

# Características Físicas das Fibras Ópticas

Aula 2

Prof.<sup>a</sup> Cindy Stella Fernandes

---

[cindy.fernandes@unifesspa.edu.br](mailto:cindy.fernandes@unifesspa.edu.br) – [cindy.fernandes@gmail.com](mailto:cindy.fernandes@gmail.com)

16/03/2022

# Agenda

---

- Características Físicas das Fibras Ópticas
  - Espectro eletromagnético
  - Princípio de propagação
  - Comprimento de onda
  - Índice de refração
  - Reflexão e refração na fronteira entre dois meios, reflexão interna total

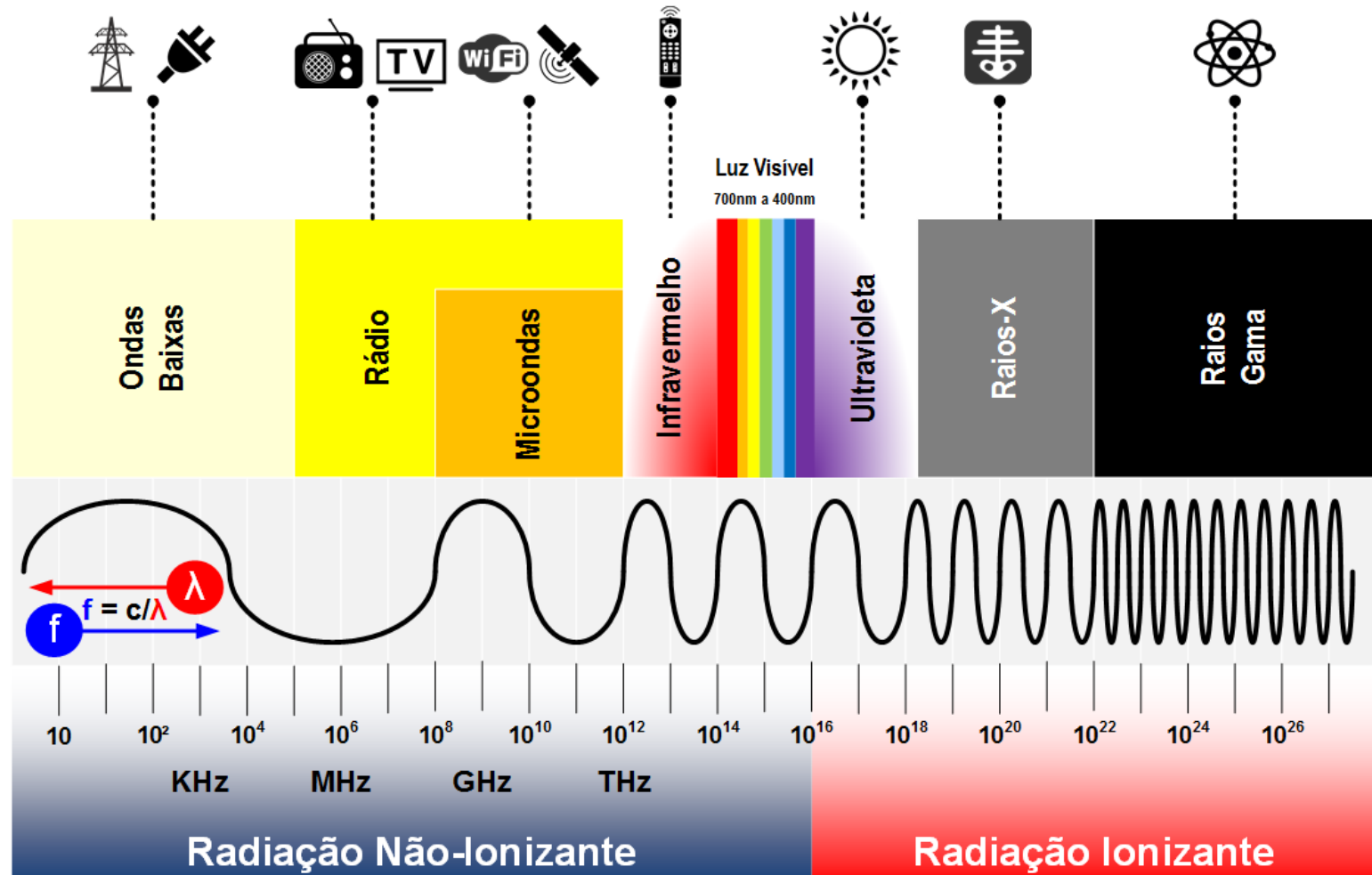
# Espectro eletromagnético

---

- Bandas espectrais ópticas
  - Todos os sistemas de informação utilizam alguma forma de energia eletromagnética para transmitir sinais;
  - O espectro de radiação eletromagnético (EM), baseado na energia eletromagnética, é a combinação dos campos elétrico e magnético, e inclui potência, ondas de rádio, micro-ondas, luz infravermelha, luz visível, luz ultravioleta, raios X e raios gama.

