

Fenomenologia das ondas I

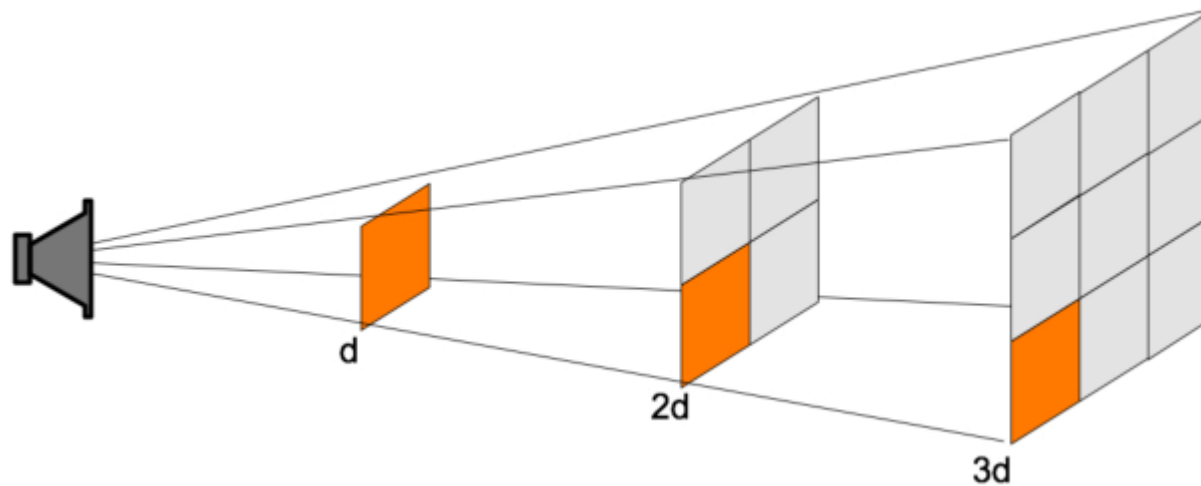
Roberto Ortiz

Professor Livre-Docente
EACH – USP

Ondas esféricas

- Uma onda que se propaga isotropicamente em 3 dimensões é classificada como “esférica”
- A sua intensidade I diminui com o quadrado da distância d , i.e.:

$$I \sim d^{-2}$$



- Se a onda esférica for transversal e harmônica sua equação será genericamente:

$$s(r,t) = A(r) \sin(k r - \omega t + \delta)$$

- onde $A(r)$ é a amplitude da onda a uma distância r da fonte e δ é uma constante de fase.
- Quando estudamos ondas em 1 dimensão vimos que a intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude. Logo, temos que:

$$A(r) = A_0 / r$$

- onde A_0 é a “amplitude inicial” da onda, ao ser emitida. Deste modo, a intensidade I , ao ser proporcional a $A(r)$ diminui com r^{-2} .

Ondas circulares

- Uma onda que se propaga isotropicamente em 2 dimensões é classificada como “circular”.
- A sua intensidade I diminui inversamente proporcional à distância d pois a potência é distribuída ao longo de uma circunferência de raio d , i.e.:

$$I \sim d^{-1}$$



- Se a onda circular for transversal e harmônica sua equação será genericamente:

$$s(r,t) = A(r) \sin(k r - \omega t + \delta)$$

- onde $A(r)$ é a amplitude da onda a uma distância r da fonte e δ é uma constante de fase. Do mesmo modo que as ondas em 1 dimensão e as ondas esféricas, a intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude, mas neste caso temos que:

$$I \sim r^{-1}$$

- Logo:

$$A(r) = A_0 / \text{sqrt}(r)$$

Ondas planas em 2 dimensões

- Se a onda estiver muito distante da fonte emissora então ela será “quase plana”.
- Do mesmo modo, pode-se produzir uma onda plana em 2 dimensões introduzindo uma perturbação horizontal no meio elástico:



ondas no mar



ondas planas em um tanque

- Neste caso, não havendo atrito, a intensidade é inteiramente transmitida em 1 direção. Logo, a amplitude A da onda permanece constante.
- A equação da onda plana em 2 dimensões é portanto semelhante àquela de uma onda transversal em 1 dimensão:

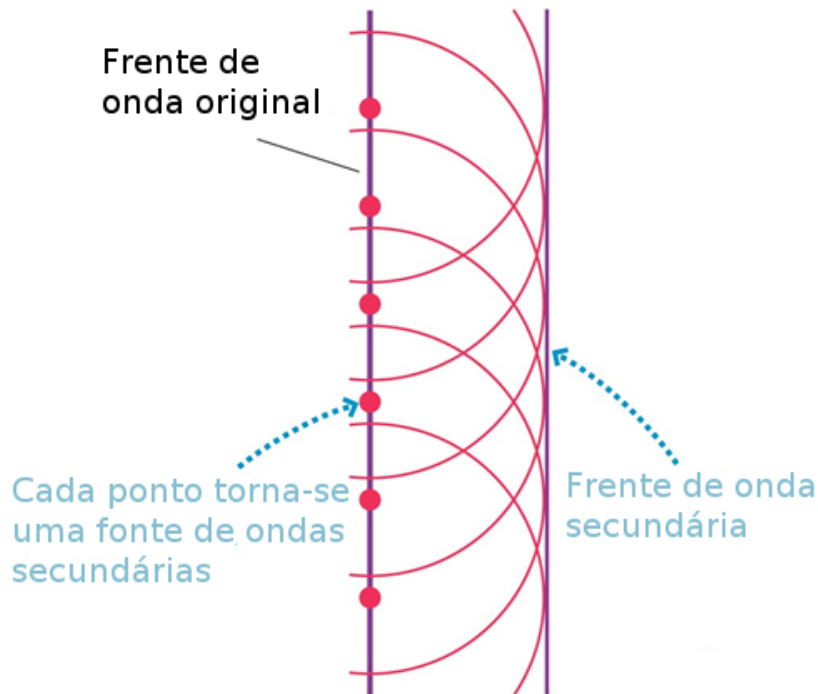
$$s(x,t) = A_0 \sin (k x - \omega t + \delta)$$

- onde x é a direção de propagação e a amplitude A_0 permanece constante. Do mesmo modo, a intensidade I da onda ($\sim A_0^2$) também permanece constante ao longo da direção de propagação da onda.

