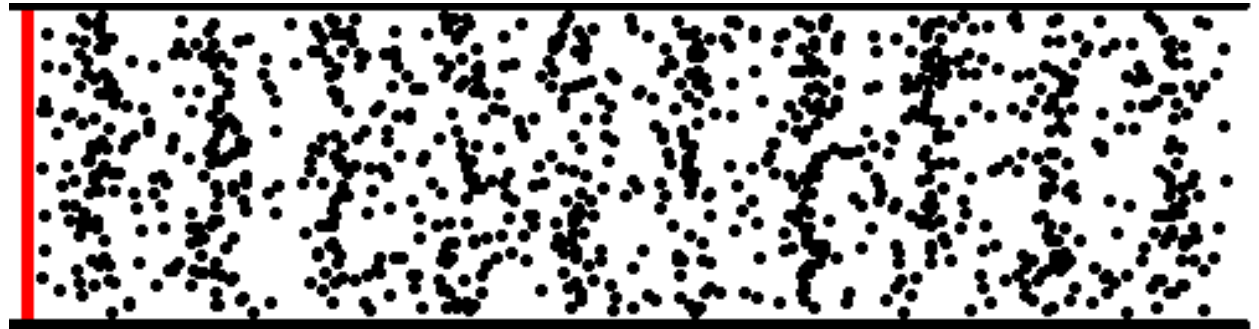


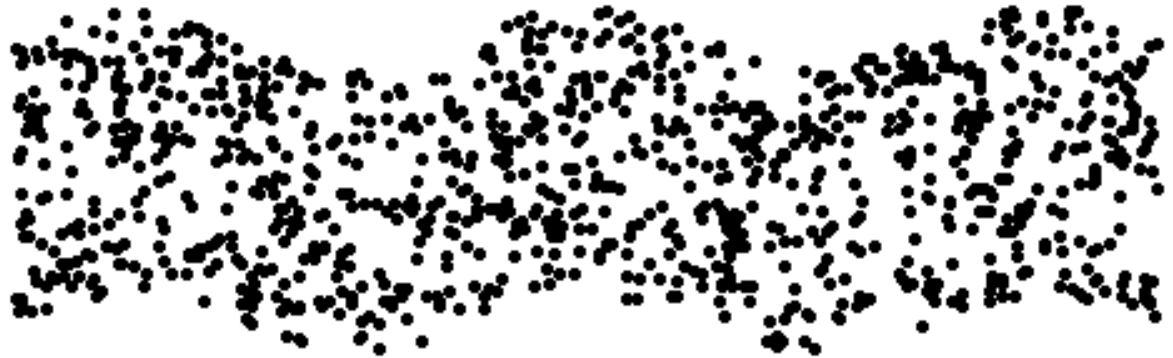
Introdução ao Método Sísmico

Ondas de Corpo ou Volume

- Ondas P



- Ondas S



$$V_P = \sqrt{\frac{K + 4G / 3}{\rho}}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

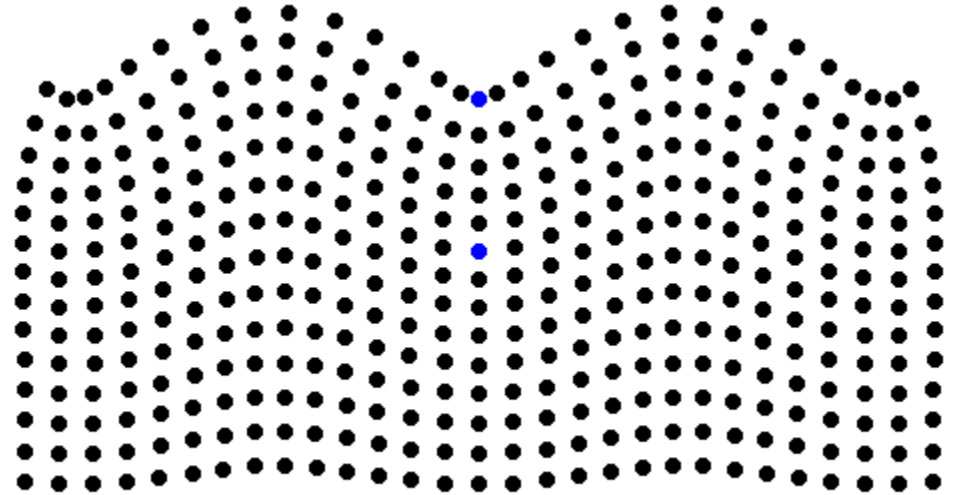
$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{1 - \nu}{1 / 2 - \nu}}$$

- Sendo o valor máximo do coeficiente de Poisson igual a 0,5.
- Rochas duras $\approx 0,05$; Rochas maleáveis $\approx 0,45$; Sedimentos não consolidados $\approx 0,25$.

Material	Velocidade P (m/s)	Velocidade S (m/s)
Ar	332	
Água	1400-1500	
Petróleo	1300-1400	
Aço	6100	3500
Concreto	3600	2000
Granito	5500-5900	2800-3000
Basalto	6400	3200
Arenito	1400-4300	700-2800
Calcário	5900-6100	2800-3000
Areia (Não saturado)	200-1000	80-400
Areia (Saturada)	800-2200	320-880
Argila	1000-2500	400-1000
Glacial Till (Saturado)	1500-2500	600-1000

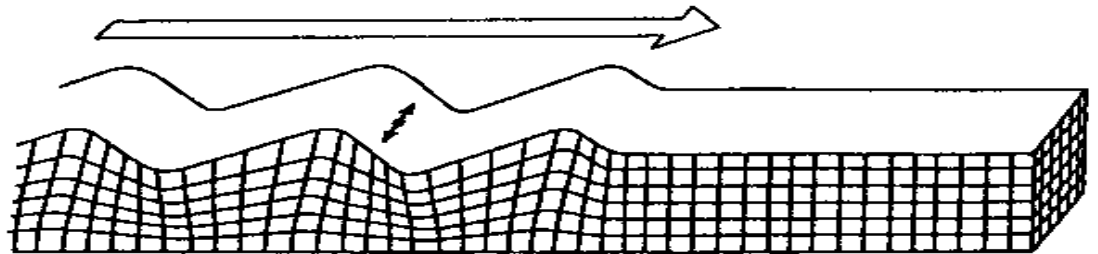
Ondas de Superfície

- Rayleigh



©1999, Daniel A. Russell

- Love



Modelo (geral) de Rocha em Petrofísica

- Uma rocha sedimentar, terrígena ou carbonática, para efeito petrofísico descritivo, está constituída mineralogicamente por três elementos: Arcabouço, Matriz e Cimento.
- Matematicamente, tem-se

<i>MATRIZ</i> (Todos os Componentes Sólidos da Rocha) $(1 - \phi)$	<i>POROS</i> (Vazios) (ϕ)
---	---

- MATRIZ termo que engloba os grãos, o cimento e a matriz propriamente dita. Isto é, é todo o material sólido dentro de uma rocha.
- PORO termo que representa todo espaço vazio de uma rocha ou espaço que possa ser preenchido por fluidos (água ou misturas de água e hidrocarbonetos).

Porosidade

- É definida como sendo a relação entre o volume de espaços vazios (V_v) de uma rocha e o volume total (V_t) da mesma, expressa em percentual ou fração $\rightarrow \emptyset = V_v / V_t$
- Dois tipos:
 - Porosidade primária ou deposicional, é aquela adquirida pela rocha durante a sua deposição ou bioconstrução. Exemplo de porosidade primária: porosidade intergranular dos arenitos ou a porosidade interparticular dos carbonatos.
 - Porosidade secundária ou pós-deposicional, resulta de processos geológicos subseqüentes à conversão dos sedimentos em rochas. Exemplos de porosidade secundária - o desenvolvimento de fraturas em arenitos, folhelhos, carbonatos e rochas cristalinas e cavidades devidas à dissolução nos carbonatos e, em menor proporção (em tamanho e quantidade), nos arenitos.

Lei das Misturas

- É uma Lei Física que diz que : “em um sistema multicomposto cada componente contribui volumetricamente para as propriedades da mistura na razão da fração volumétrica de um dos componentes vezes a propriedade deste, elevada a um fator (m) referente a sua distribuição geométrica”. Esta lei tem como base física a LINEARIEDADE dos efeitos.

- Para 2 componentes, um sólido e um líquido de propriedades U^S e U^L respectivamente, a mistura U^M será dada por :

$$U_M = \left[\phi \cdot U_L^m + (1 - \phi) \cdot U_S^m \right]^{1/m}$$

- Quando $m = 1$ significa dizer que a propriedade está sendo medida em série;
- Quando $m = -1$ significa dizer que a propriedade está sendo medida em paralelo;
- Teoricamente : $-\infty < m < +\infty$

Três exemplos de misturas com um mesmo resultado

- 70% de Sílica de $2,65 \text{ g/cm}^3$ + 30% de Água de $1,00 \text{ g/cm}^3$

Densidade da mistura = $0,7 \times 2,65 + 0,3 \times 1,00 = 2,155 \text{ g/cm}^3$

- 67,55% de Calcita de $2,71 \text{ g/cm}^3$ + 32,45% de Água de $1,00 \text{ g/cm}^3$

Densidade da mistura = $0,6755 \times 2,71 + 0,3245 \times 1,00 = 2,155 \text{ g/cm}^3$

- 33% de Água de $1,00 \text{ g/cm}^3$ + 26% Sílica de $2,65 \text{ g/cm}^3$ + 25,5% de Calcita de $2,71 \text{ g/cm}^3$ + 15,5% de Dolomita de $2,87 \text{ g/cm}^3$

Densidade da mistura = $0,33 \times 1,00 + 0,26 \times 2,65 + 0,255 \times 2,71 + 0,155 \times 2,87 = 2,155 \text{ g/cm}^3$

Teoria da Unicidade

- Raciocinemos agora de modo inverso ao ocorrido no item acima. Temos em mãos uma amostra de rocha (em um recipiente lacrado não permitindo vermos seu interior), cuja densidade medida por um equipamento qualquer seja igual a 2,155 g/cm³.
- Qual será a composição mineralógica desta amostra? Igual a do exemplo “a” acima, a do exemplo “b” ou a do “c”? Quer dizer: um resultado único pode derivar várias situações litológicas (ou modelos), mas somente uma delas representará a realidade.
- É o que diz a Teoria da Unicidade diz: a equação resposta (transformada) de um modelo petrofísico qualquer fornece somente uma única resposta.