# Espectro eletromagnético

- As radiações não ionizantes são as que não produzem ionizações, ou seja, não possuem energia suficiente para arrancar elétrons dos átomos do meio por onde está se deslocando, mas tem o poder de quebrar moléculas e ligações;
- Radiação ionizante é a radiação que possui energia suficiente para ionizar átomos e moléculas, ou seja é capaz de arrancar um elétron de um átomo ou molécula.

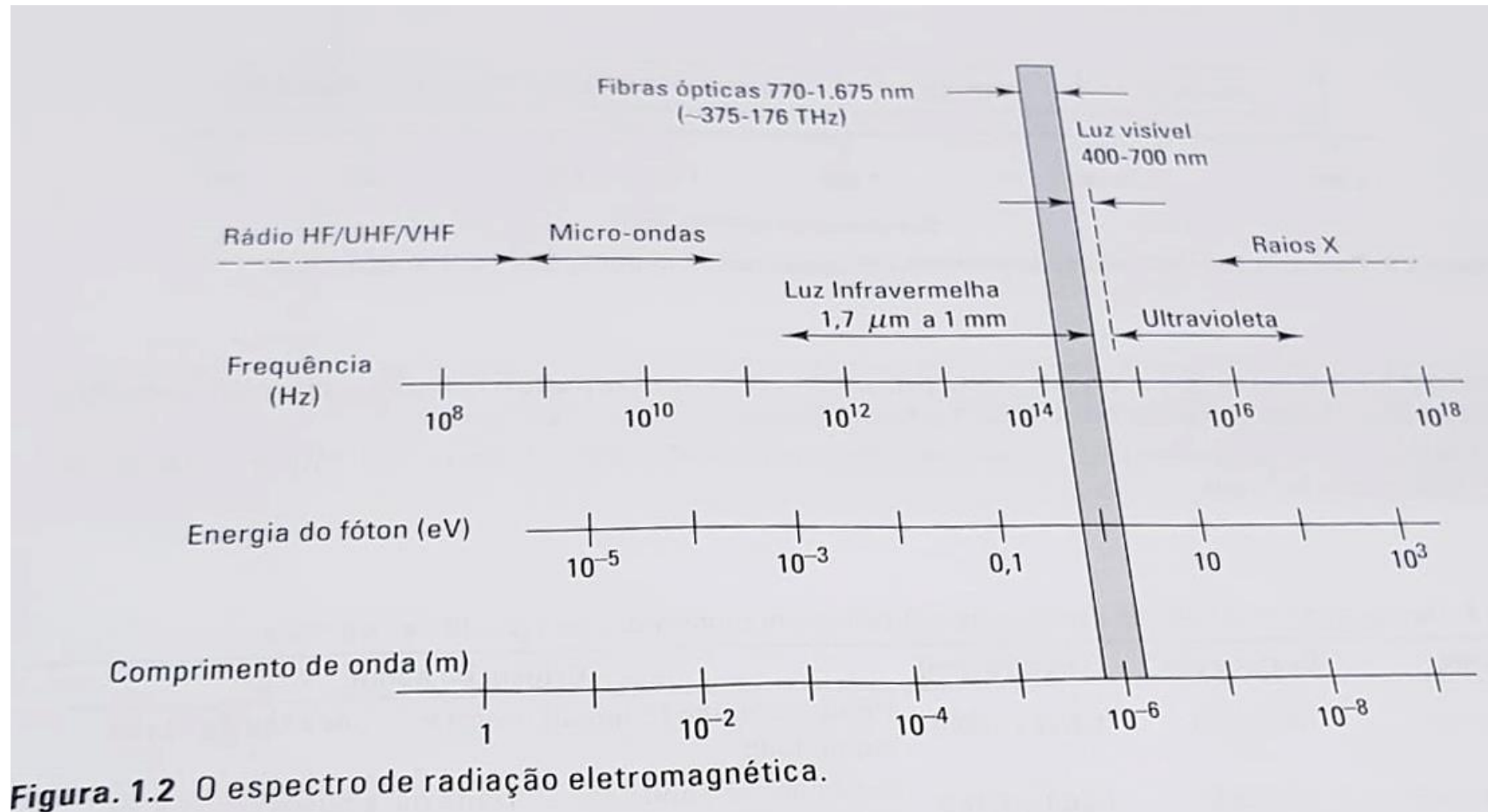


# Espectro eletromagnético

---

- A natureza fundamental de toda radiação contida nesse espectro é que elas podem ser vistas como ondas eletromagnéticas que viajam a velocidade da luz ( $c \cong 3 \times 10^8 m/s$  no vácuo);
- Note que a velocidade da luz  $s$  em um material é menor por um fator igual ao índice de refração  $n$  que a velocidade da luz  $c$  no vácuo;
- Por exemplo:  $n \approx 1,45$  para vidro de sílica, velocidade da luz nesse material  $s = 2 \times 10^8 m/s$