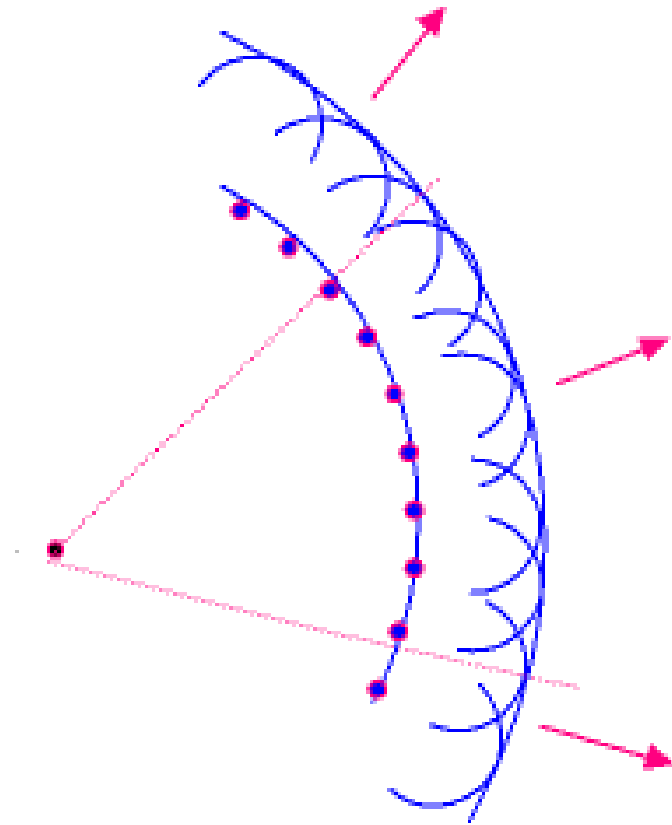
Fenomenologia da propagação de ondas

- O “Princípio de Huygens – Fresnel”:

“Todos os pontos de uma frente de onda funcionam como fontes pontuais para ondas secundárias. Depois de um tempo t , a nova posição da frente de onda será dada por uma superfície tangente a essas ondas secundárias.”



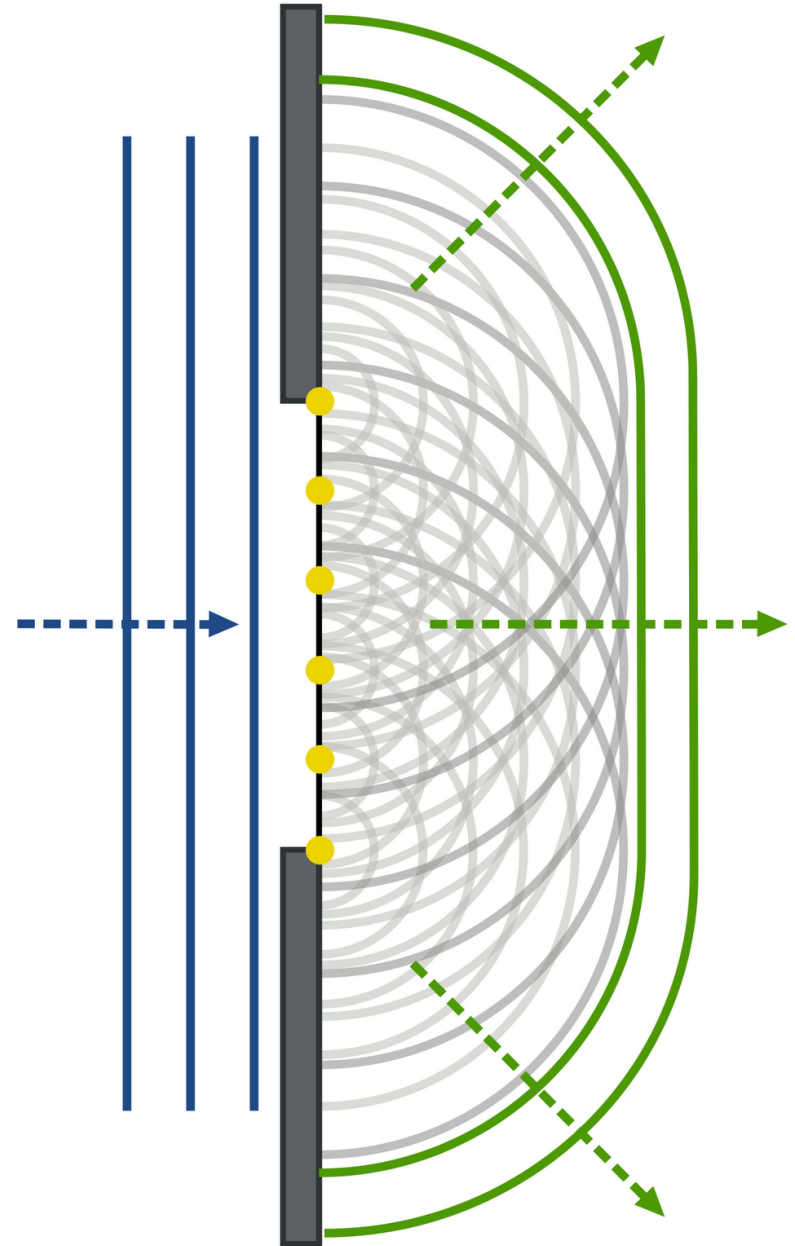
- O princípio de Huygens explica a propagação de ondas em 2 e 3 dimensões
- Ao lado, a propagação de uma onda plana em 2 dimensões