Equação para estimativa da porosidade da rocha

$$\Delta t = \Delta t_f \cdot \phi + \Delta t_m \cdot (1 - \phi)$$

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{V_f} \cdot \phi + \frac{1}{V_m} \cdot (1 - \phi)$$

- Δt -> vagarosidade
- V -> velocidade
- ϕ -> porosidade
- f -> fluido; m -> matriz

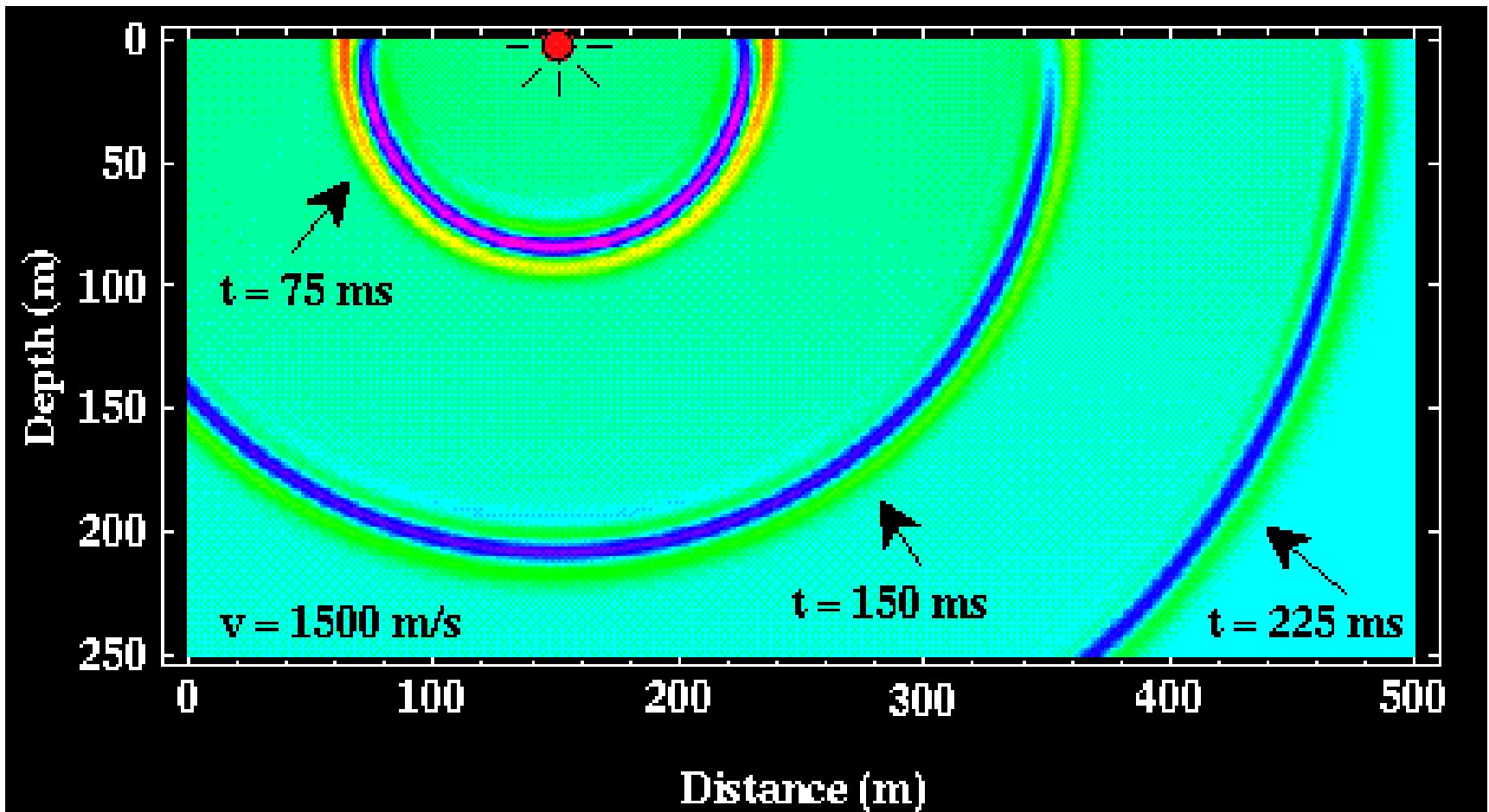
Pergunta: qual o tempo de trânsito (vagarosidade) de um arenito com 20% de porosidade saturado com água salgada? Qual a velocidade de propagação da onda nessa rocha?

Dados:

- Tempo de trânsito da matriz do arenito = 55,5 $\mu\text{s}/\text{pé}$.
- Tempo de trânsito da água = 189 $\mu\text{s}/\text{pé}$.
- 1 pé = 0,3048 m

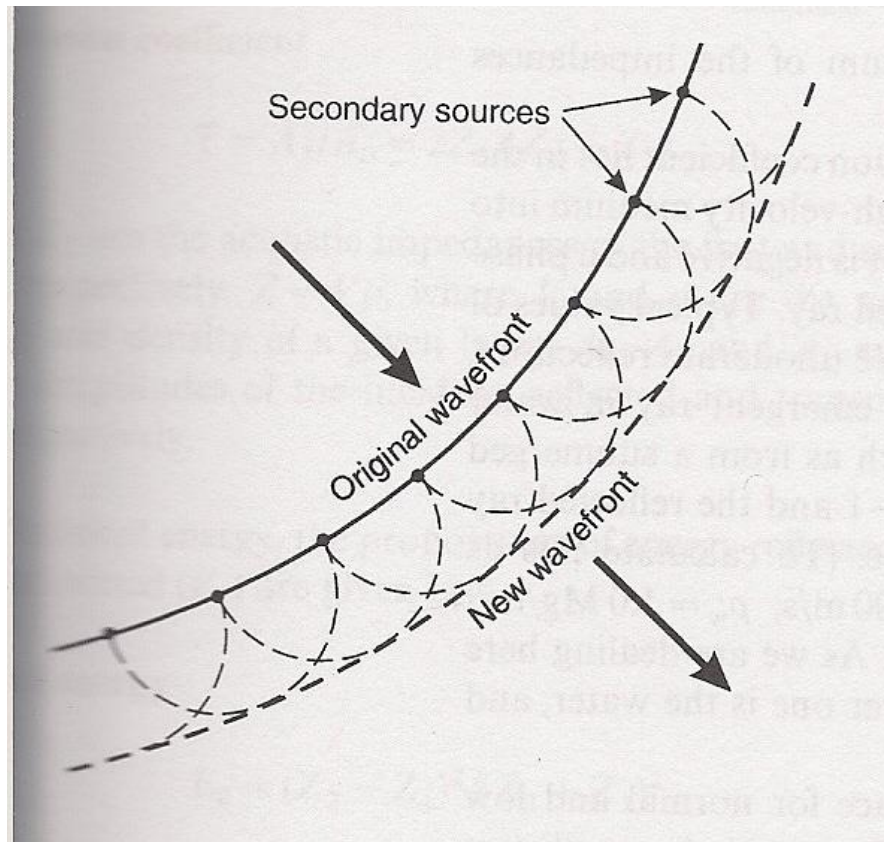
Frente de Onda (wavefront)

- Lugar geométrico das partículas que possuem o mesmo tempo de percurso da onda.



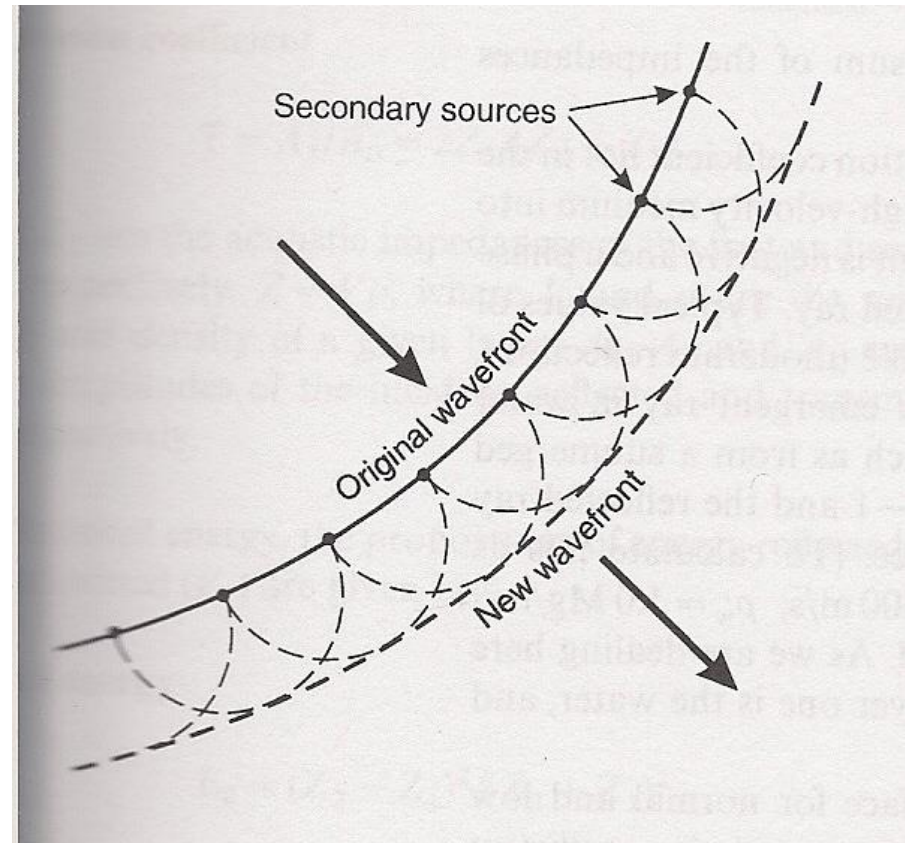
Princípio de Huygens

- Cada ponto da frente da onda funciona como uma nova fonte de ondas.