# Espectro eletromagnético



# Espectro eletromagnético

---

- As propriedades físicas das ondas das diferentes partes do espectro podem ser medidas de diversas maneiras inter-relacionadas, que são: comprimento de um período da onda, energia contida ou a frequência de oscilação da onda;
- Considerando que a transmissão de sinais elétricos tende a usar a frequência para designar as bandas de operação desses sinais, a comunicação óptica geralmente utiliza o comprimento de onda para designar a região espectral e a energia do fóton ou potência óptica, quando se discutem tópicos como a força do sinal ou o desempenho do componente eletro-óptico.

# Espectro eletromagnético

---





# Espectro eletromagnético

---

- Há três maneiras de medir as propriedades físicas de uma onda em várias regiões do espectro EM;
- A palavra LUZ é utilizada para descrição das radiações eletromagnéticas visíveis e também das regiões adjacentes (infravermelhas e ultravioletas próximas, pois se comportam da mesma forma);

# Espectro eletromagnético

---

- Quando caracterizamos a LUZ pelo comprimento de onda  $\lambda$  , e a frequência “f”, essas grandezas estão relacionadas por algumas equações simples:

$$c = \lambda f$$

Onde:

- $c$  é a velocidade da Luz no vácuo  $\approx 3,0 \times 10^8$  m/s
- $\lambda$  (lambda) – comprimento de onda
- $f$  – frequência de ciclos por segundo ou hertz (Hz)

# Espectro eletromagnético

---

- Exemplo: Se  $\lambda = 1 \times 10^{-6}$

$$f = \frac{3 \times 10^8}{1 \times 10^{-6}} = 3 \times 10^{14} = 300\text{THz}$$

Obs: *T* indica *Tera* que significa expoente elevado a potência 12.

