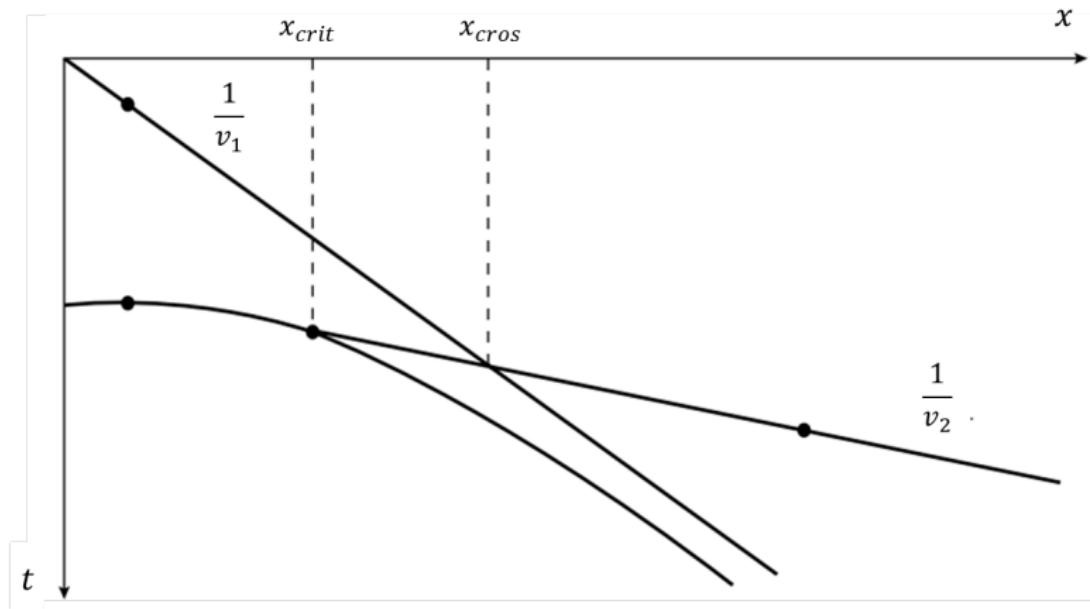
Caminho dos Raios (*Ray Paths*)

- 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

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

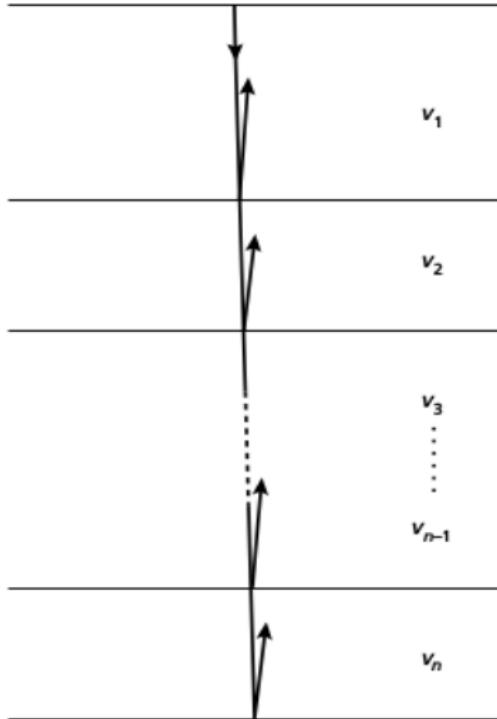
Raio Refratado

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

FUNDAMENTOS DE SÍSMICA

Geometria das Trajetórias do Raio Refletido

Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios



Velocidade Intervalar

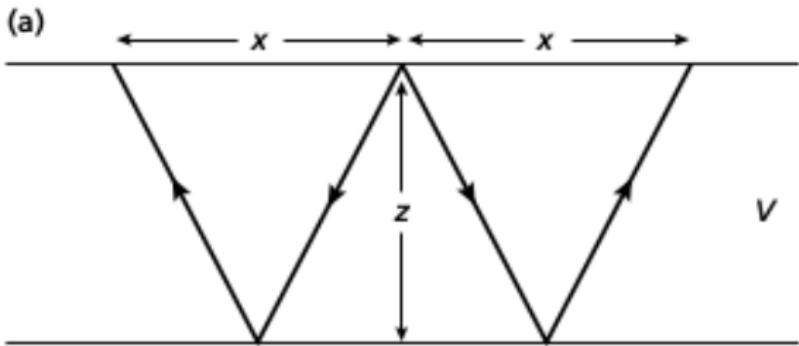
$$v_i = \frac{z_i}{\tau_i}.$$

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

Velocidade Tempo Médio

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

Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios



Trajetória Oblíqua

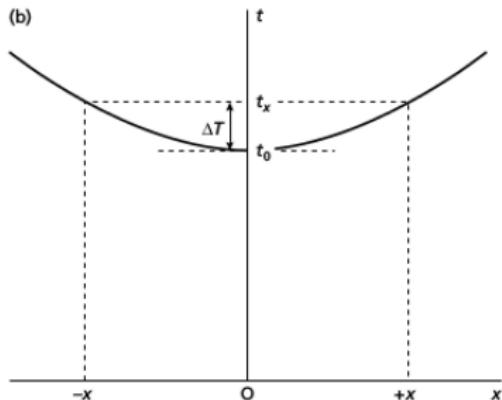
Trajetória Normal

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

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

Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

O gráfico de tempo de percurso dos raios refletidos pela distância de afastamento (curva tempo-distância) é uma hipérbole.



Trajetória Oblíqua

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

Trajetória Normal

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

Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

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 linha reta de inclinação $1/V^2$, sendo a abcissa x^2 e a ordenada t^2 ,

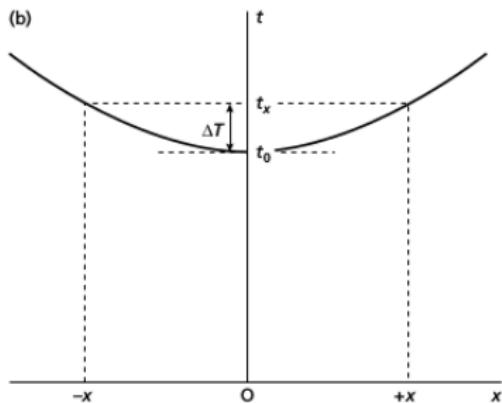
Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

- A equação do slide anterior pode ser melhor trabalhada para a estimativa da velocidade V ,
- Para isso considera-se o aumento do raio refletido com a distância de afastamento,
- Esta metodologia é conhecida como sobretempo normal (normal moveout - NMO),

O **sobretempo** é definido como a diferença entre os tempos de percurso t_1 e t_2 das chegadas dos raios refletidos, registrados em duas distâncias de afastamento x_1 e x_2 .

$$t_2 - t_1 \approx \frac{x_2^2 - x_1^2}{2V^2 t_0}$$

Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios



O **sobretempo normal** (NMO - Normal Moveout) para uma distância de afastamento x é a diferença no tempo de percurso ΔT entre as chegadas refletidas para x e para o afastamento zero.

$$\Delta T = t_x - t_0 \approx \frac{x^2}{2V^2 t_0}$$

Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

Considerações:

- A última formulação é a forma mais conveniente da equação tempo-distância para raios refletidos,
- Também é amplamente utilizada, explícita ou implicitamente, no processamento e na interpretação de dados de reflexão,
- O conceito de sobretempo é fundamental para a identificação, correlação e intensificação dos eventos de reflexão,
- Utilizado no cálculo das velocidades com os dados de reflexão, tal como, é feita na etapa de Análise de Velocidades.
- Estas análises são feitas em computador devido a enorme quantidade de camadas e trajetórias dos raios refletidos.

Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

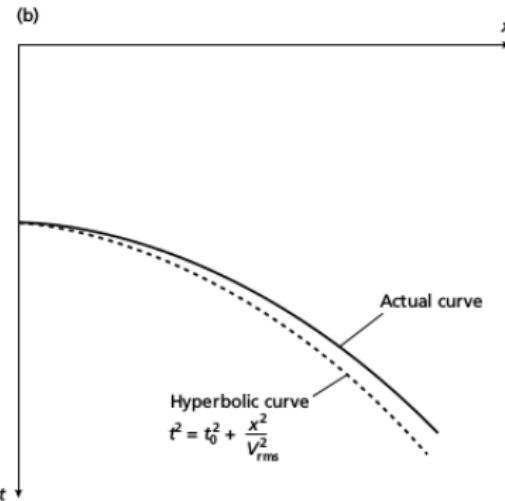
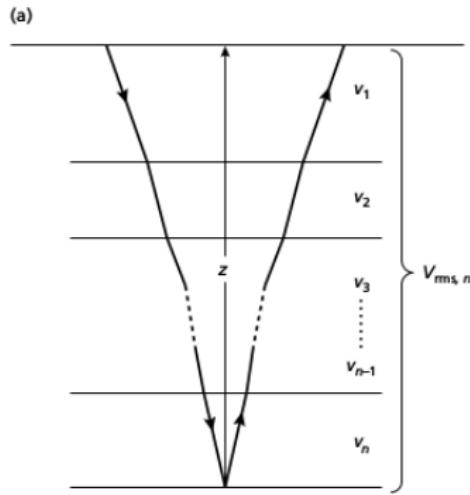
Velocidade Quadrática Média

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

- 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

- Para pequenos afastamentos o tempo de percurso total do raio refletido e o sobretempo normal do refletor n são redefinidos.