Raio Sísmico (raypath)

É uma abstração física, representada por uma linha perpendicular à frente de onda. O raio sísmico é muito utilizado graficamente para mostrar o percurso de uma onda.

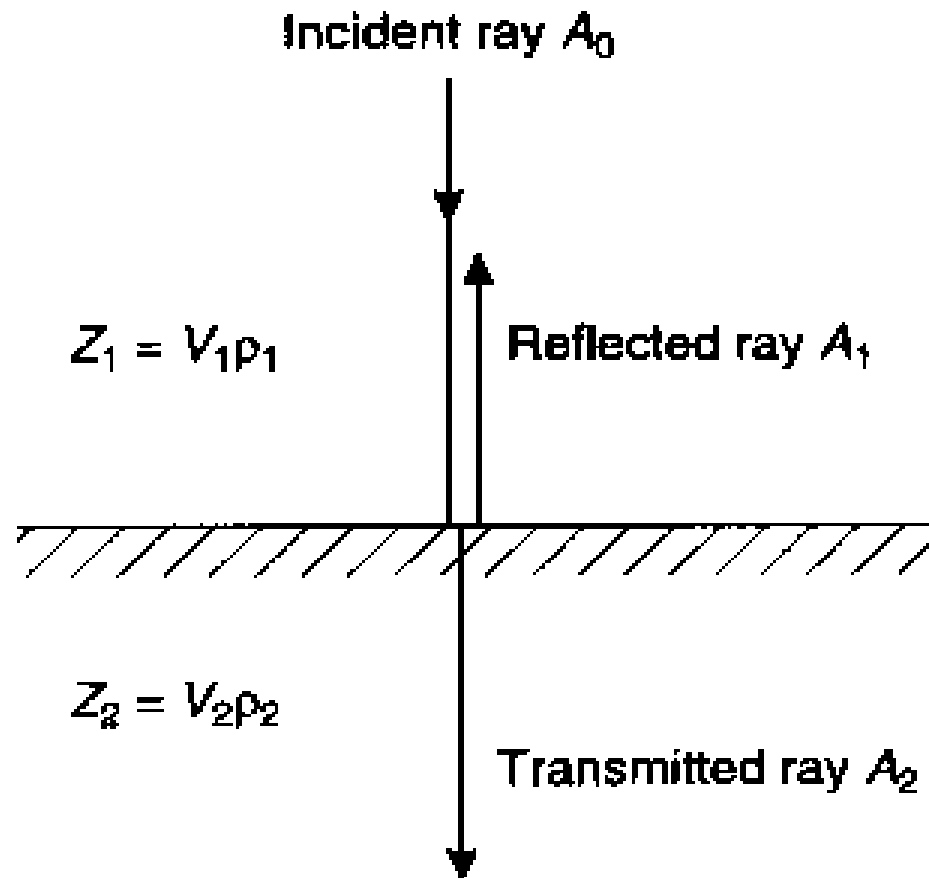


Princípio de Fermat

O Princípio de Fermat diz que uma onda vai percorrer o percurso de menor tempo. Isto é, ao se propagar entre dois pontos, a onda irá se propagar pelo percurso de tempo mínimo

Impedância Acústica

- Produto da velocidade de propagação da onda e a densidade do meio que percorre.
- Rochas mais consolidadas, maior impedância acústica.
- Para propagar a energia sísmica através de uma interface, o contraste das impedâncias acústicas deve ser pequeno.



- Para incidência normal

$$A_0 = A_1 + A_2$$

- Para ângulos $< 20^\circ$

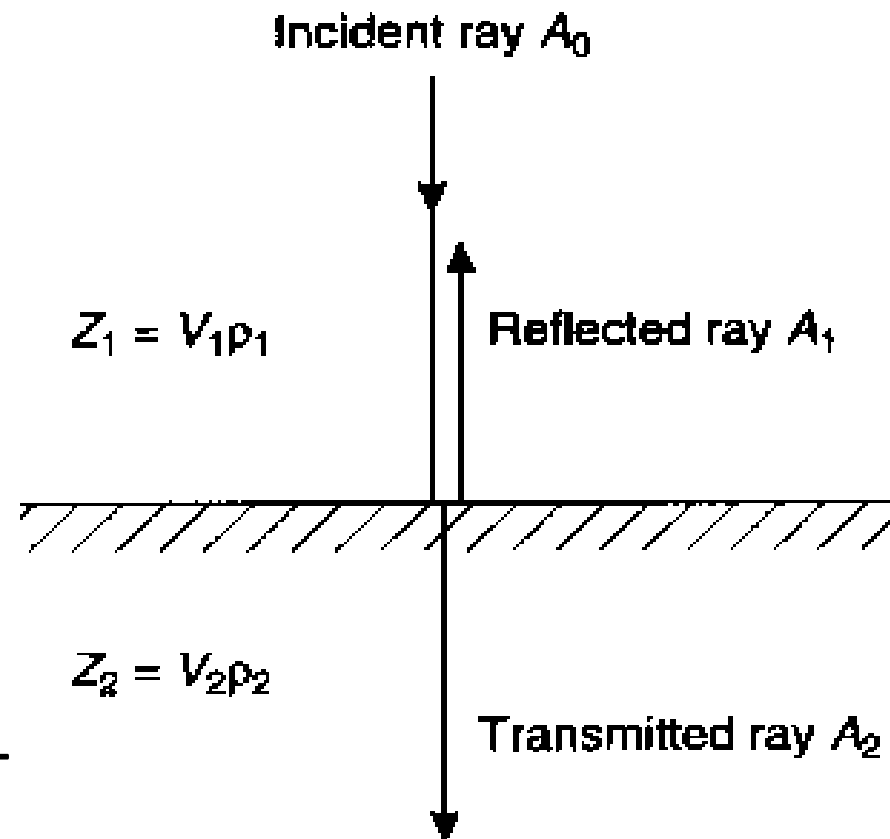
Coeficiente de Reflexão R

$$R = \frac{A_1}{A_0} = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)}$$

Coeficiente de Transmissão T

$$T = \frac{A_2}{A_0} = \frac{2Z_1}{(Z_2 + Z_1)}$$

de modo que $R + T = 1$



Coeficiente de Reflexão

- Quando o raio passa de um meio de alta velocidade para um meio de baixa velocidade, o coeficiente de reflexão é negativo e ocorre uma inversão de 180° na fase.

$$-1 < R < +1$$

- $R < 0.1$ -> reflexão fraca.
- $R > 0.2$ -> reflexão forte.

- Uma onda atravessa a interface água-ar.
- Sabendo que:

$$V_{\text{água}} = 1500 \text{ m / s}$$

$$V_{\text{ar}} = 330 \text{ m / s}$$

$$\rho_{\text{água}} = 1.0 \text{ Mg / m}^3$$

$$\rho_{\text{ar}} = 1293 \text{ kg / m}^3$$

- Quanto vale R?

Energias Transmitida e Refletida

- Energia refletida

$$E_R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

- Energia transmitida

$$E_T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

- Energia total

$$E_R + E_T = 1$$

- Para $R = \pm 1$, $E_R = 1$, e assim toda a energia incidente é refletida e nenhuma é transmitida ($T = 0$ e $E_T = 0$)
- Contrariamente, para $T = \pm 1$, $E_T = 1$, e assim toda a energia incidente é transmitida e nenhuma energia é refletida ($R = 0$ e $E_R = 0$), o que sugere que $Z_2 = Z_1$, ou seja, não há contraste entre as impedâncias acústicas.