- Ao lado, o “Princípio de Huygens” aplicado a uma onda circular.
- Do mesmo modo pode-se aplicá-lo a uma onda esférica

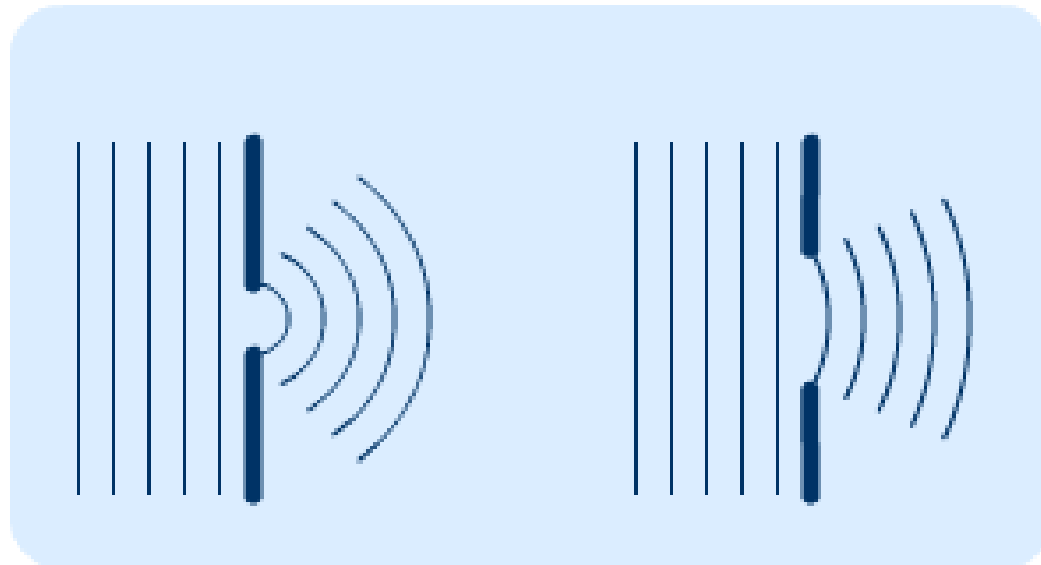
Difração de ondas

- É o conjunto de fenômenos que ocorre quando uma onda encontra um obstáculo ou uma abertura.
- Ao passar pelo obstáculo ou abertura a propagação da onda não segue em linha reta.
- Novas “frentes de onda” são criadas a partir daí, de acordo com o princípio de Huygens – Fresnel

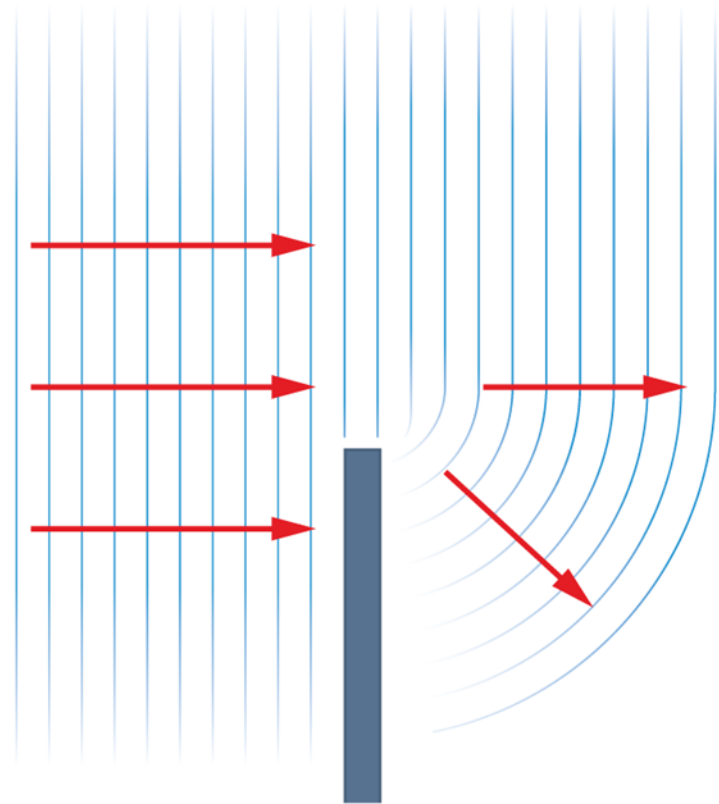
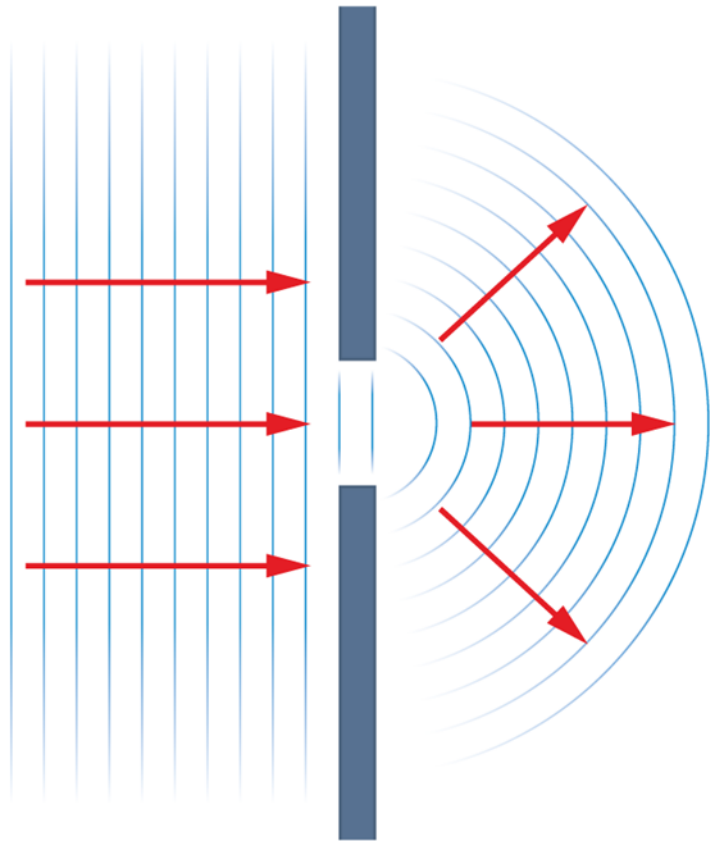