Tempo de Percurso

$$t_n = \frac{(x^2 + 4z^2)^{1/2}}{V_{rms,n}}.$$

Sobretempo Normal

$$\Delta T_n \approx \frac{x^2}{2V_{rms,n}^2 t_0}.$$

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

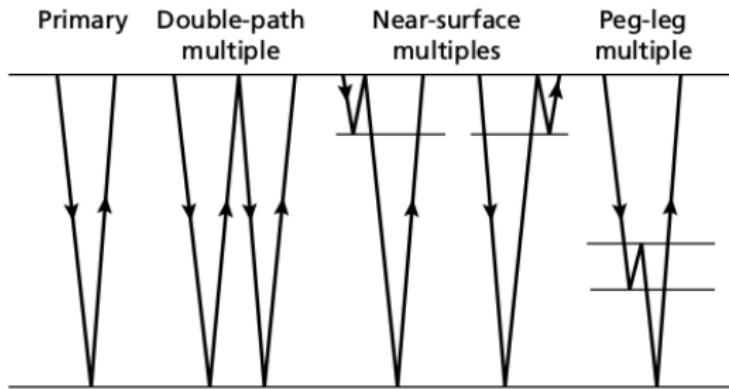
- **Velocidade de Empilhamento:** é uma relação entre distância e tempo determinada pela análise *normal moveout* (NMO) na família CMP do dado sísmico. A velocidade de empilhamento é utilizada para corrigir os tempos de chegada de eventos nos traços devido as variações nos afastamentos (*offset*) nos 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

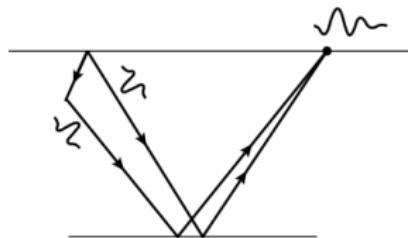
Fundamentos de Sísmica: Traçado de Raios



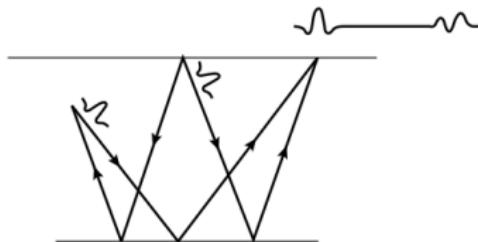
- **Reflexões primárias:** raios que retornam à superfície após refletir em uma interface,
- **Reverberações ou reflexões múltiplas:** trajetórias em um pacote multiestratificado pelas quais os raios podem retornar à superfície após reflexão em mais de uma camada.

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

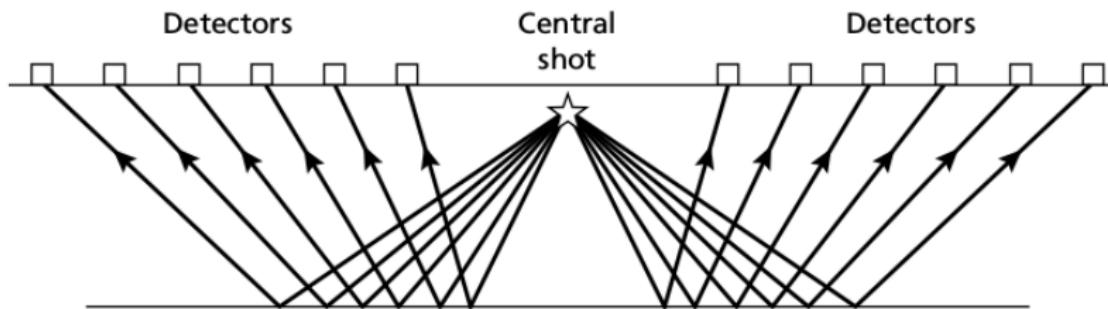
Considerações:

- 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

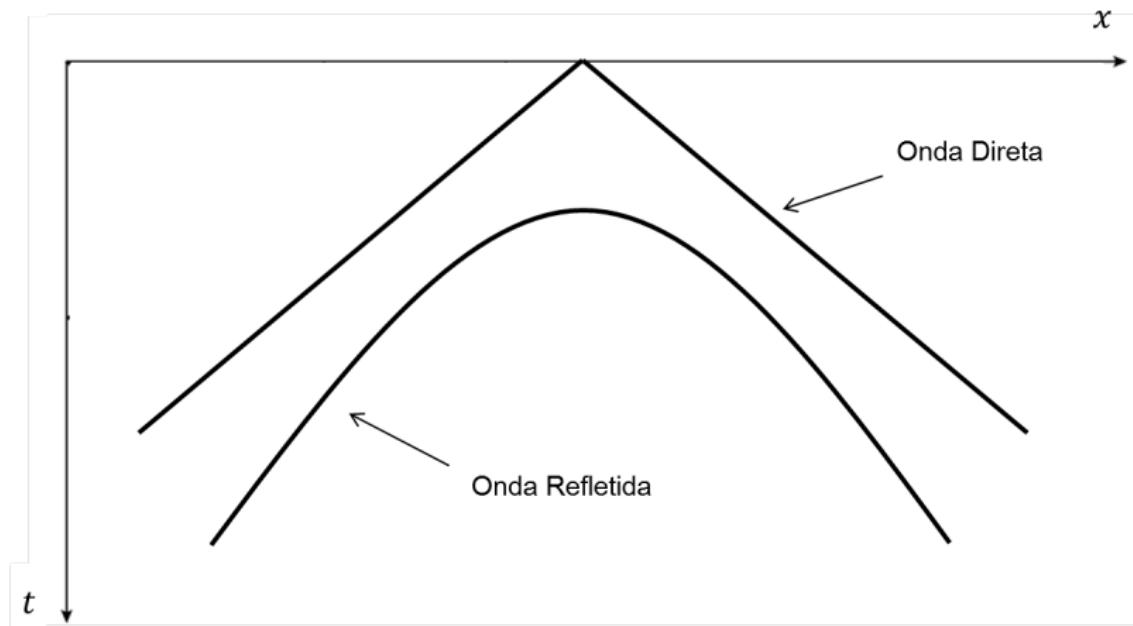
Principais Arranjos Fonte-receptores

Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

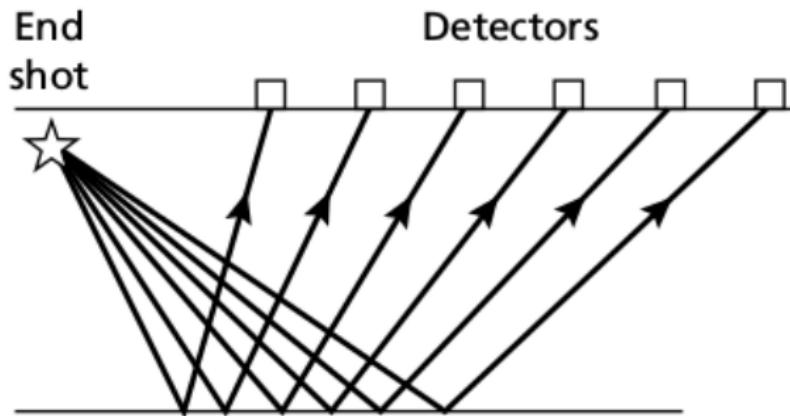


- A disposição dos dados apresenta grupos de traços sísmicos registrados a partir de um tiro comum,
- Este grupo de informação é conhecido como **família de tiro comum**,
- Arranjo conhecido como **Split-spread**.

Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

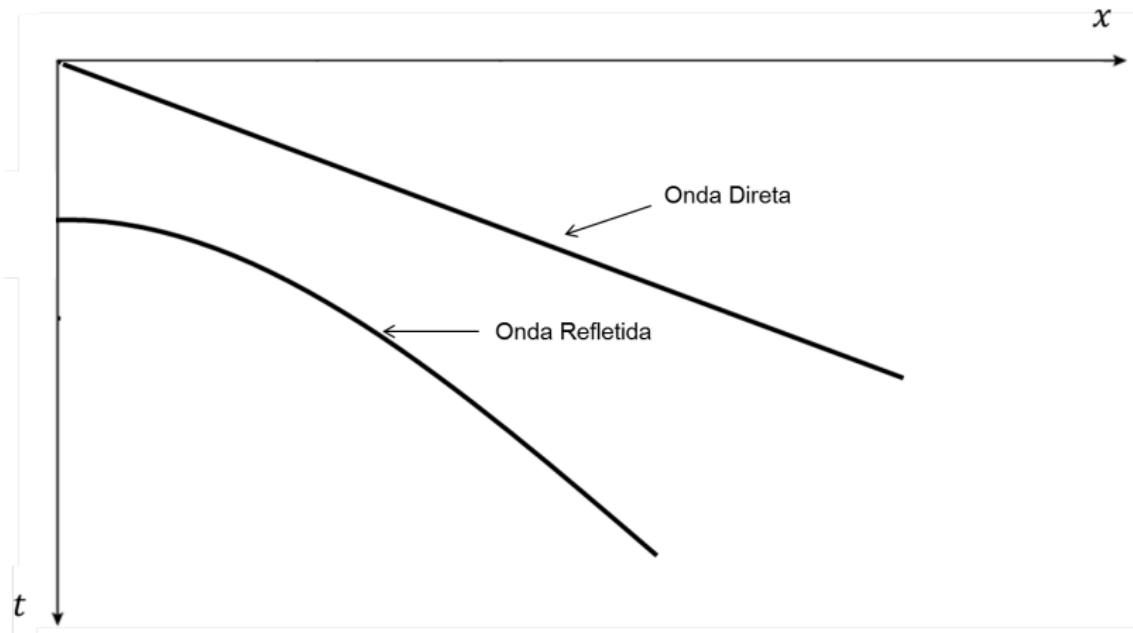


Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios



- 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



O Domínio CMP

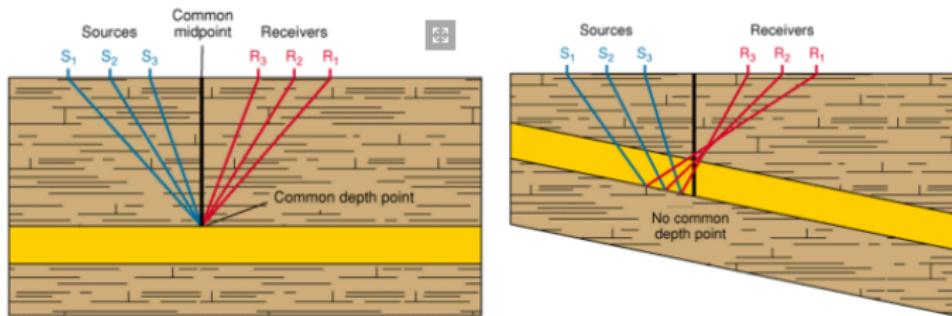
- As geometrias dos raios registrados em superfície estão no domínio do tiro comum,
- Estes registros estão associados às posições das fontes e dos receptores,
- Outro domínio **extremamente importante**, conhecido como **Ponto Médio Comum** (CMP - *Common Midpoint*), diz respeito à posição do ponto de reflexão em subsuperfície,
- O CMP não é conhecido antes do processamento,
- Ele é calculado, com boa aproximação, assumindo-se que ponto de reflexão encontra-se verticalmente abaixo da posição na superfície a meio caminho entre o tiro e o receptor de um determinado traço.

Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

Ponto médio comum (*Common midpoint - CMP*)

Definição: em uma aquisição sísmica multicanal, é o ponto em superfície entre (metade) a fonte e receptor que é compartilhado por vários pares fonte-receptor. Tal redundância entre os pares fonte-receptor aumenta a qualidade do dado sísmico quando eles são empilhados (*stacked*). O ponto médio comum está verticalmente acima do ponto comum em profundidade (*common depth point - CDP*). O CMP não é o mesmo que o CDP, mas os termos são frequentemente usados incorretamente como sinônimos.

Glossário Schlumberger



Importância do Dado no Domínio CMP

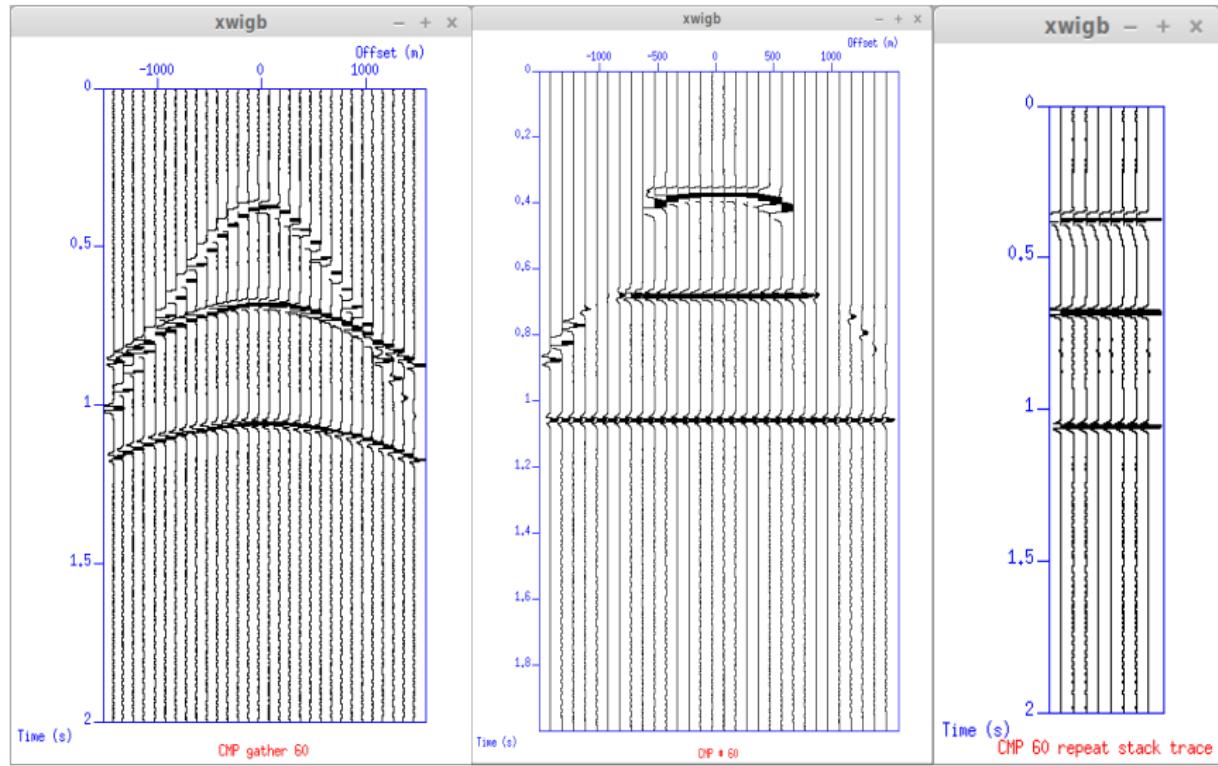
- O domínio CMP é centro do processamento sísmico,
- A razão dessa importância está atrelada ao fato dos traços no domínio CMP serem a representação da reflexão de um determinado ponto em profundidade para diferentes afastamentos,
- Com isso, a variação do tempo de percurso com o afastamento, o sobretempo, dependerá somente da velocidade das camadas,
- Com esta dependência é possível estimar a velocidade em subsuperfície.

Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios

Importância do Dado no Domínio CMP

- A energia sísmica refletida geralmente é muito fraca,
- Uma vez conhecida as velocidades, os traços no domínio CMP podem ser corrigidos usando-se o sobretempo normal (NMO),
- Os traços nesse domínio tem os mesmos pulsos refletidos para os mesmos tempos, mas com diferentes ruídos aleatórios e coerentes,
- A combinação dos traços fornece uma média dos ruídos e um aumento do sinal (razão sinal-ruído - SNR),
- Este processo é conhecido como empilhamento (*Stacking*),