- Para o seguinte caso:

$$V_1 = 1800 \text{ m / s}$$

$$V_2 = 1600 \text{ m / s}$$

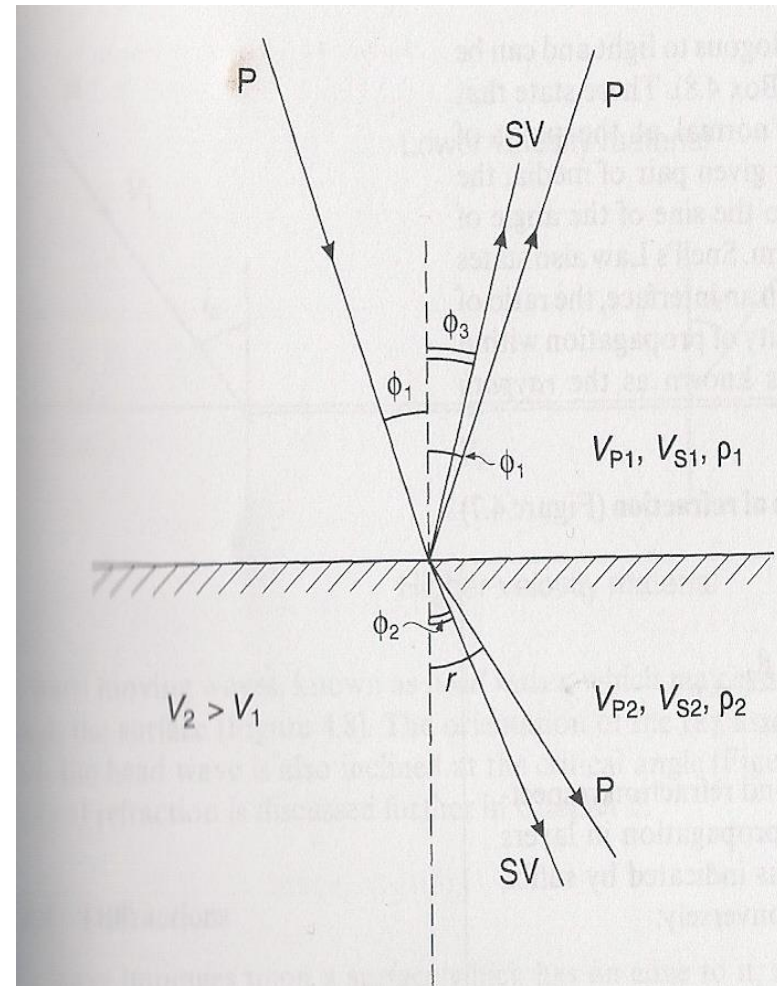
$$\rho_1 = 1.6 \text{ Mg / m}^3$$

$$\rho_2 = 1.8 \text{ Mg / m}^3$$

- Qual o coeficiente de transmissão e reflexão?

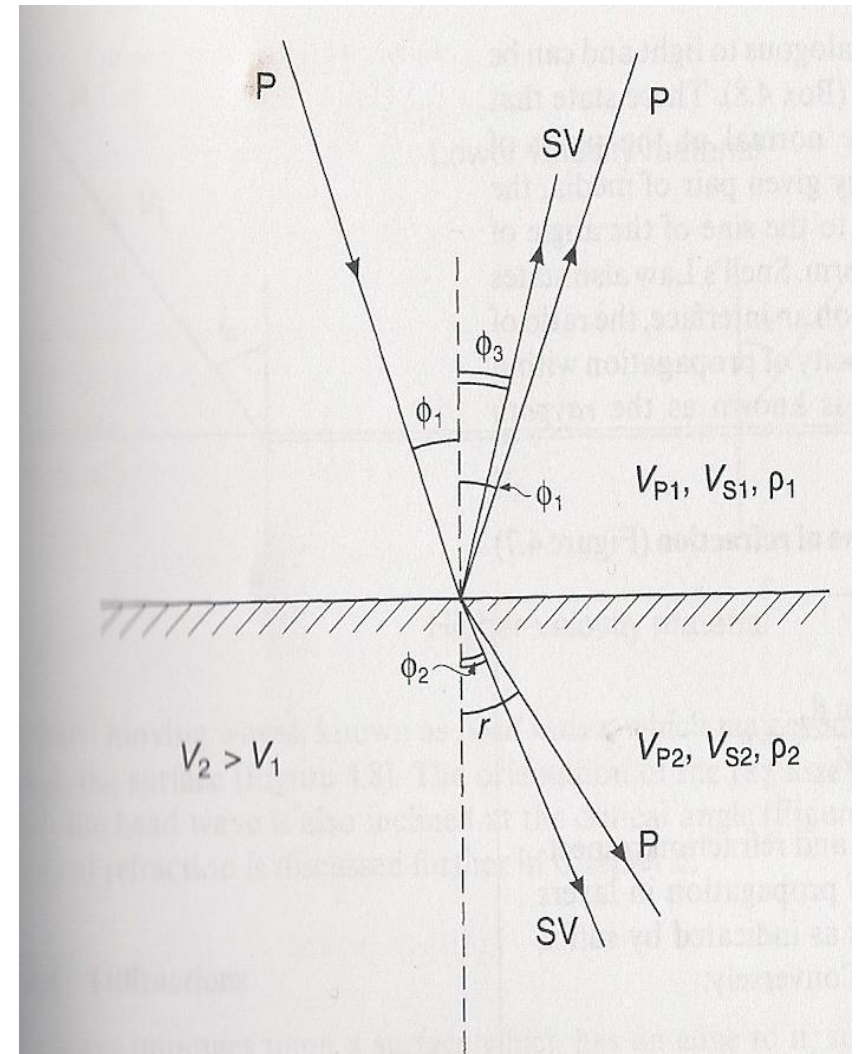
Reflexão e Refração

- Onda P incidente gera onda P refletida e refratada, e também gera onda S refletida e refratada, com amplitudes maiores que as ondas P.
- Amplitude da onda P diminui conforme aumenta o ângulo de incidência.



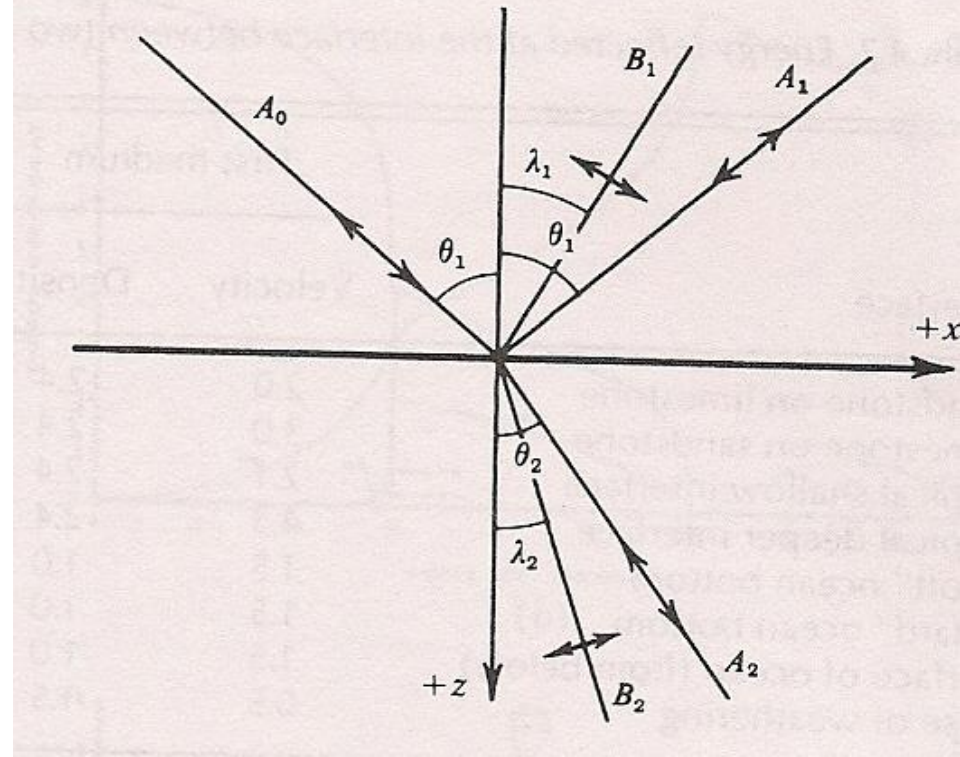
Lei de Snell para uma onda incidente P que gera ondas refletidas P e S.

- 1 \rightarrow onda no meio 1.
- 2 \rightarrow onda no meio 2.



$$\frac{\sin \phi_1}{V_{P1}} = \frac{\sin r}{V_{P2}} = \frac{\sin \phi_3}{V_{S1}} = \frac{\sin \phi_2}{V_{S2}}$$

- $A, \theta \rightarrow$ amplitude e ângulo da onda P.
- $B, \lambda \rightarrow$ amplitude e ângulo da onda S.
- 1 \rightarrow onda no meio 1.
- 2 \rightarrow onda no meio 2.



$$\frac{\sin \theta_1}{A_1} = \frac{\sin \theta_2}{A_2} = \frac{\sin \lambda_1}{B_1} = \frac{\sin \lambda_2}{B_2}$$