“Grau” de difração

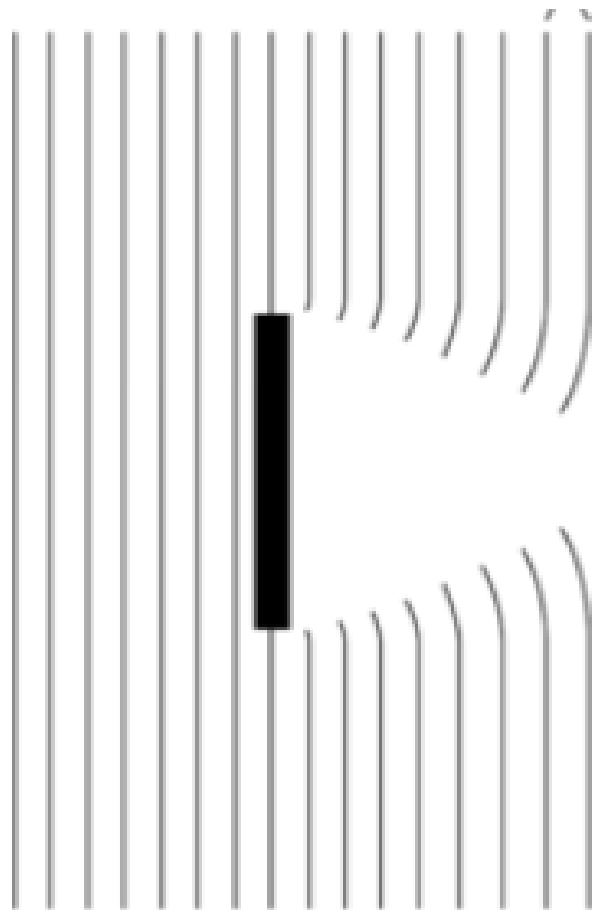
- O efeito de difração é máximo quando o tamanho do obstáculo ou abertura é da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda.
- No exemplo à esquerda o tamanho da abertura é aproximadamente igual ao comprimento de onda.



Exemplos:



Exemplos:



Exemplos práticos de difração:

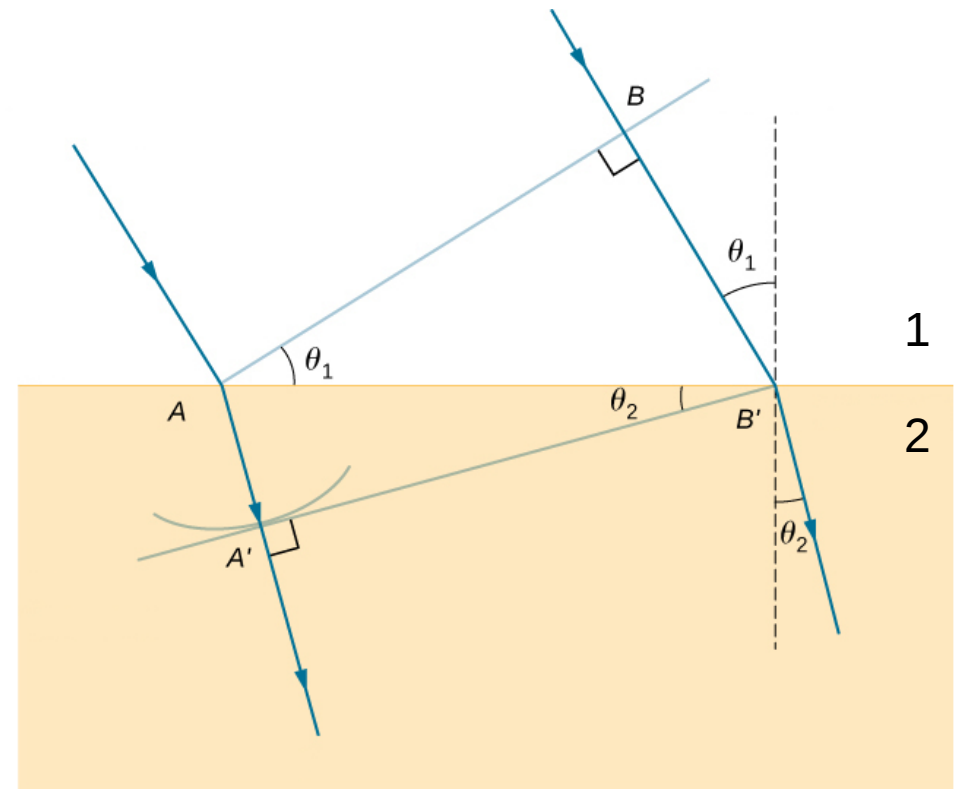
- Quando somos capazes de ouvir o som emitido por uma fonte sonora oculta por algum obstáculo.
- Quando o sinal eletromagnético é captado por uma antena receptora (de TV, celular, etc.) mesmo quando há obstáculos entre esta e a antena emissora.
- Quando as ondas provenientes de alto-mar penetram em enseadas estreitas, ancoradouros, etc.