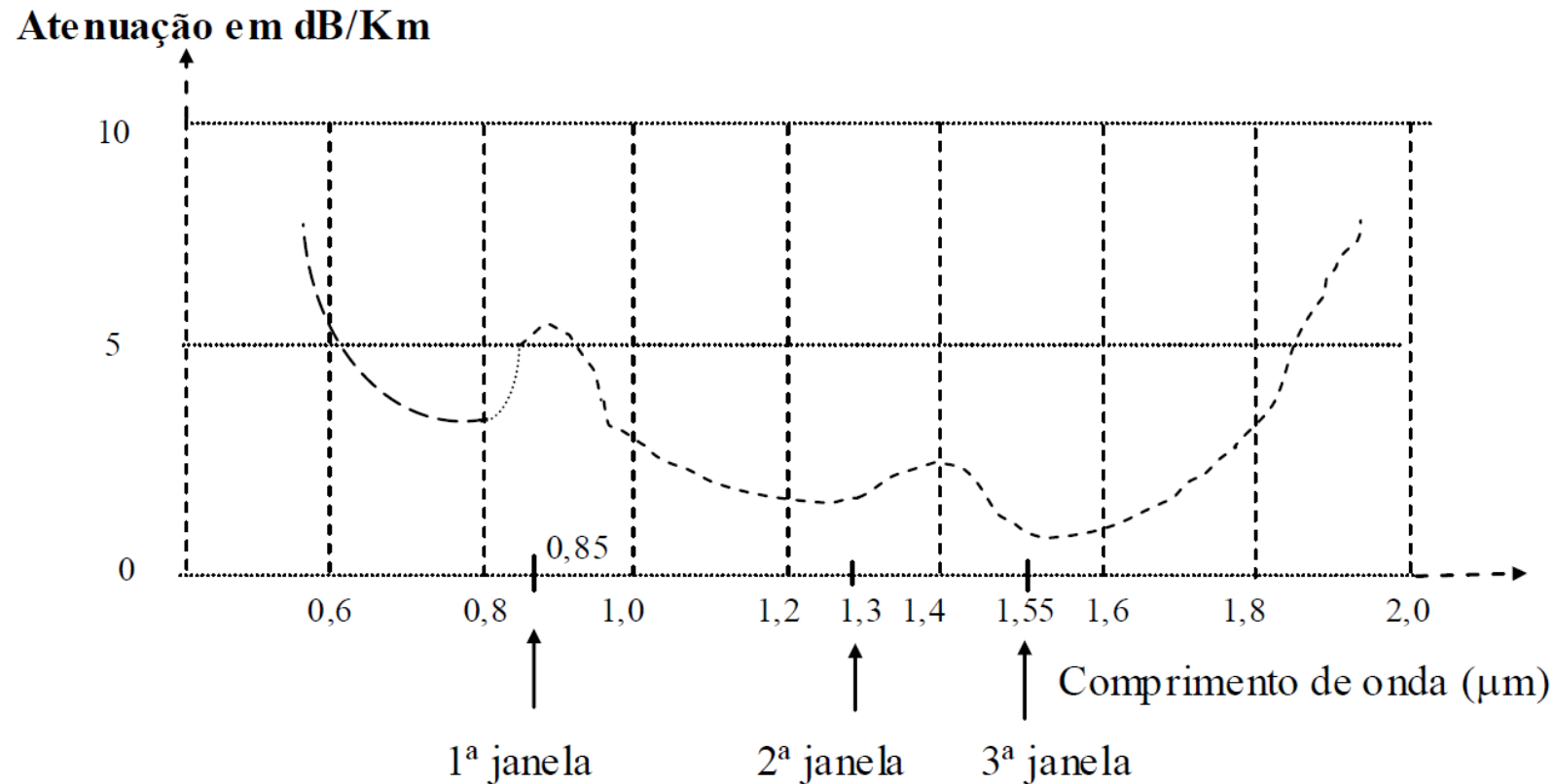
# Espectro eletromagnético

---

- As indicações da região próximo do infravermelho com comprimento de onda entre 800 e 1800 nm (ou 0,8 a 1,8  $\mu\text{m}$ ), são as que podem ser usadas para comunicações com Fibras Ópticas e estão mostradas na figura 3. As mesmas correspondem as chamadas JANELAS DE TRANSMISSÃO, 1ª, 2ª e 3ª janela respectivamente.

# Espectro eletromagnético

Figura 3 – Janelas de Transmissão



Fonte : Jorge Guedes Silveira, Ricardo Balbinot. Série Telecomunicações – Vol 1 , Apostila de Comunicações ópticas

# Comprimento de onda

- Num sentido bastante amplo uma onda é qualquer sinal que se transmite de um ponto a outro de um meio com velocidade definida. A distância entre dois máximos sucessivos de uma onda é denominada comprimento de onda  $\lambda$  (figura 2) e ele pode ser visto como o espaço percorrido durante um período  $T$ . Então a velocidade  $v$  da onda pode ser dada por:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

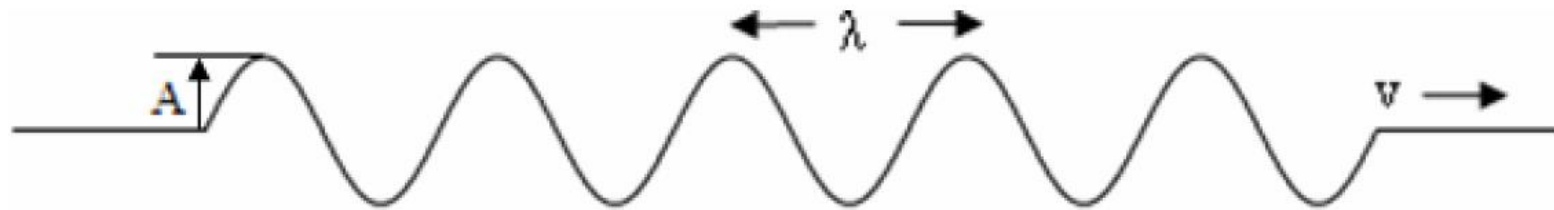


Figura 2 - Amplitude A, comprimento de onda  $\lambda$  e velocidade v de uma onda.

# Comprimento de onda

---

- A frequência é o inverso do período e é a mais importante característica da onda eletromagnética usada em comunicações. A frequência é expressa em ciclos por segundo ou Hz.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda}$$

- Quando a luz passa de um meio para outro, sua velocidade aumenta ou diminui devido às diferenças das estruturas atômicas dos dois materiais, ou de seus índices de refração.