Fundamentos de Sísmica: Trajetória dos Raios



FUNDAMENTOS DE SÍSMICA

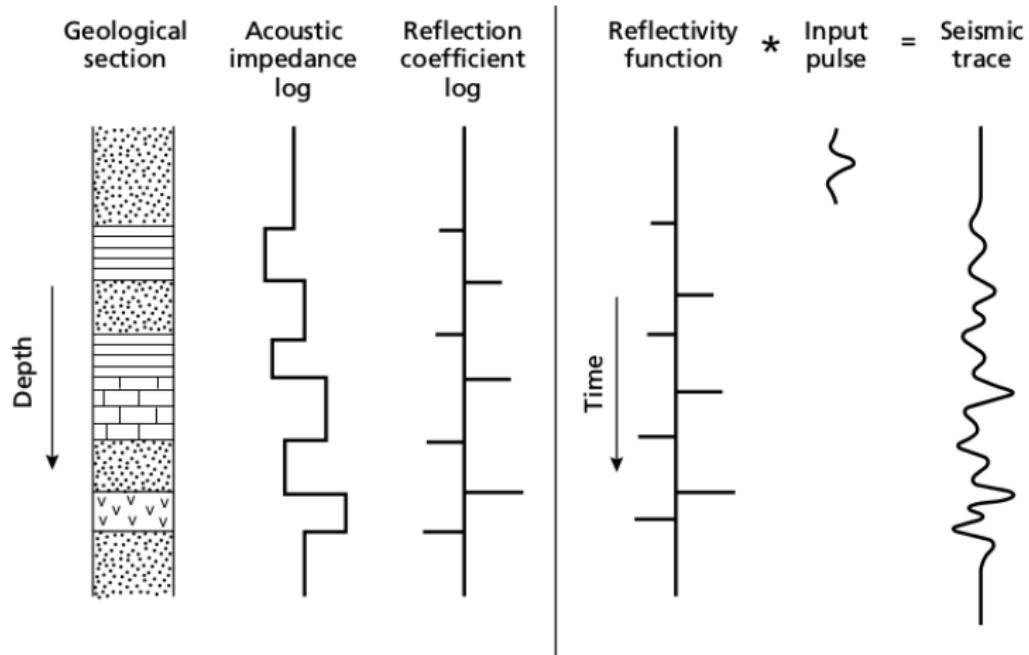
O Sismograma

Fundamentos de Sísmica: Sismograma

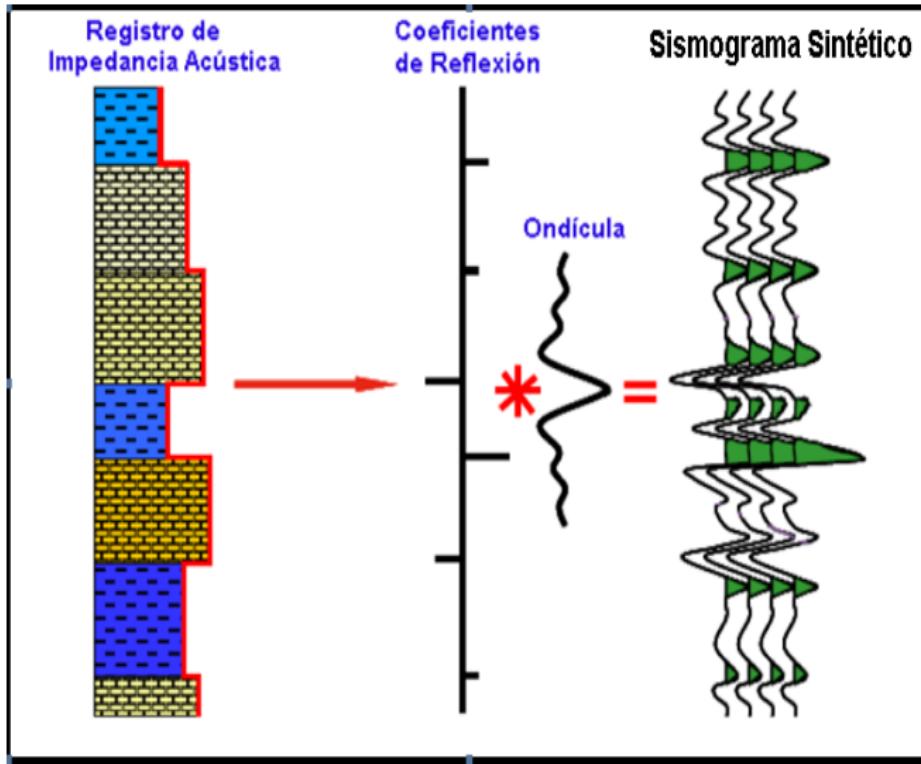
- O traço sísmico é a representação visual do padrão local do movimento vertical do solo (em terra) ou da variação da pressão (no mar),
- Esse traço sísmico representa a resposta combinada do meio estratificado e do sistema de registro do pulso,
- Os pulsos chegam em tempos determinados pelas profundidades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