Refração de ondas

- O fenômeno conhecido como “refração” é a mudança de direção da propagação de uma onda.
- Ele é causado pela mudança de velocidade da onda
- Geralmente (mas nem sempre) há uma interface separando 2 meios com velocidade de propagação diferente
- A onda, ao atravessar essa interface, muda sua velocidade de propagação. Conseqüentemente ela sofre um desvio.
- A refração é um fenômeno que ocorre em quaisquer tipos de onda (luz, som, etc.)

Cálculo geométrico da refração

- A figura ao lado mostra a refração sofrida por uma onda plana ao passar de um meio com velocidade v_1 para um meio com velocidade v_2 .
- O segmento de reta AB' representa a hipotenusa dos 2 triângulos retângulos: $\triangle ABB'$ e $\triangle AA'B'$
- Além disso:
 - $BB' = v_1 t$
 - $AA' = v_2 t$
- onde v_1 e v_2 são as velocidades de propagação nos respectivos meios.

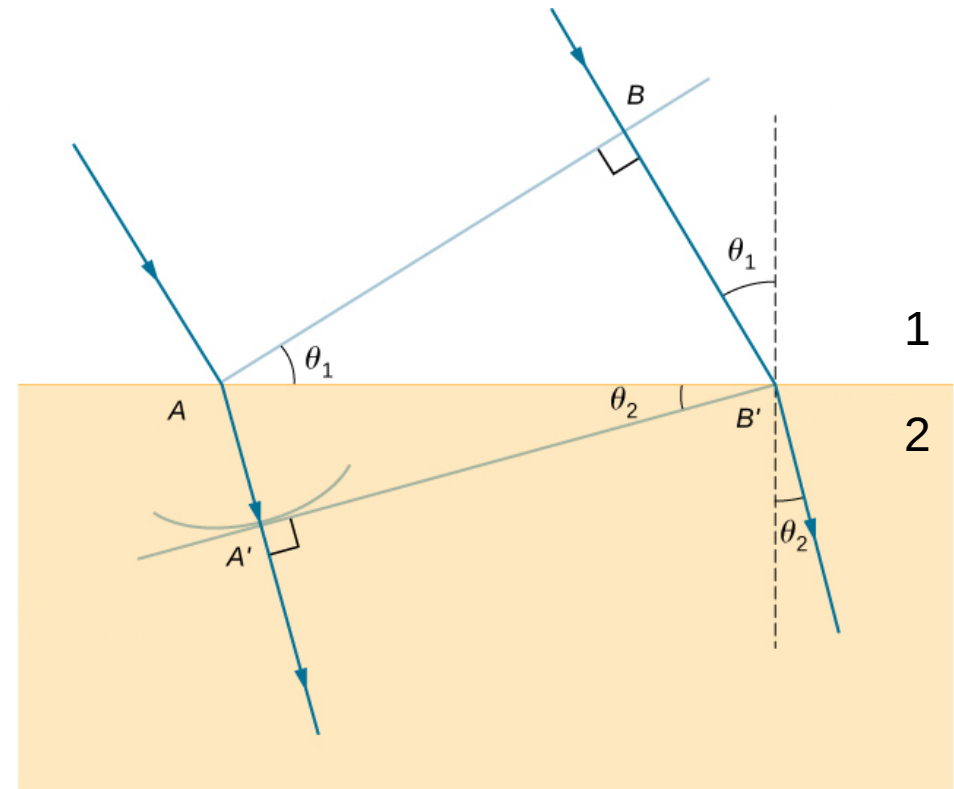


Cálculo geométrico da refração

$$\sin \theta_1 = \frac{BB'}{AB'} = \frac{v_1 t}{AB'}$$

$$\sin \theta_2 = \frac{AA'}{AB'} = \frac{v_2 t}{AB'}$$

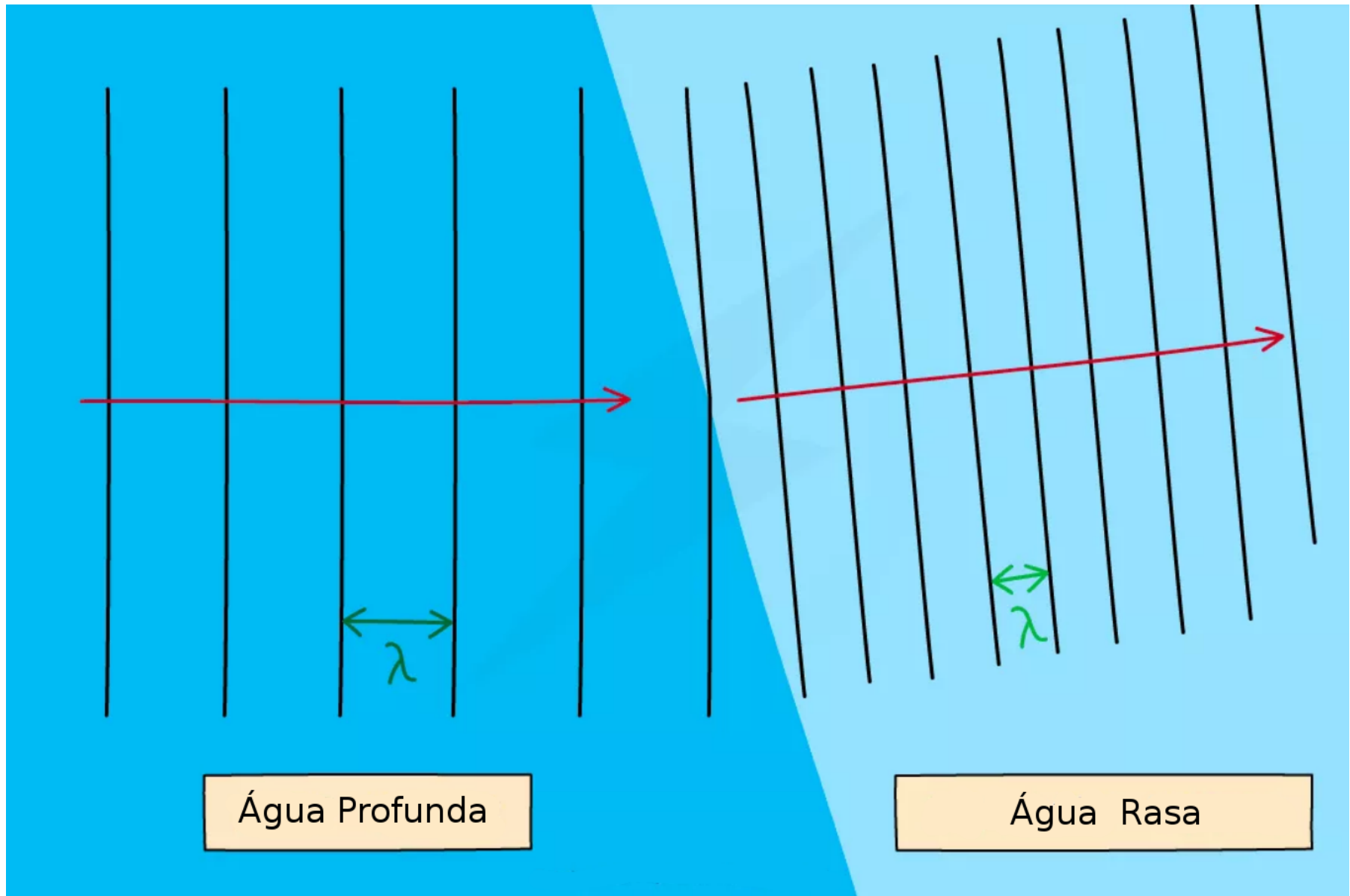
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$



Conclusões sobre a refração:

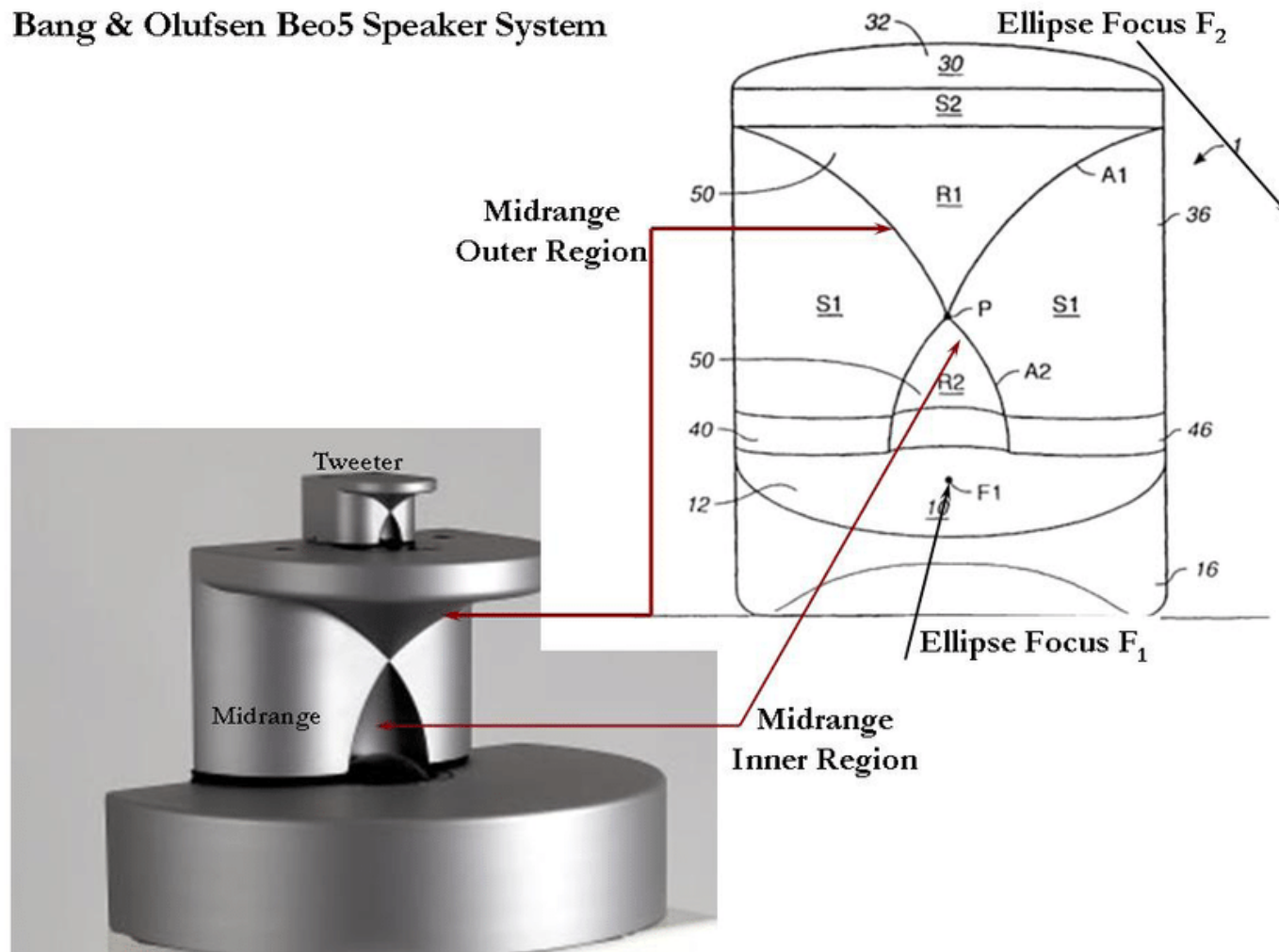
- Se a onda passar do meio 1 para o meio 2 e $v_1 > v_2$ então a direção de propagação da onda aproximar-se-á da normal à interface.
- Além disso, haverá reflexão parcial da onda na interface
- Conforme já vimos, se $v_2 < v_1$ haverá uma mudança de fase de π na onda refletida