e

$$A_1 + A_2 + B_1 + B_2 = A_0$$

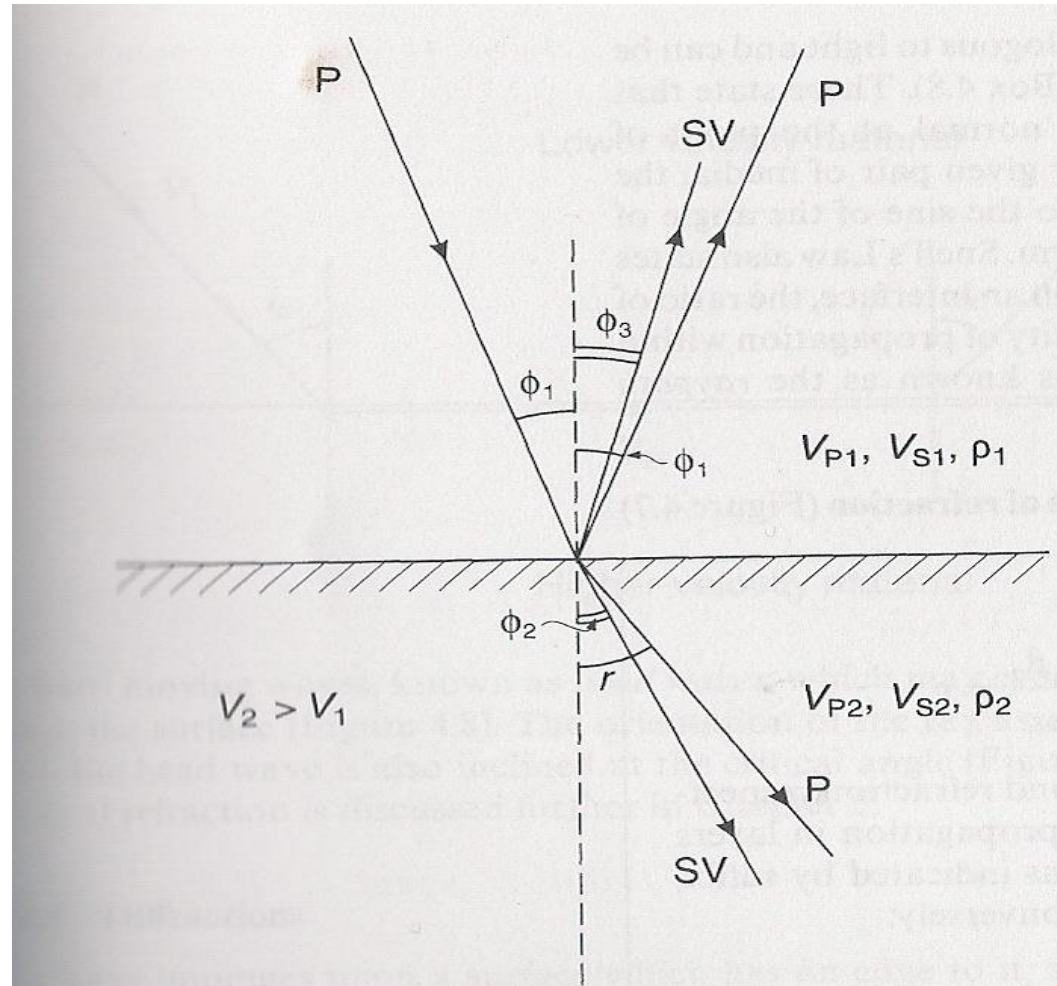
Leis de Reflexão

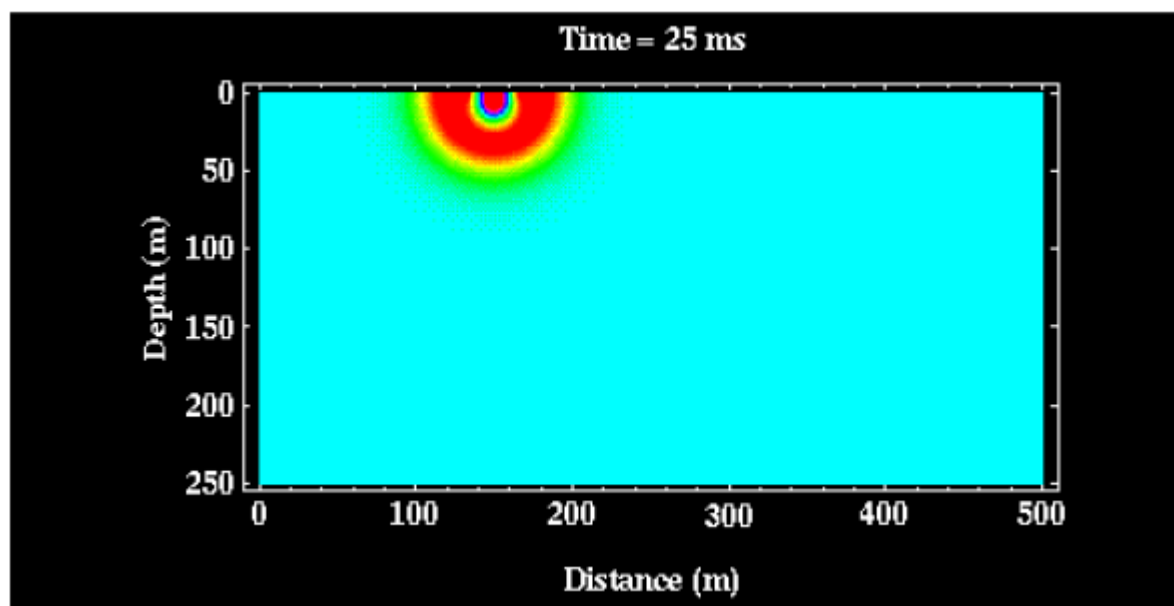
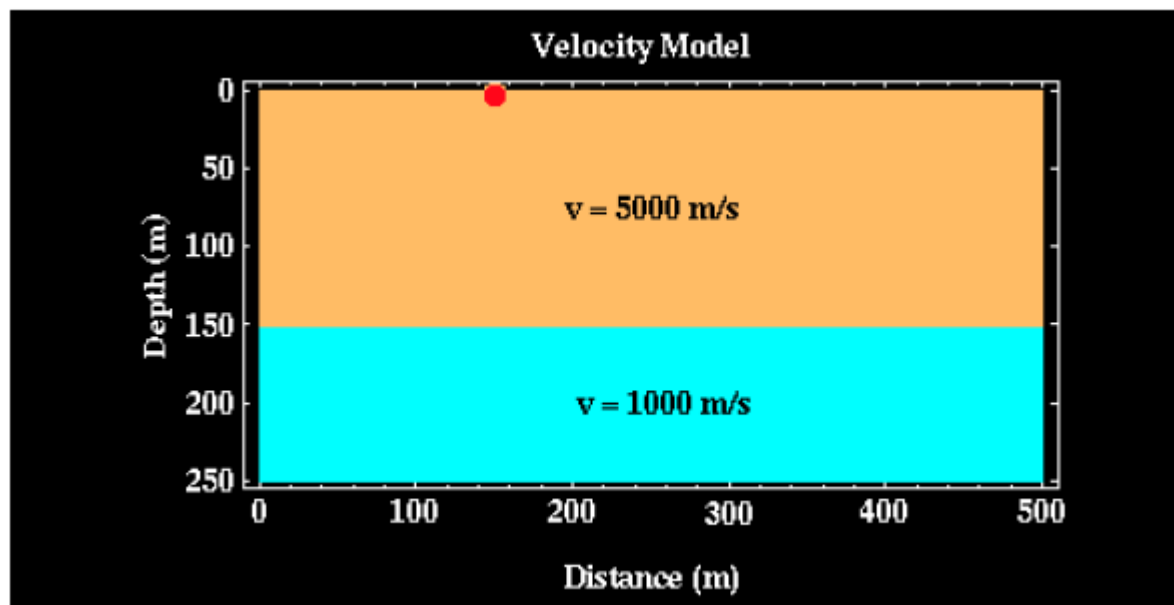
- O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.
- Os raios incidente, refletido (e refratado) e a reta normal ao ponto de incidência pertencem todos ao mesmo plano.

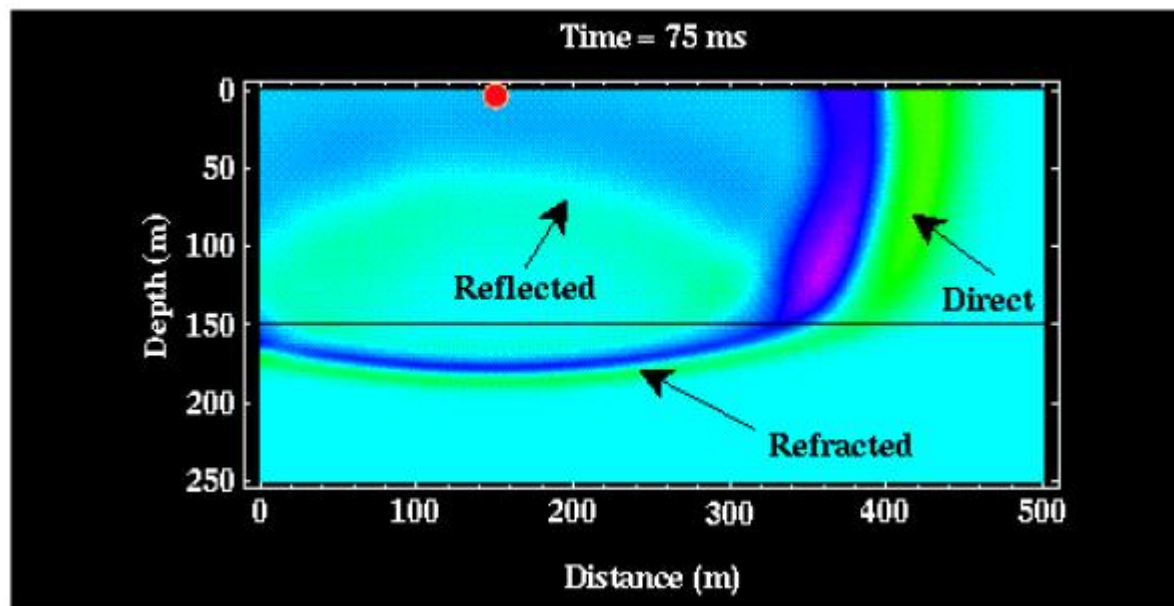
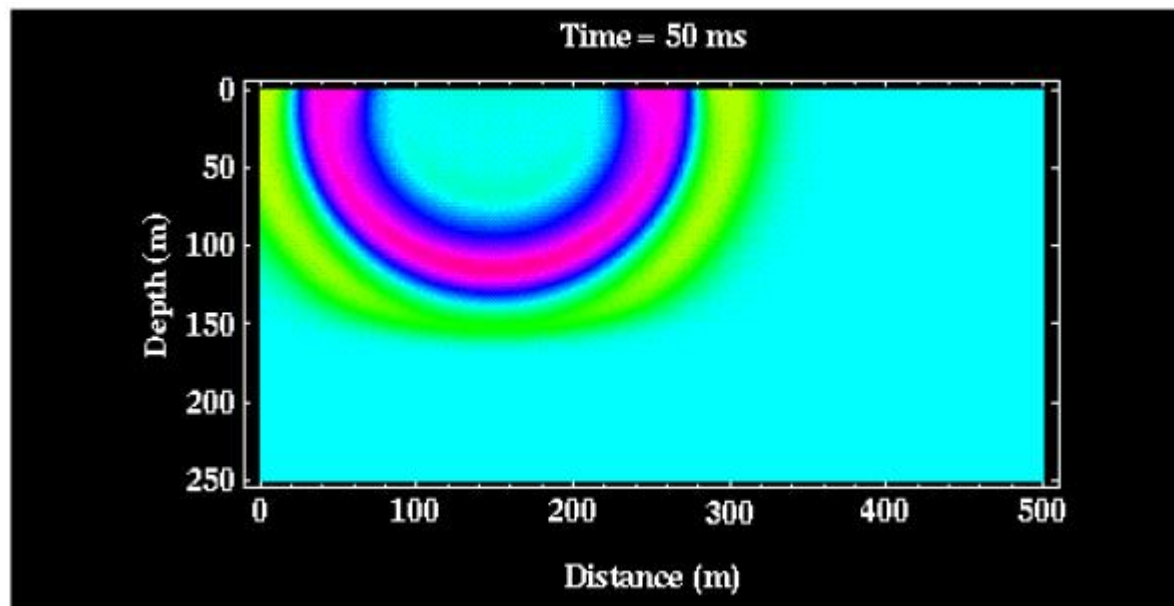
Leis da Refração