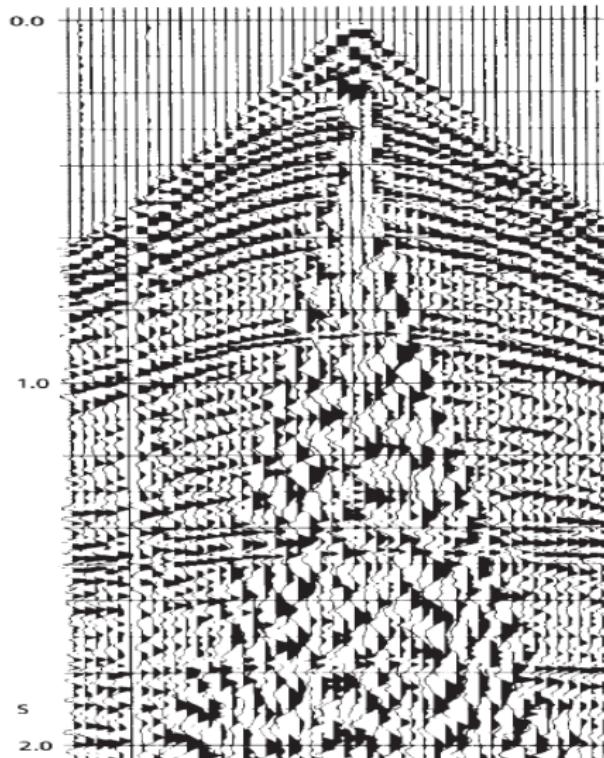
Fundamentos de Sísmica: Sismograma

- 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

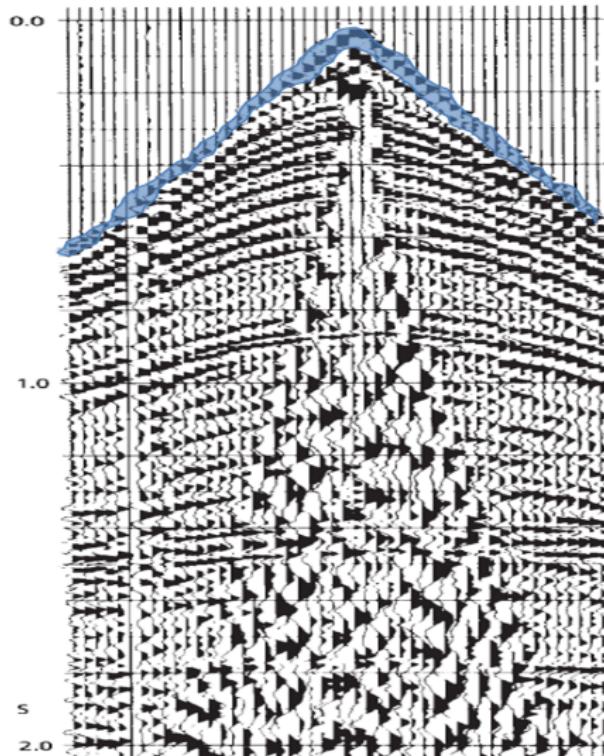
TRAÇOS WIGGLE



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

Fundamentos de Sísmica: Sismograma

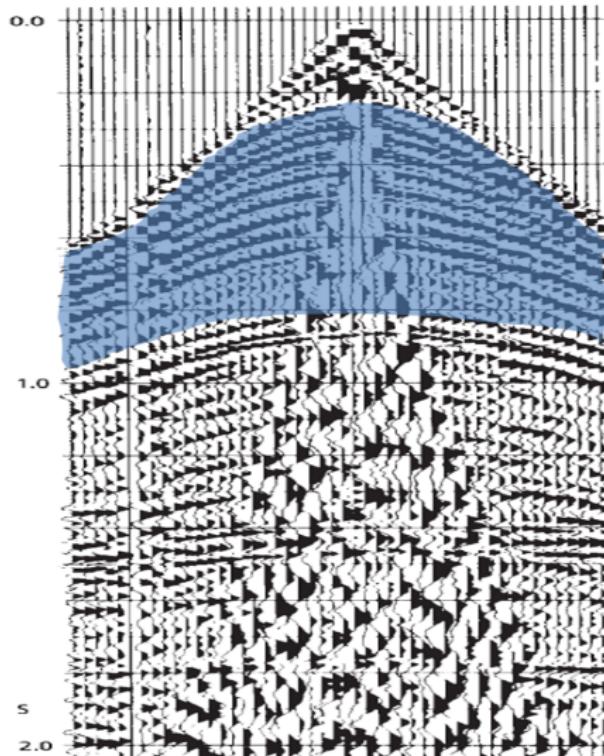
TRAÇOS WIGGLE



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

Fundamentos de Sísmica: Sismograma

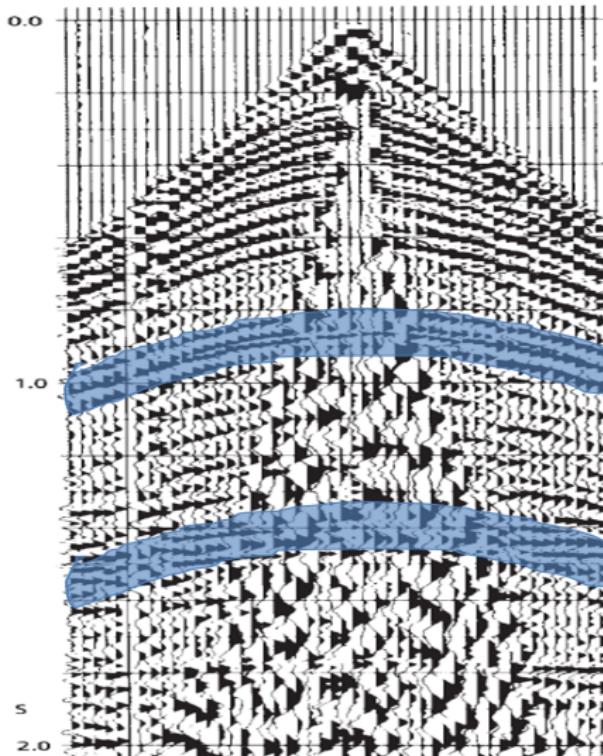
TRAÇOS WIGGLE



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

Fundamentos de Sísmica: Sismograma

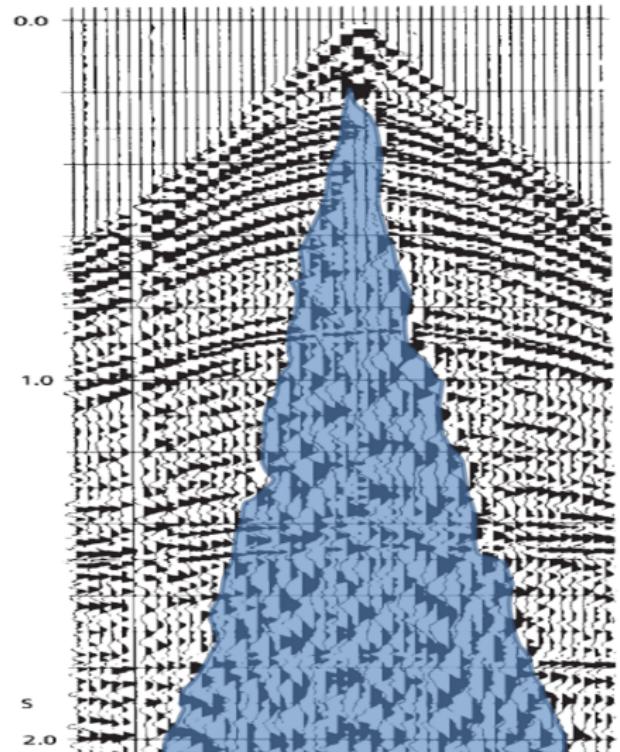
TRAÇOS WIGGLE



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

Fundamentos de Sísmica: Sismograma

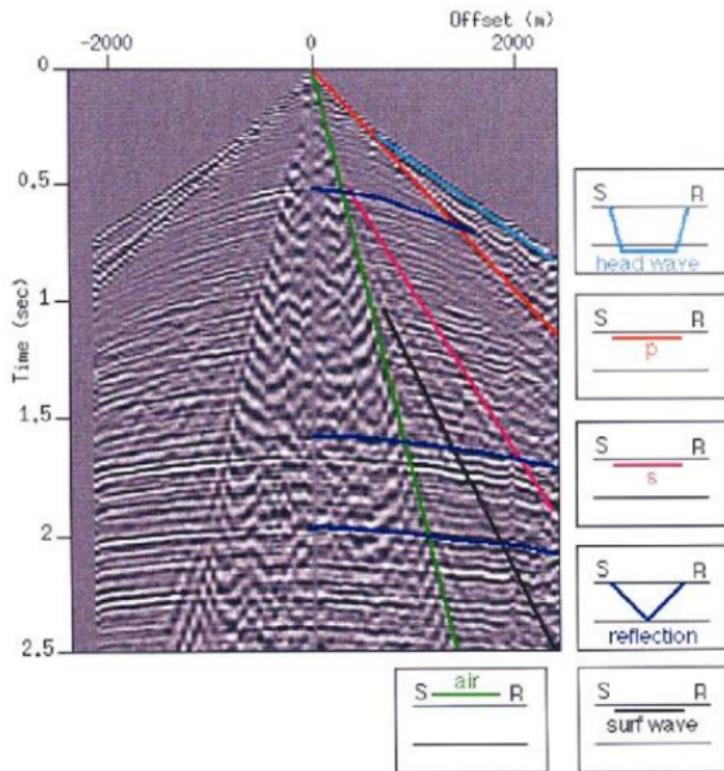
TRAÇOS WIGGLE



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

Fundamentos de Sísmica: Sismograma

TRAÇOS INTERPOLADOS



FUNDAMENTOS DE SÍSMICA

Aspectos Gerais do Processamento Sísmico

Aspectos Gerais do Processamento Sísmico: QC

- Controle de qualidade (QC) inicial:
 - ① Análise do relatório do observador,
 - ② Verificação das principais chaves do cabeçalho do dado sísmico: cdp, offset, sx, sy, gx, gy, entre outros,
 - ③ Comparação das informações do relatório do observador e do cabeçalho do dado sísmico,
 - ④ Cálculo e/ou configuração das chaves importantes que não estiverem no cabeçalho (ex.: cdp, offset, inline, crossline...),
 - ⑤ Visualização das famílias de tiro comum a fim de detectar anomalias nos dados,
 - ⑥ Empilhamento do dado bruto (*near-offset*) - esta etapa proporcionará uma noção preliminar da geologia em subsuperfície.

Aspectos Gerais do Processamento Sísmico: CMP

- Conversão para o domínio CMP:
 - ① Após a verificação e configuração o cabeçalho do dado (cdp, offset, ...), converter do domínio do tiro para o domínio CMP,
 - ② Verificar as principais chaves do dado no domínio CMP para conferir a correta conversão,
 - ③ Calcular o valor da cobertura (*fold*) para que sejam escolhidos os CMP's com cobertura total.

Fundamentos de Sísmica: Processamento

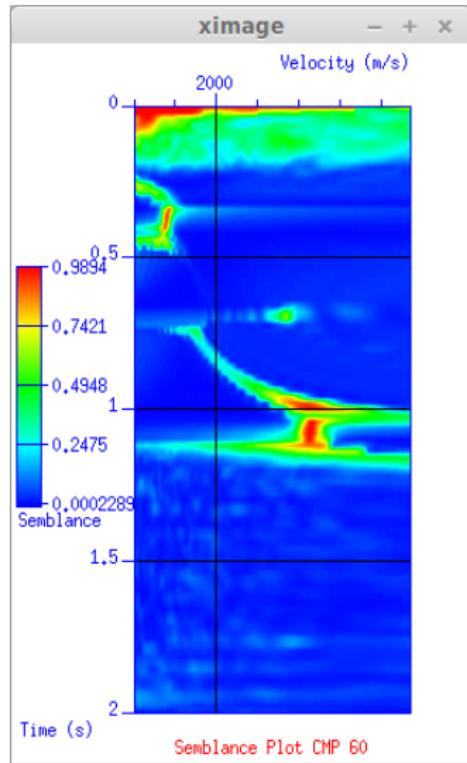
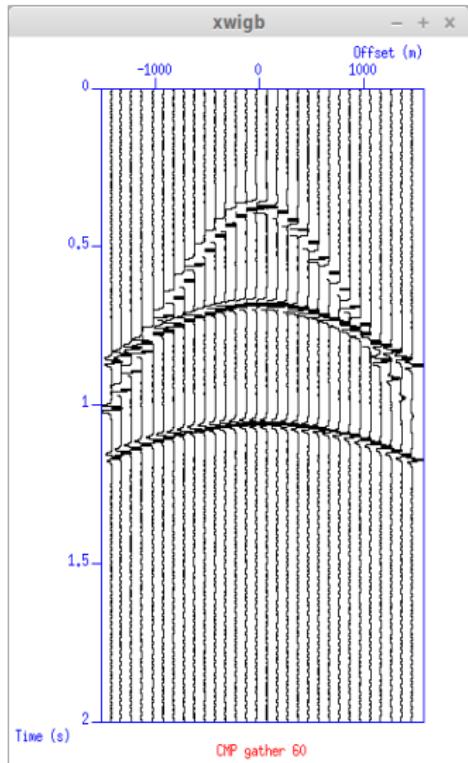
Aspectos Gerais do Processamento Sísmico: Tratamento dos Dados

- 1 Esta etapa do fluxo de processamento sísmico envolve uma série de etapas para condicionar o dado e prepará-los para as etapas posteriores,
- 2 Tem-se como objetivo principal identificar problemas capazes de comprometer a qualidade dos resultados, tais como:
 - Traços ruidosos
 - Anomalias de amplitude
 - Ruídos coerentes, entre outros
- 3 Algumas técnicas que podem ser aplicadas dependendo do dado sísmico:
 - Incorporação da geometria de aquisição
 - Edição de traços
 - Correção estática
 - Correção da divergência esférica
 - Deconvolução
 - Filtragem, entre outras...