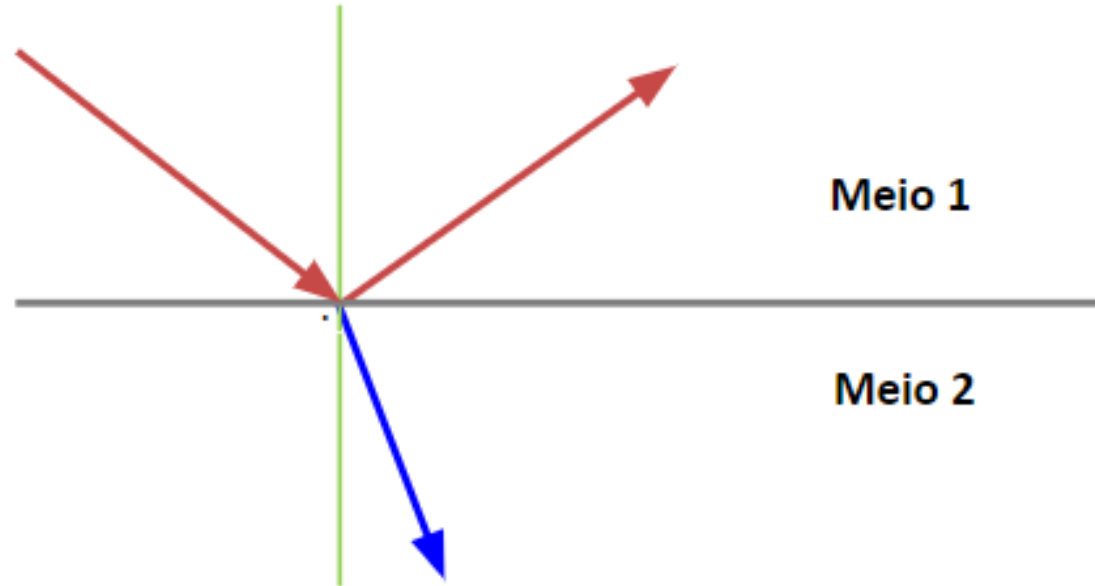
# Princípio de Propagação

---

- Quando a luz colide em uma superfície diferente da qual foi originada, dois fenômenos podem ser observados:

• **Reflexão**

• **Refração**

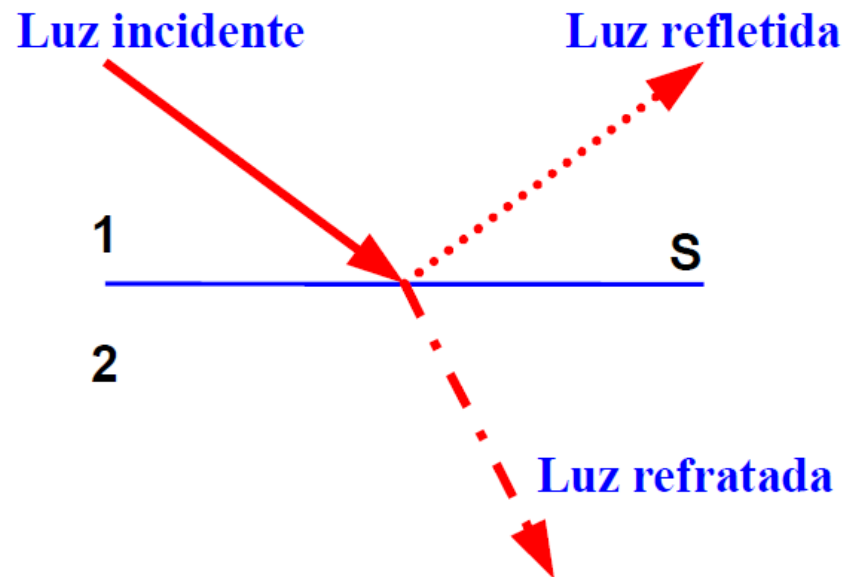




# Princípio de Propagação

---

- Definições
- Raio incidente: conforme observa-se na Fig.2.1, a radiação que se aproxima da superfície S é o raio incidente.