Lei de Snell

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





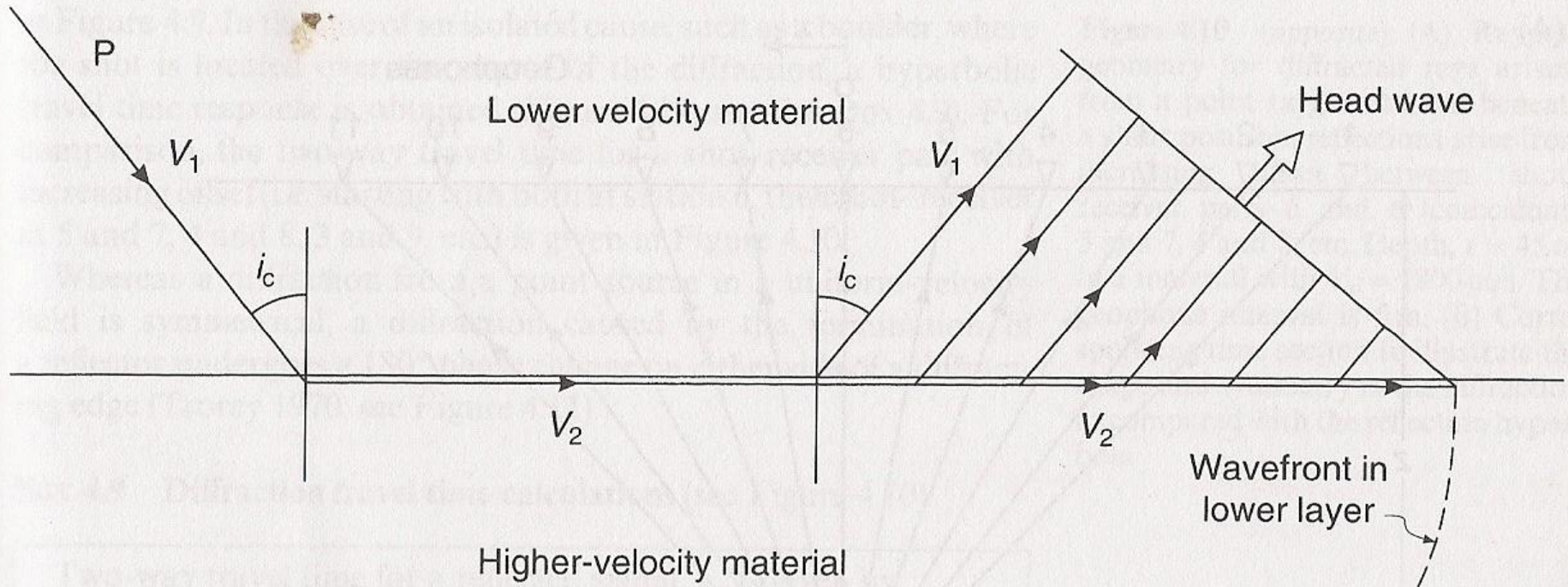


Ângulo Crítico de Refração

- Necessário $V_2 > V_1$
- Temos $\theta_2 = 90^\circ$.
- Ângulo de incidência i_c .
- Substituindo na Lei de Snell, temos

$$\frac{\sin i_c}{v_1} = \frac{\sin 90^\circ}{v_2} = \frac{1}{v_2}$$

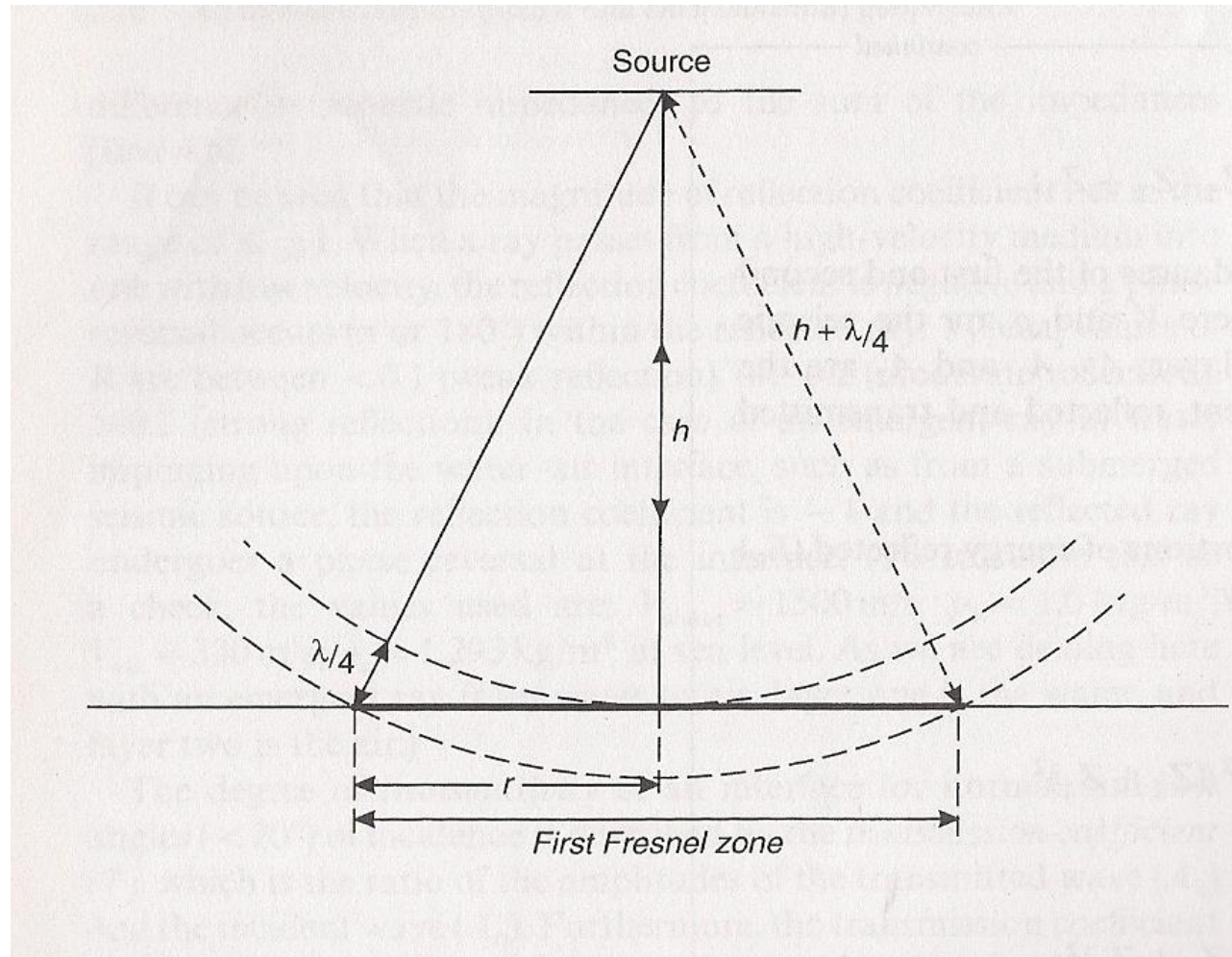
$$\sin i_c = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow i_c = \sin^{-1} \left(\frac{v_1}{v_2} \right)$$