Exemplo: refração de ondas na água



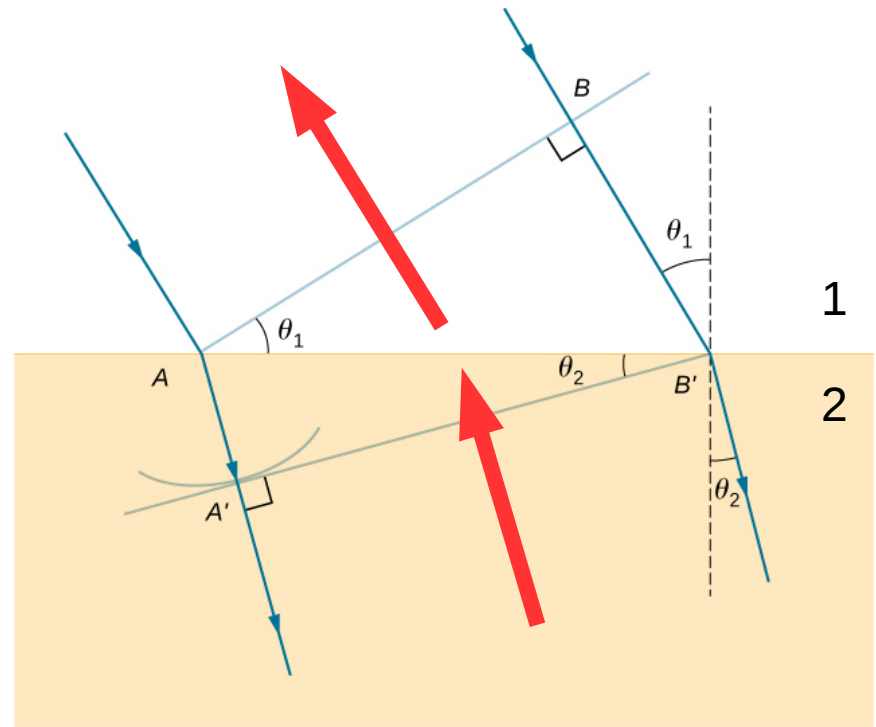
Exemplo: lentes sonoras

Bang & Olufsen Beo5 Speaker System

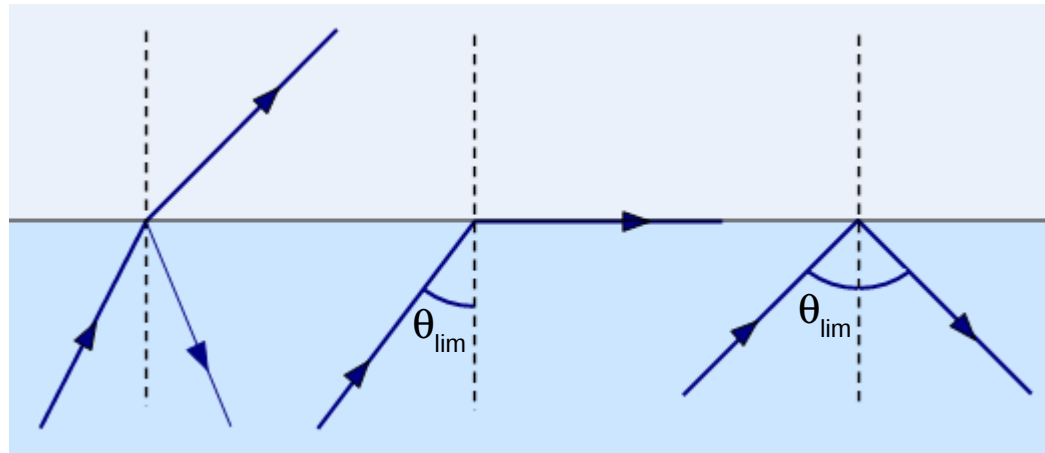


Reflexão total

- Se a onda procede do meio 2 \rightarrow 1 então sua direção de propagação se afasta da normal ao cruzar a interface.
- Quanto maior for θ_2 , maior será θ_1 e $\theta_1 > \theta_2$ se $v_1 > v_2$.
- Qual é o limite de θ_2 , ângulo de incidência da onda na interface 1/2 ?



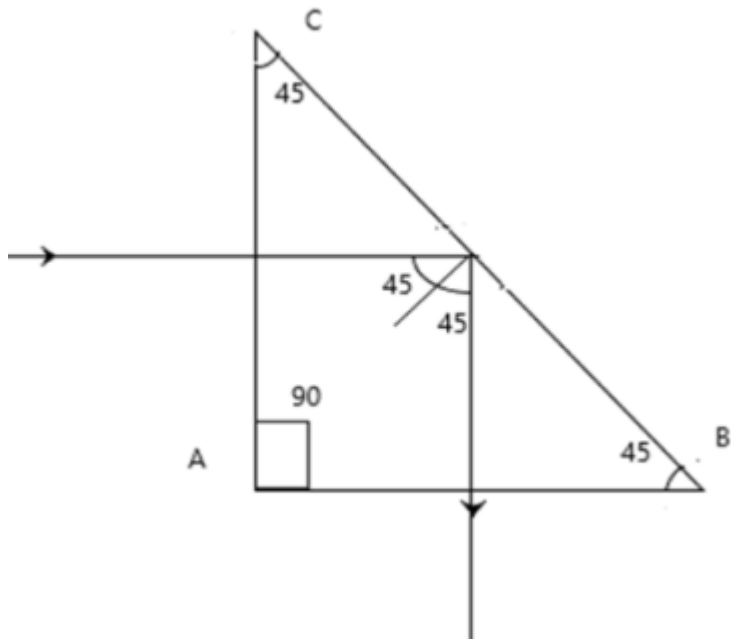
- O limite de θ_2 é aquele que corresponde a $\theta_1 = 90^\circ$.
- Além desse limite a onda não ultrapassa a interface, mas reflete dentro do meio 2.
- A este fenômeno chamamos de “reflexão total” e o ângulo limite de incidência pode ser calculado:



$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin \theta_{\text{lim}}} = \frac{v_1}{v_2} \quad \longrightarrow \quad \sin \theta_{\text{lim}} = \frac{v_2}{v_1}$$

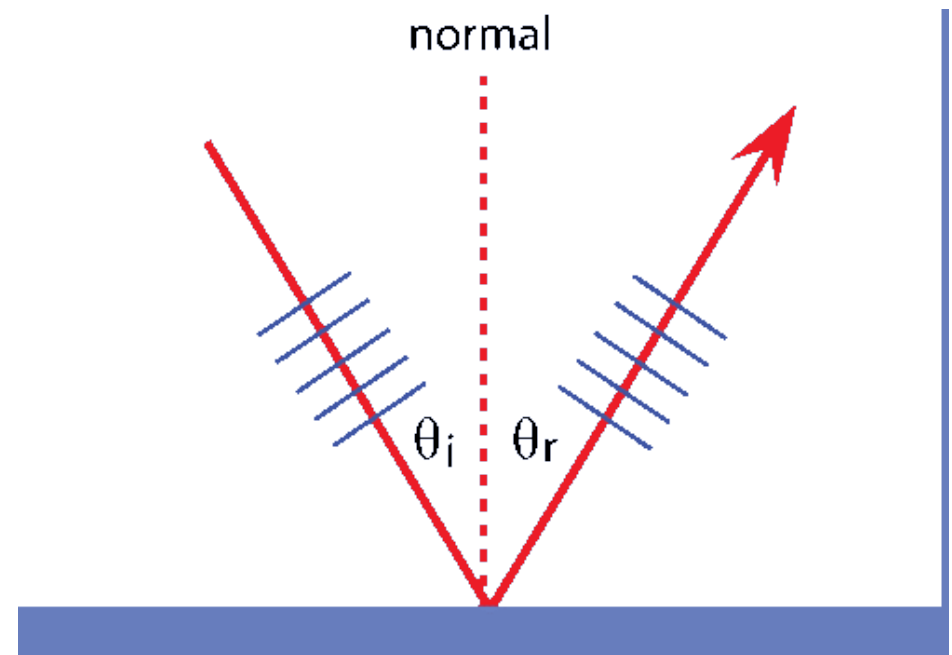
$$\frac{1}{\sin \theta_{\text{lim}}} = \frac{v_1}{v_2}$$

Exemplo: prismas de reflexão total



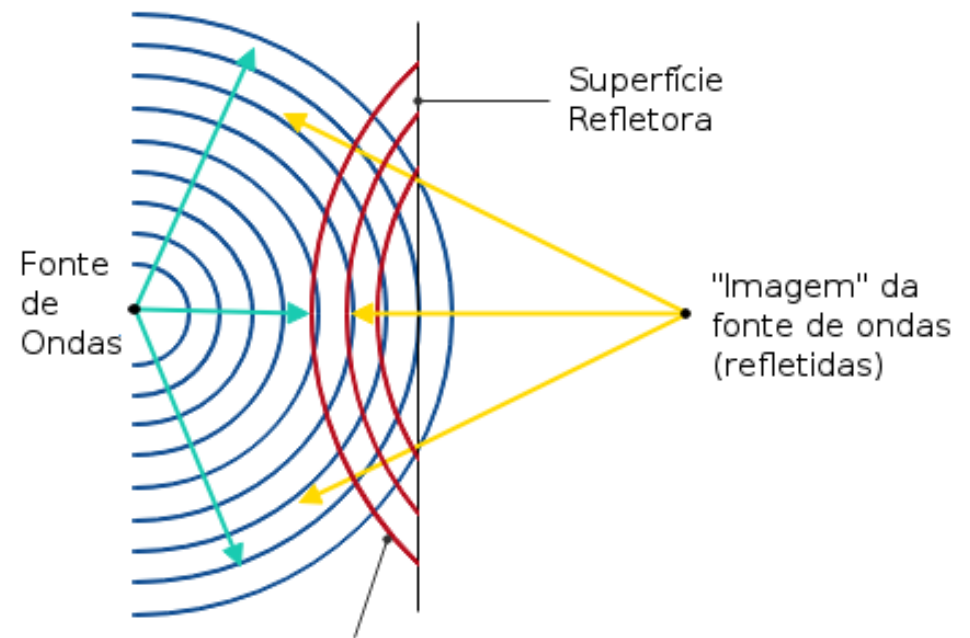
Reflexão de ondas

- Na figura ao lado o ângulo de incidência θ_i é igual ao ângulo de reflexão θ_r .
- A razão entre a intensidade refratada/refletida depende do ângulo de incidência e da razão entre as velocidades de propagação.
- Quanto menor θ_i , menor a razão entre a intensidade refletida/refratada.



Reflexão de ondas

- Se não houver transmissão da onda para o meio 2 ela poderá ser parcial ou totalmente absorvida pela barreira.
- Aplica-se o “Princípio de Huygens” para se determinar a forma da onda refletida.



Fim