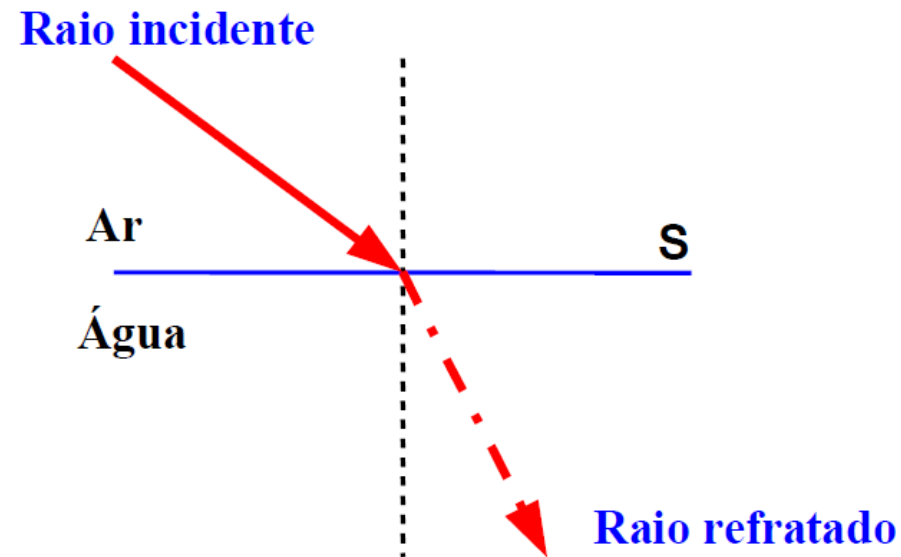


**Figura 2.1 Raio incidente, refratado e refletido**

# Princípio de Propagação

---

- Definições
- Raio refletido: raio incidente, ao atingir a superfície S, poderá refletir, e esta radiação refletida chama-se raio refletido.

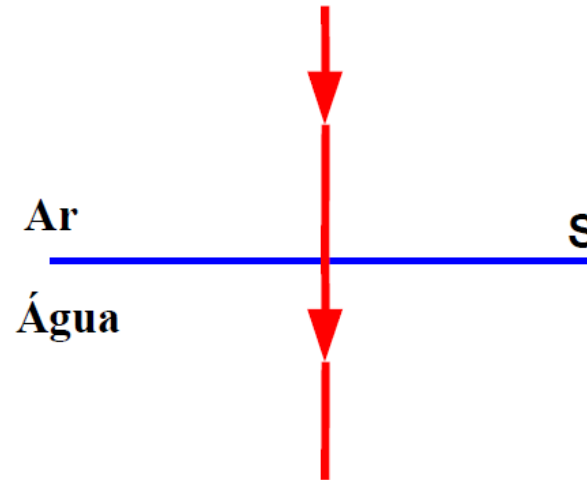


**Figura 2.2 - Ao penetrar na água, o raio refratado aproxima-se da normal ( $n_{\text{água}} > n_{\text{ar}}$ )**

# Princípio de Propagação

---

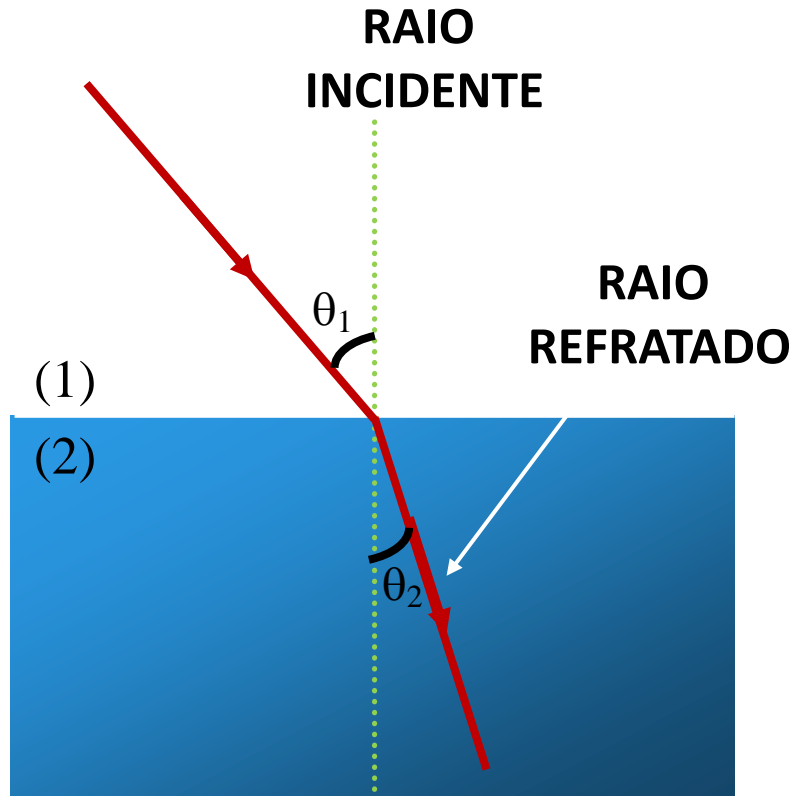
- Raio refratado: O raio incidente, ao invés de refletir na superfície S, poderá ultrapassar esta superfície de separação entre os meios 1 e 2. O raio que penetra no meio 2 chama-se raio refratado. Sendo oblíqua a incidência, a refração é acompanhada de mudança de direção, Fig.2.2, o que não ocorre se a incidência for perpendicular à superfície de separação, Fig.2.3.