- Head wave -> princípio de Huygens

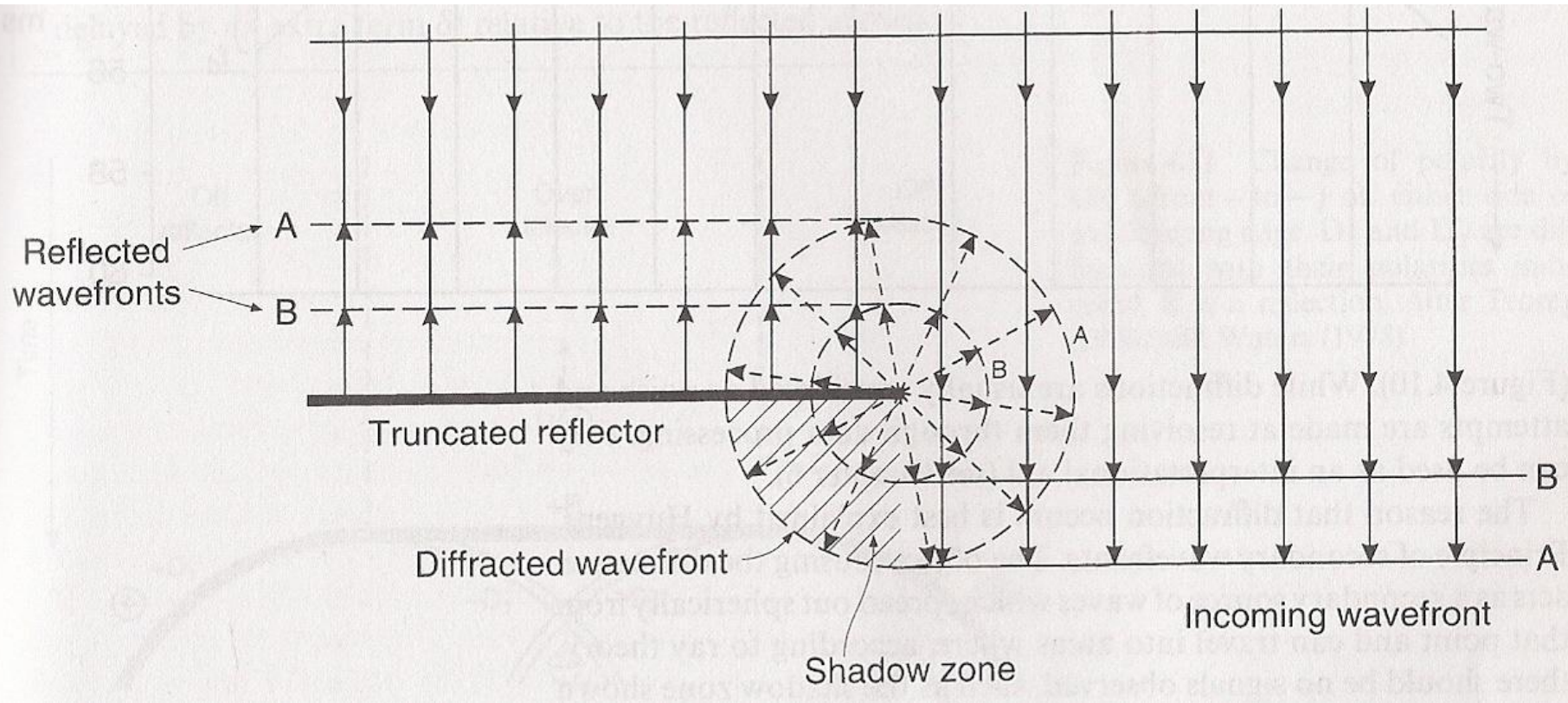
Primeira Zona de Fresnel

Zona na qual ocorrem as reflexões mais importantes, por serem as mais energéticas. Qualquer reflexão que venha de uma zona $> r$, é pouco energética e, conseqüentemente, menos importante.



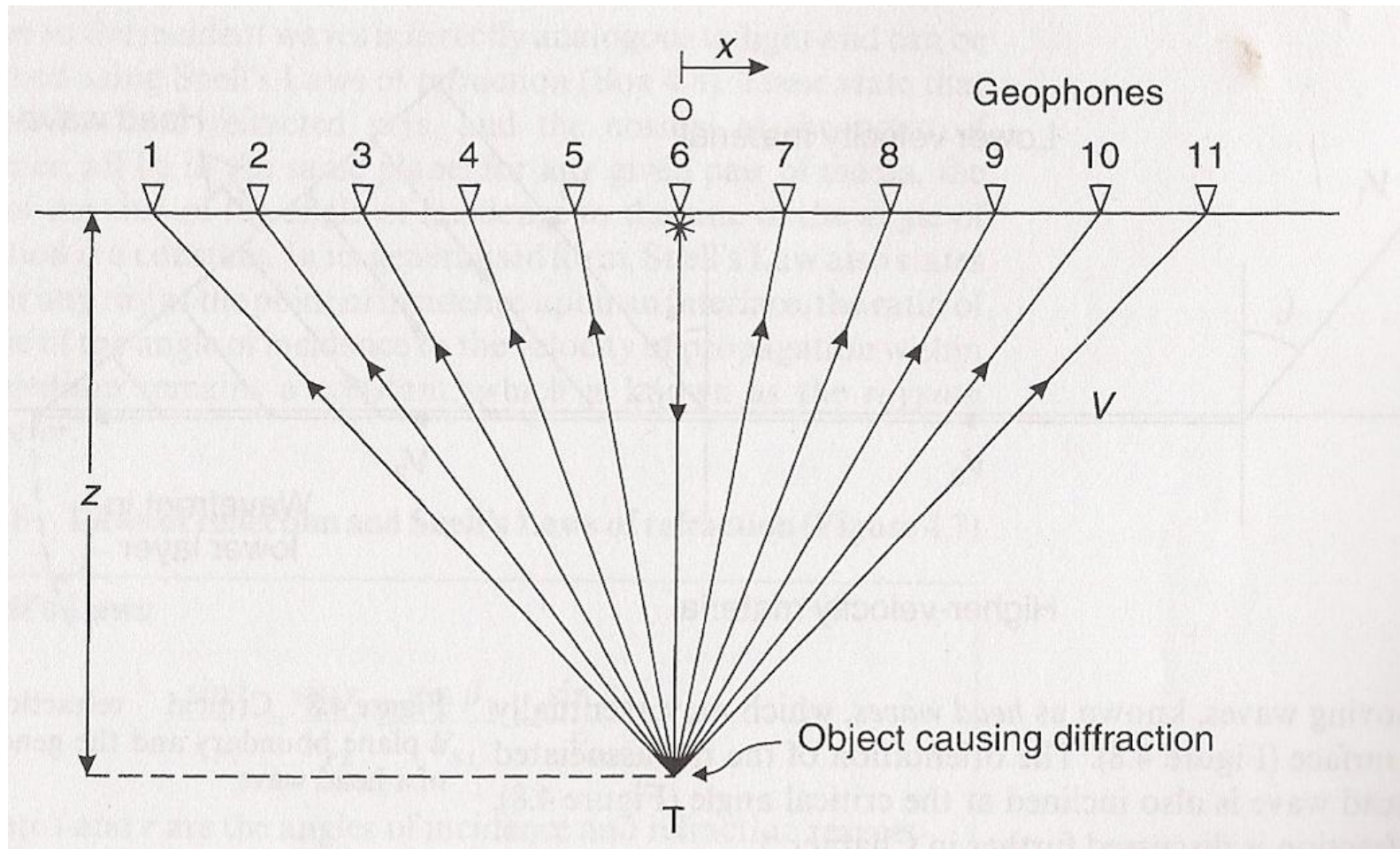
$$r^2 = \frac{\lambda h}{2} + \frac{\lambda^2}{16} \approx \frac{\lambda h}{2} \Rightarrow r \approx \sqrt{\frac{\lambda h}{2}} = \frac{V}{2} \sqrt{\frac{t}{f}}$$

Difração



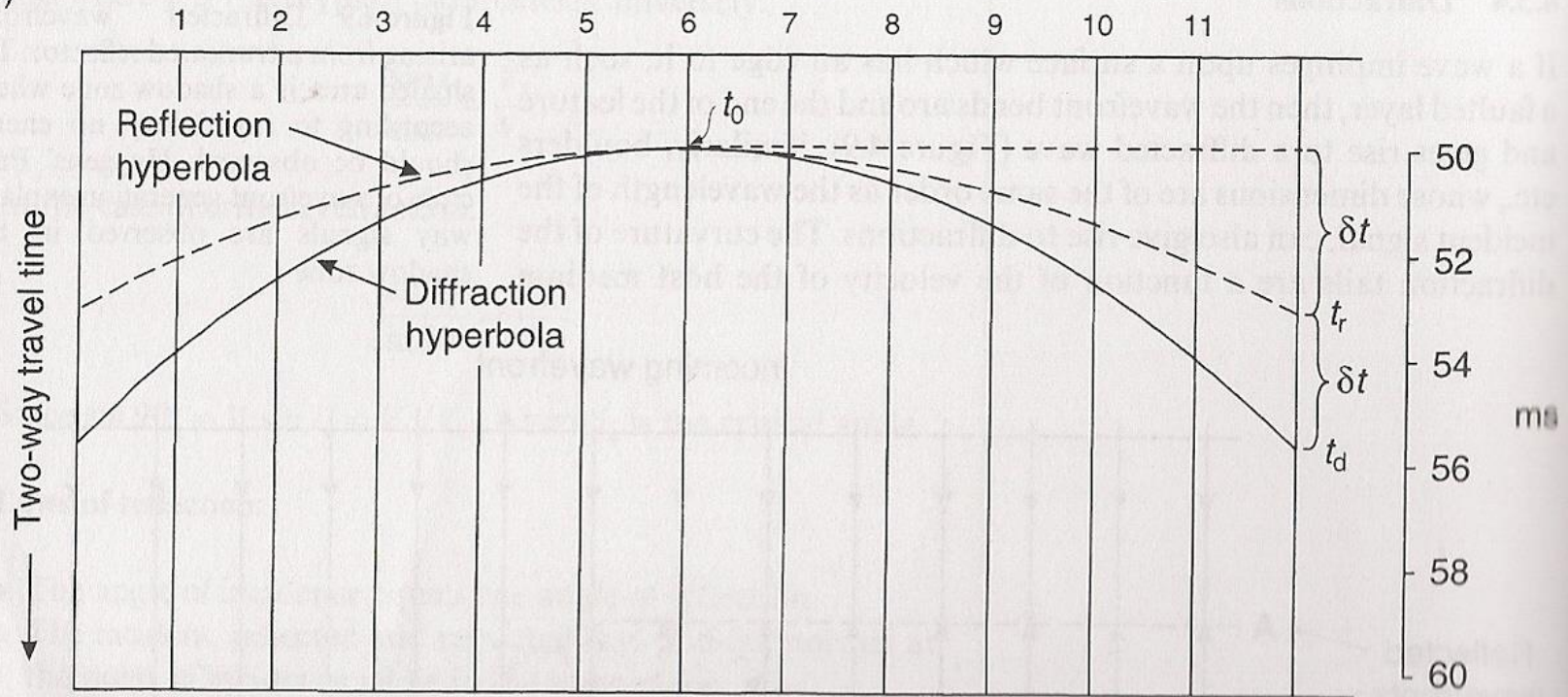
O fenômeno da difração permite à onda alcançar lugares (zonas de sombra) não previstas pela Teoria do Raio.