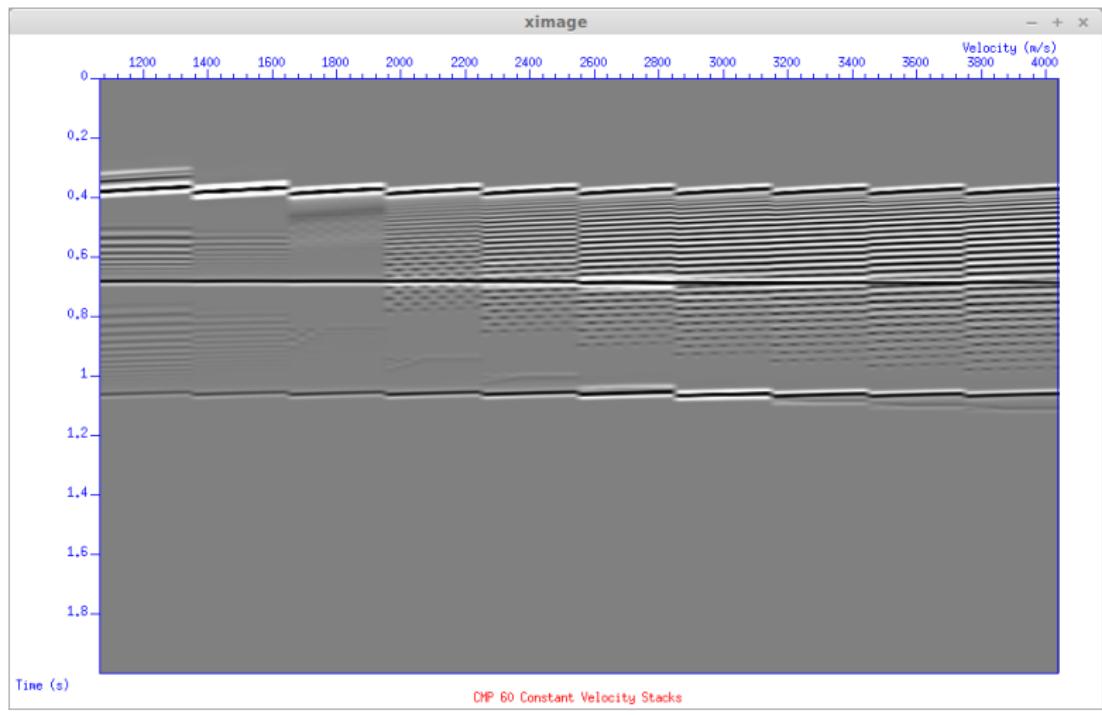
Aspectos Gerais do Processamento Sísmico: NMO

- Correção de sobretempo normal (NMO):
 - ① Escolha das velocidades que corrigem o sobretempo normal (*Picking*):
 - ① Análise $X^2 - T^2$,
 - ② Análise do espectro de velocidades (*Semblance*),
 - ③ CVS - *Constant Velocity Stacks*.

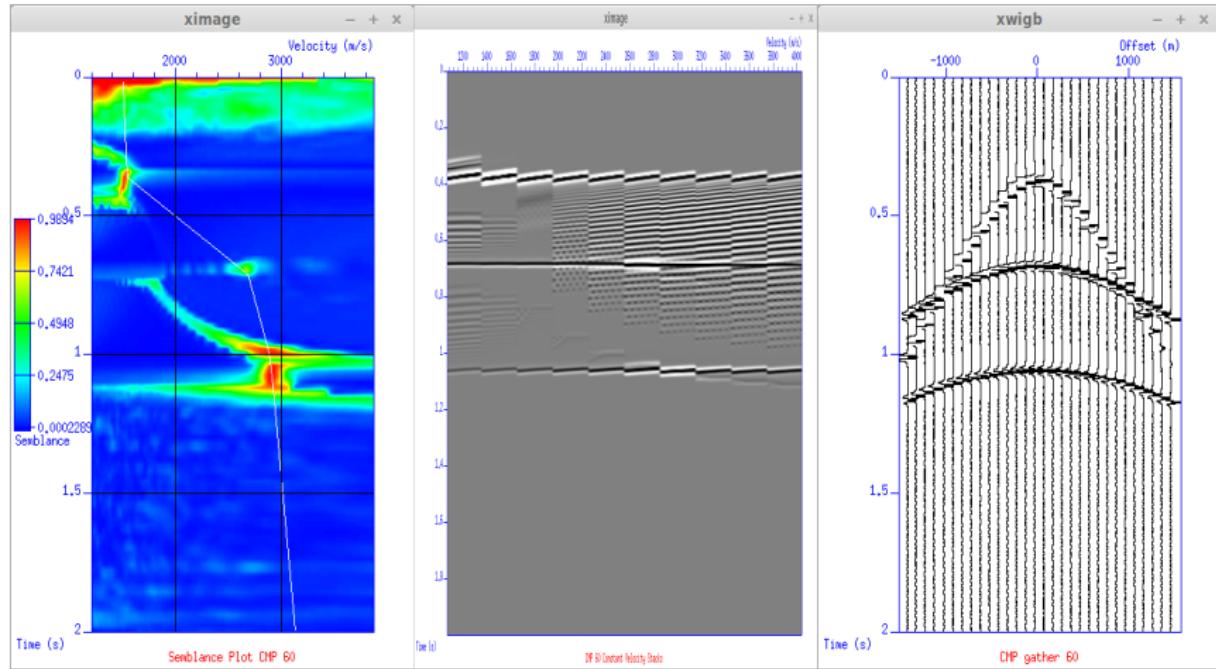
Fundamentos de Sísmica: Processamento



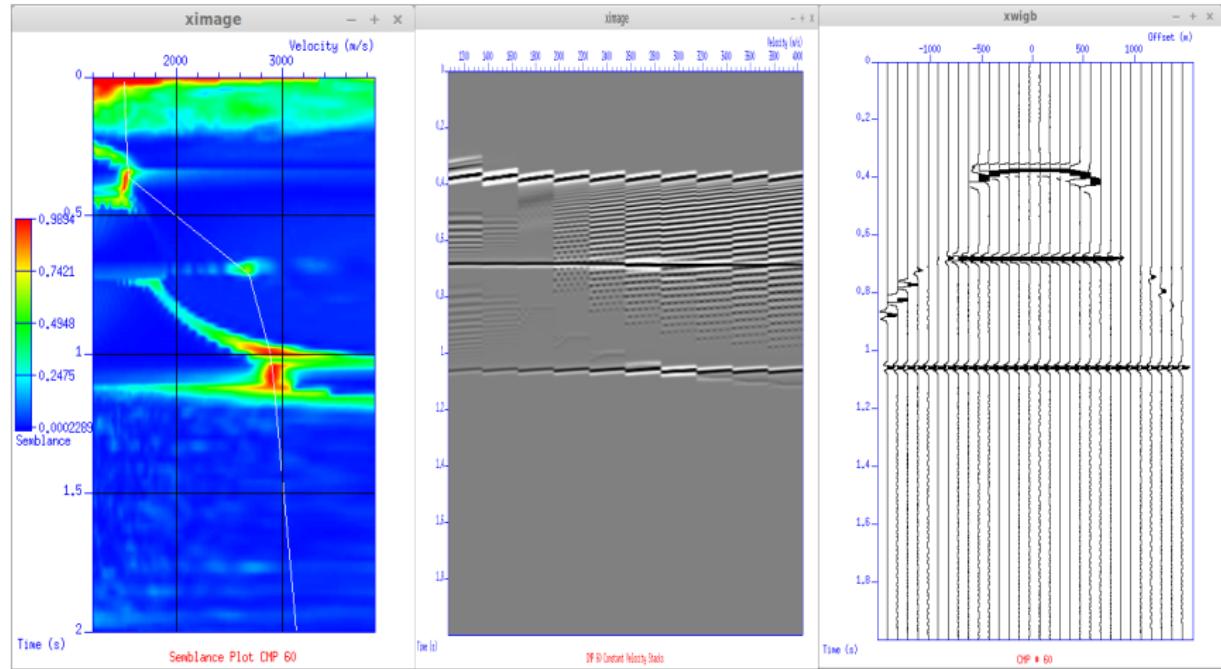
Fundamentos de Sísmica: Processamento



Fundamentos de Sísmica: Processamento



Fundamentos de Sísmica: Processamento



Fundamentos de Sísmica: Processamento

Aspectos Gerais do Processamento Sísmico: Técnicas Construção Modelo de Velocidades

- A migração sísmica necessita de um **modelo de velocidades**: extração do campo de ondas ou construção das curvas de difração.