**Figura 2.3 - Quando o raio incidente é perpendicular à superfície de separação, o mesmo não sofre mudança de direção**

# Princípio de Propagação

- REFRAÇÃO
- É a mudança de direção que a luz sofre quando passa de um meio para outro de densidade diferente, de acordo com a variação da velocidade luz.

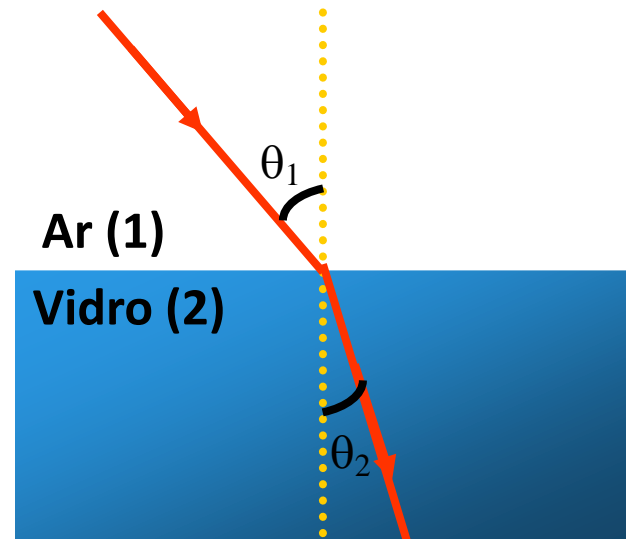


Analisando-se a figura conclui-se:

- ✓ Ângulo de incidência ( $\theta_1$ ) é o ângulo formado pelo raio incidente e a normal à superfície.
- ✓ Ângulo de refração ( $\theta_2$ ) é o ângulo formado pelo raio refratado e a normal à superfície.
- ✓ O ângulo de refração depende do ângulo de incidência e dos meios 1 e 2.

# Princípio de Propagação

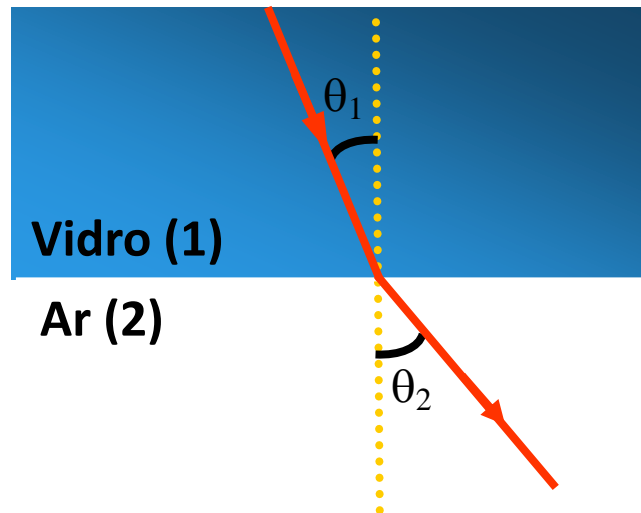
- REFRAÇÃO



$$\text{Sendo, } n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Quando a luz atravessa de um meio **MENOS** denso para um meio **MAIS** denso a luz tende a se **APROXIMAR** da normal à superfície.

$$n_1 < n_2 \Rightarrow \sin \theta_1 > \sin \theta_2 \Rightarrow \theta_1 > \theta_2$$