Caso específico de difração: disparo sobre a fonte de difração



(B)

Trace numbers



$$t_r = \frac{\sqrt{x^2 + 4z^2}}{V} \approx \frac{2z}{V} + \frac{x^2}{4Vz}$$

$$t_0 = \frac{2z}{V} \quad \delta t = \frac{x^2}{4Vz} \quad t_r = t_0 + \delta t$$

$$t_d = \frac{z}{V} + \frac{\sqrt{x^2 + z^2}}{V} = \frac{2z}{V} + \frac{x^2}{2Vz} = t_0 + 2\delta t$$

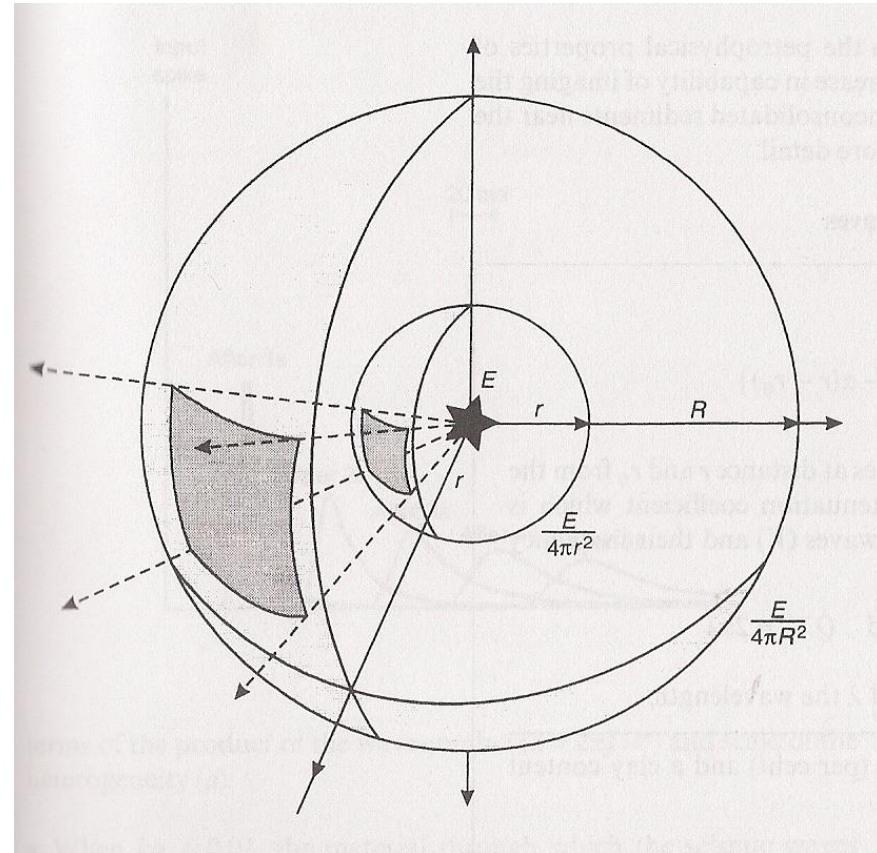
- t_r -> tempo de viagem da onda refletida
- t_0 -> tempo de viagem da onda normal incidente
- t_d -> tempo de viagem da onda difratada

Atenuação

- É a perda da amplitude de acordo com a distância viajada. Pode ocorrer de três formas:
 - Divergência esférica (espalhamento geométrico).
 - Atenuação intrínseca.
 - Espalhamento.

Divergência Esférica

- Energia E liberada no instante do “disparo”.
- Se distribui sobre a superfície esférica formada pela frente da onda.
- Com o aumento do raio, diminui a “densidade de energia” (energia sobre área).



$$E \propto \frac{1}{r^2}$$

$$A \propto \frac{1}{r}$$

Atenuação Intrínseca

- Energia absorvida elasticamente pelo meio (calor devido à fricção).
- Processo exato de atenuação ainda incógnita.
- Decréscimo exponencial com distância.
- Varia com o tipo de material do meio (coeficiente de atenuação α).
- Fator de Qualidade Q .
- Função de Dissipação Específica Q^{-1} .

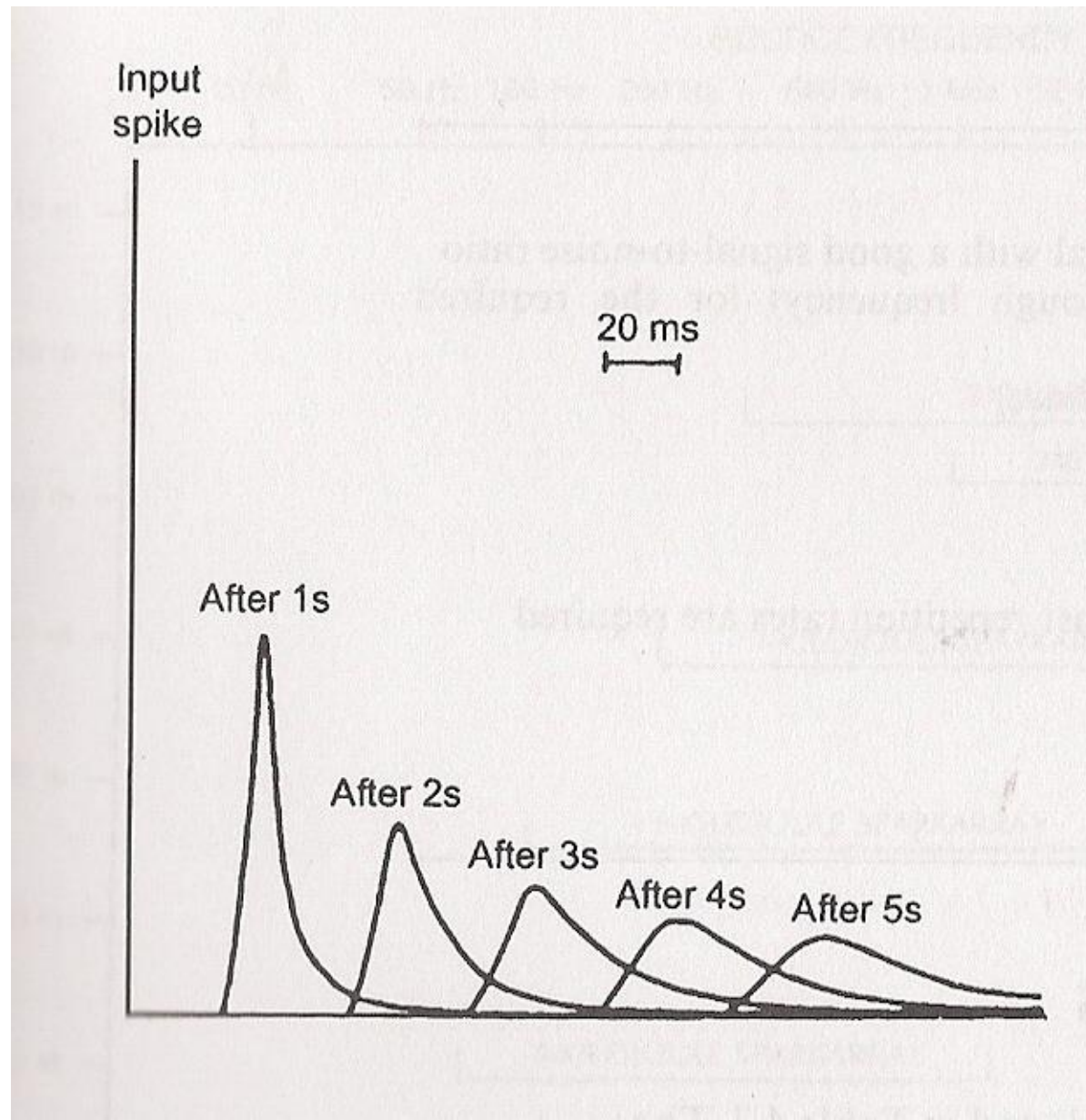
- A é a amplitude da onda a uma distância r .
- A_0 é a amplitude da onda a uma distância r_0 .
- α é o coeficiente de atenuação.
- Q é o fator de qualidade.

$$\frac{A}{A_0} = \frac{r_0}{r} \exp[-\alpha(r - r_0)]$$

$$\alpha = \frac{\pi f}{QV}$$

$$Q^{-1} = 2\alpha\lambda$$

Comportamento da amplitude da onda devido à atenuação intrínseca.



Espalhamento

- Atenuação aparente por refração, refração e difração.
- Três tipos descritos em termos do produto do número de onda K e escala de heterogeneidade a .
 - $Ka \ll 0,01 \rightarrow$ espalhamento *quasi-homogeneous*.
 - $0,01 < Ka < 0,1 \rightarrow$ espalhamento de *Rayleigh* (mais comum).
 - $0,1 < ka < 10 \rightarrow$ espalhamento *Mie*.

$$k = 2\pi f / V$$

Os três tipos de atenuações são mostrados na figura abaixo.