Métodos Convencionais de Análise de Velocidades

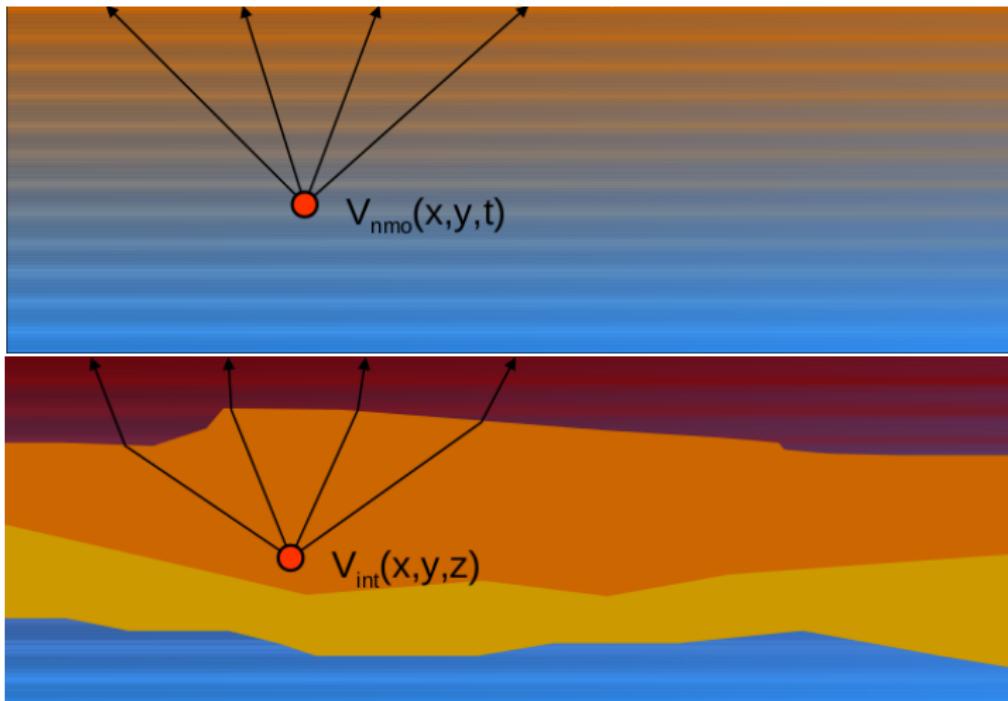
- ① Baseado na correção de sobretempo normal (NMO)
- ② Métodos tomográficos
- ③ Baseado na migração

Método Baseado na Equação Completa da Onda

- ④ Inversão da Forma Completa de Onda (*Full Waveform Inversion - FWI*)

Fundamentos de Sísmica: Processamento

Aspectos Gerais do Processamento Sísmico: Técnicas Construção Modelo de Velocidades

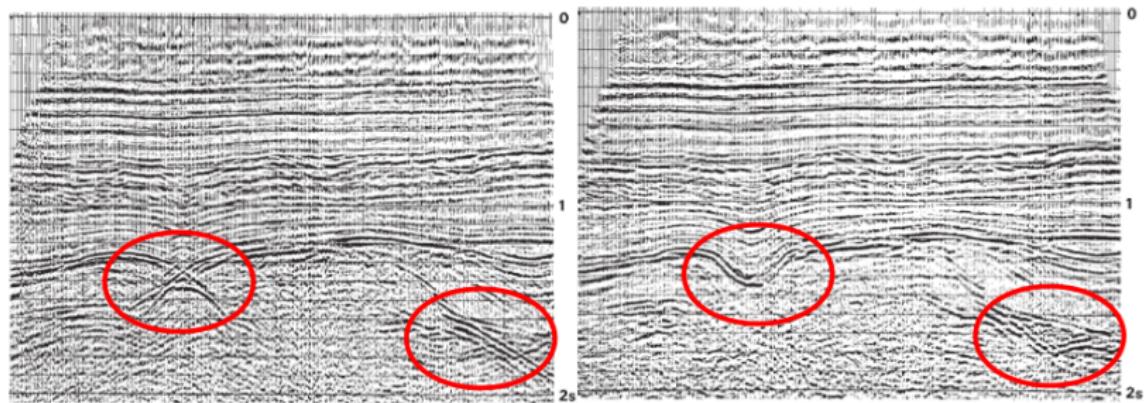


Aspectos Gerais do Processamento Sísmico: Técnicas de Migração Sísmica

- Dado sísmico não migrado contêm informações dos refletores
- Tais informações ficam geometricamente distorcidas na imagem empilhada
- **Definição:** **Migração Sísmica** refere-se ao processo que constrói, move ou "migra" as imagens do refletor tão próximo quanto possível da sua real localização geométrica.

Aspectos Gerais do Processamento Sísmico: Técnicas de Migração Sísmica

Reposicionamento dos Refletores



Imagens: Kearey et al., 1991

Aspectos Gerais do Processamento Sísmico: Técnicas de Migração Sísmica

Tipos de migração

- 2-D x 3-D
- Pós-empilhamento x pré-empilhamento
- Tempo x profundidade

Migração mais utilizada

Migração 2-D/3-D pós-empilhamento no domínio do tempo

- Menos sensível a erros de velocidade
- Gera resultados razoáveis para a interpretação

Fundamentos de Sísmica: Processamento

Aspectos Gerais do Processamento Sísmico: Técnicas de Migração Sísmica

Baseada na solução integral da equação da onda escalar

- **Migração Kirchhoff:** utiliza traçamento de raios. Método robusto para diversos modelos de velocidades

Baseada na solução por diferenças finitas

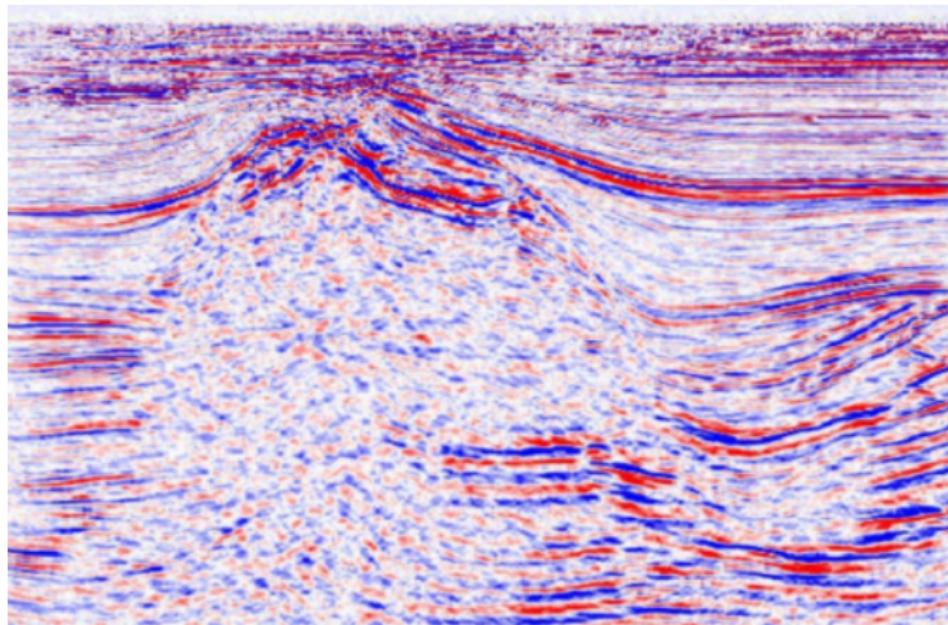
- **Migração Reversa no Tempo:** migração que utiliza a equação completa da onda. Método com alto grau de acurácia, porém custoso computacionalmente

Baseada na frequência-número de onda (f-k)

- **Stolt:** migração por transformada de Fourier. Baseia-se em modelos com velocidade constante
- **Método Phase-shift:** Migração por deslocamento de fase. Indicado para modelos com variação vertical de velocidades

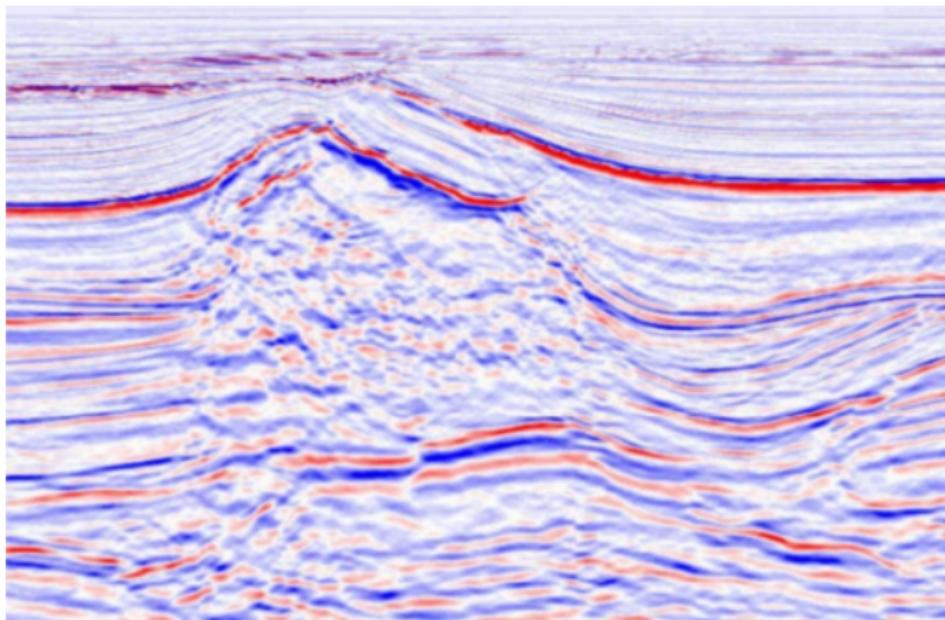
Fundamentos de Sísmica: Processamento

Aspectos Gerais do Processamento Sísmico: Técnicas de Migração Sísmica



Fundamentos de Sísmica: Processamento

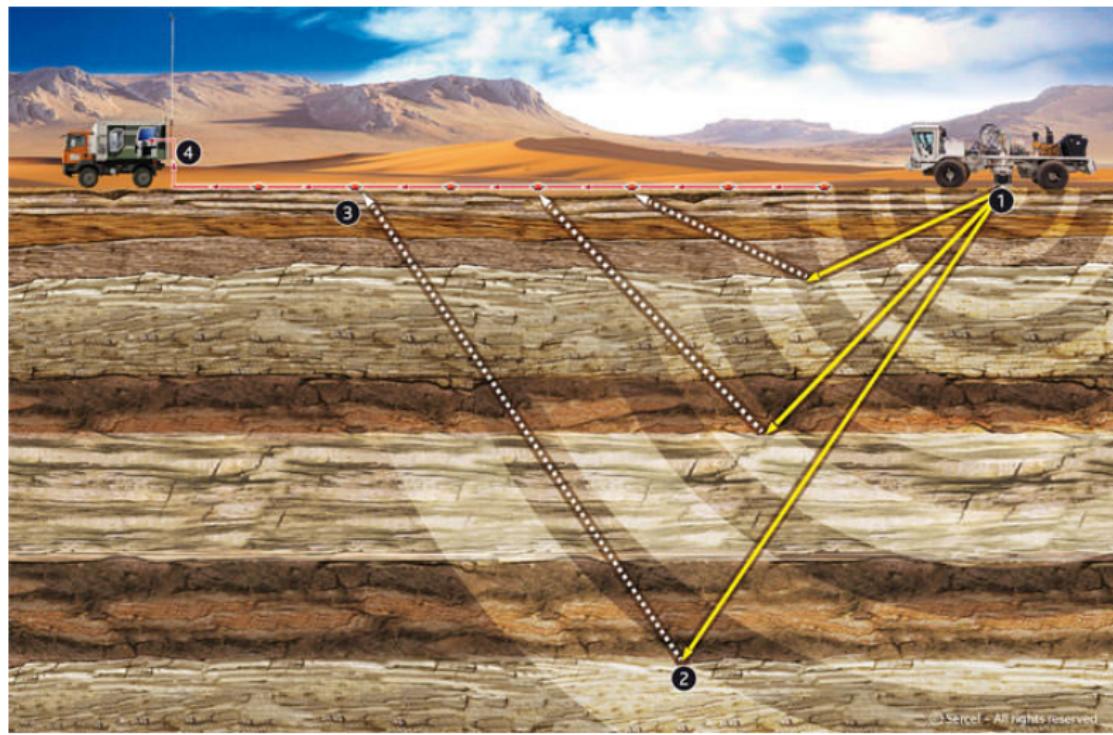
Aspectos Gerais do Processamento Sísmico: Técnicas de Migração Sísmica



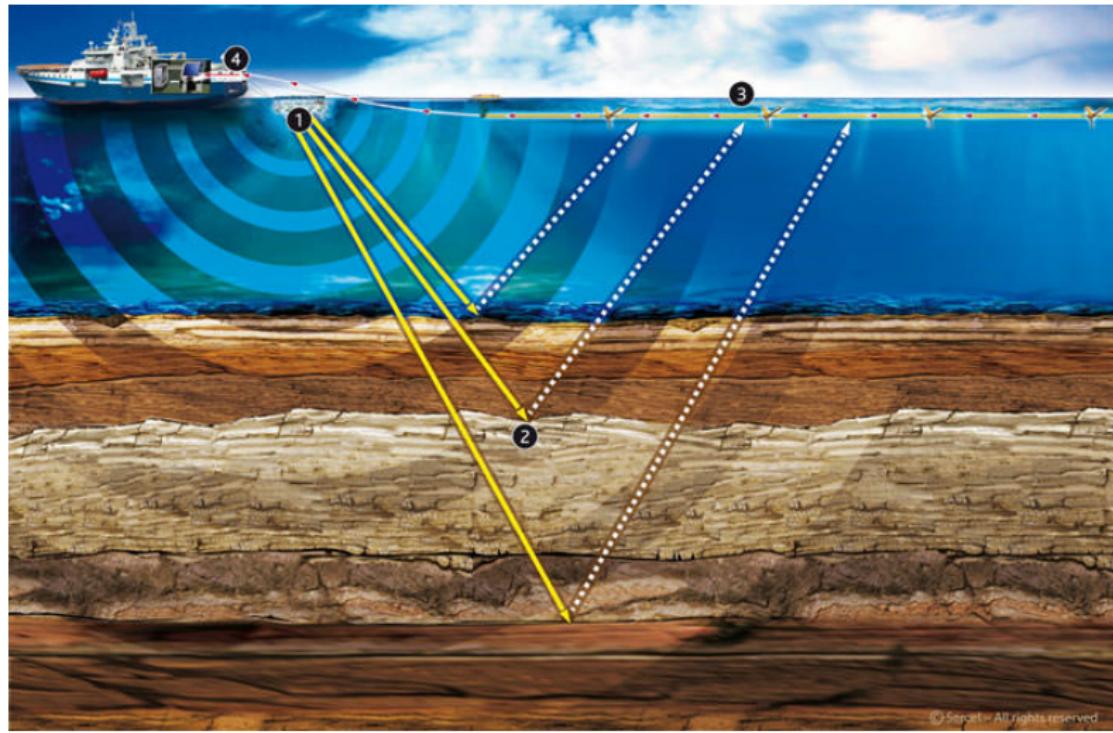
FUNDAMENTOS DE SÍSMICA

Aquisição Sísmica: *Onshore* e *Offshore*

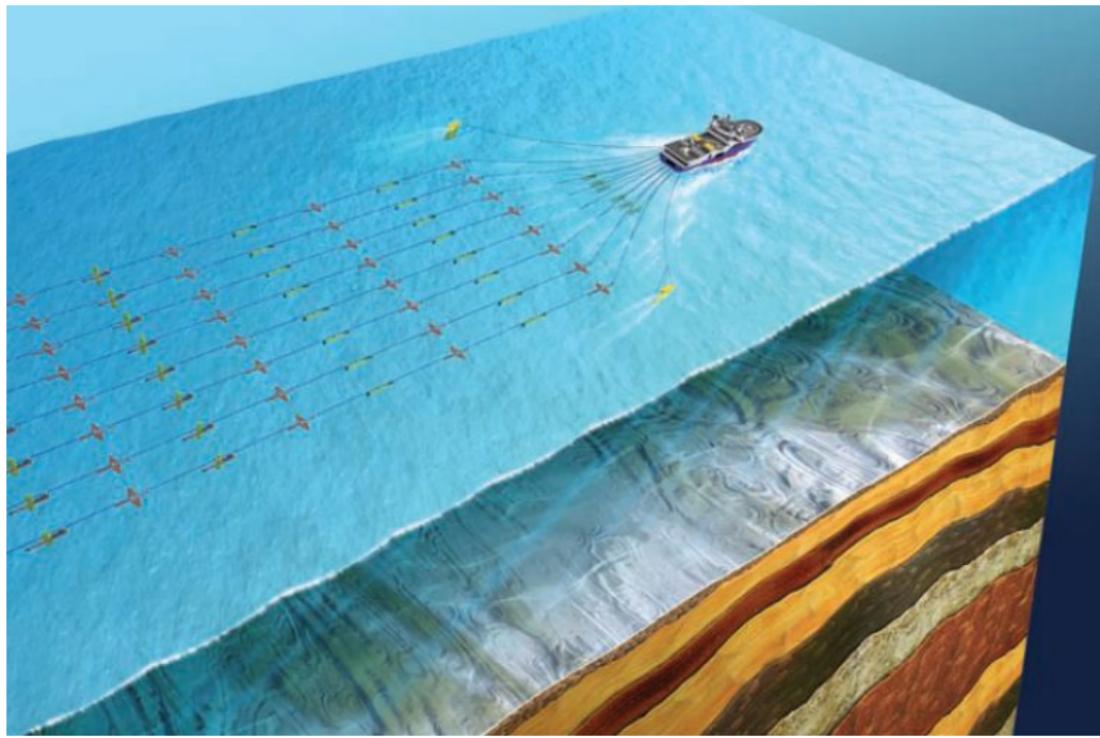
Aquisição Sísmica: *Onshore*



Aquisição Sísmica: *Offshore*



Aquisição Sísmica: *Offshore*



Thank you for your time.

Thank You
for your time!

[Overleaf Template.](#)