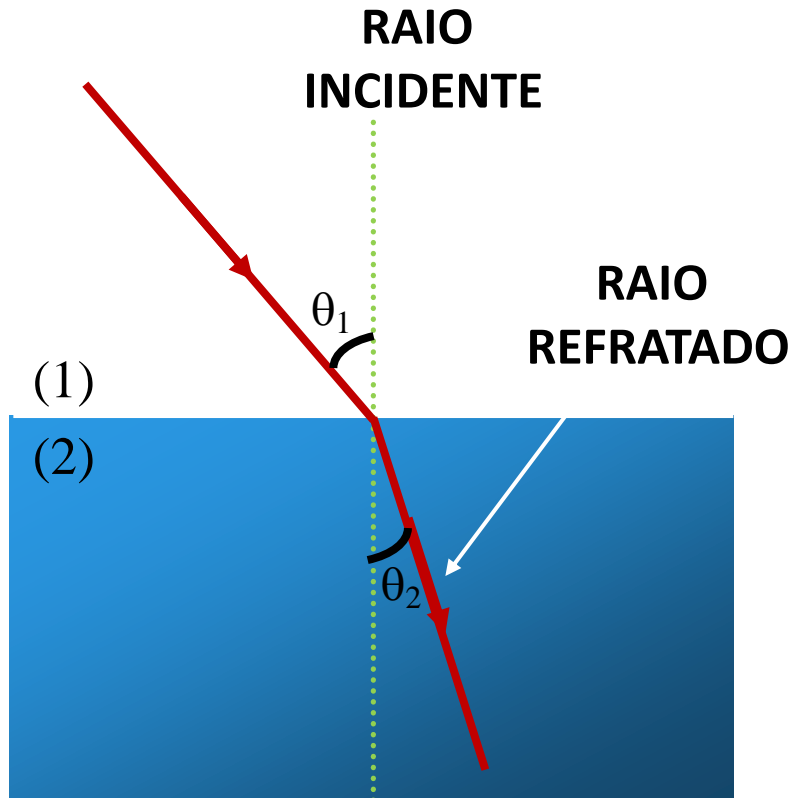


Quando a luz atravessa de um meio **MAIS** denso para um meio **MENOS** denso a luz tende a se **AFASTAR** da normal à superfície.

$$n_1 > n_2 \Rightarrow \sin \theta_1 < \sin \theta_2 \Rightarrow \theta_1 < \theta_2$$

# Princípio de Propagação

- REFRAÇÃO



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

# Índice de Refração

---

- O índice de refração é o parâmetro óptico que caracteriza qualquer meio transparente absoluto de um meio;
- Pode ser obtido experimentalmente e é definido como a relação entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio, matematicamente expresso como:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{v}$$

- Onde,  $c$  = velocidade da luz no vácuo e  $v$  = velocidade da luz para um comprimento de onda específico num certo meio.

# Índice de Refração

---

- Tratamos o índice de refração de um material de forma relativa, comparando-o com o do vácuo (ou ar), ou seja, quantas vezes o seu índice de refração é maior do que aquele do vácuo, e, portanto uma grandeza adimensional, que é derivado da expressão:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



# Princípio de propagação

---

- Da equação do índice de refração absoluto, nota-se que o índice de refração de um material é inversamente proporcional à velocidade de propagação da luz em seu interior, ou seja, quanto mais denso opticamente for o material, menor será a velocidade de propagação da luz;
- Ainda podemos relacionar o índice de refração, a velocidade de propagação e o comprimento da onda da luz:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

# Princípio de propagação

---

Meio	Índice de Refração	Velocidade da Luz (km/s)
Vácuo	1,0	300.000
Ar	1,0003	300.000
Água	1,33	225.000
Vidro	1,5	200.000
Diamante	2,0	150.000
Silício	3,4	88.000
Arseneto de Gálio	3,6	83.000

Tabela comparativa de índice de refração e velocidade da luz em diferentes meios

# Princípio de propagação

---

## Princípio da Propagação da Luz

### O princípio de Huygens e a reflexão

- As construções geométricas mostrando como a luz é refletida ou refratada baseiam-se no Princípio de Huygens (1690), que afirma: "Qualquer ponto ou partícula excitado pelo impacto da energia de uma onda de luz, torna-se uma nova fonte puntiforme de energia". Então, cada ponto sobre uma superfície refletora pode ser considerado como uma fonte secundária de radiação tendo a sua própria superfície de onda.

# Reflexão e refração na fronteira entre dois meios, reflexão interna total

## Princípio da Propagação da Luz

### O princípio de Huygens e a reflexão

- A lei fundamental sobre a reflexão afirma que os ângulos de incidência e reflexão medidos a partir de uma normal à superfície refletora são iguais e situam-se no mesmo plano denominado plano de incidência, conforme ilustrado abaixo.

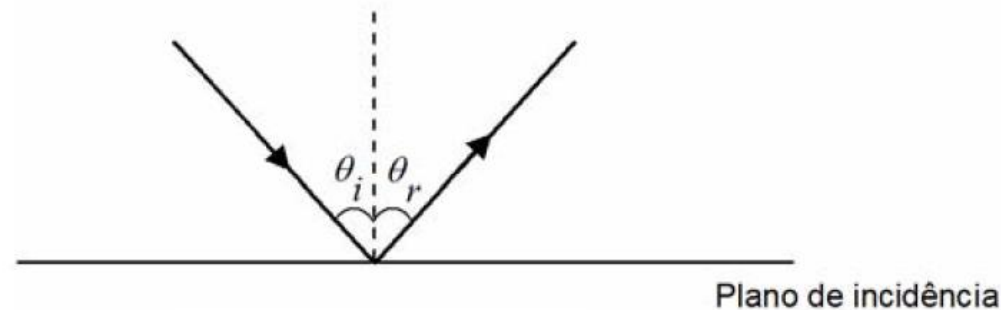
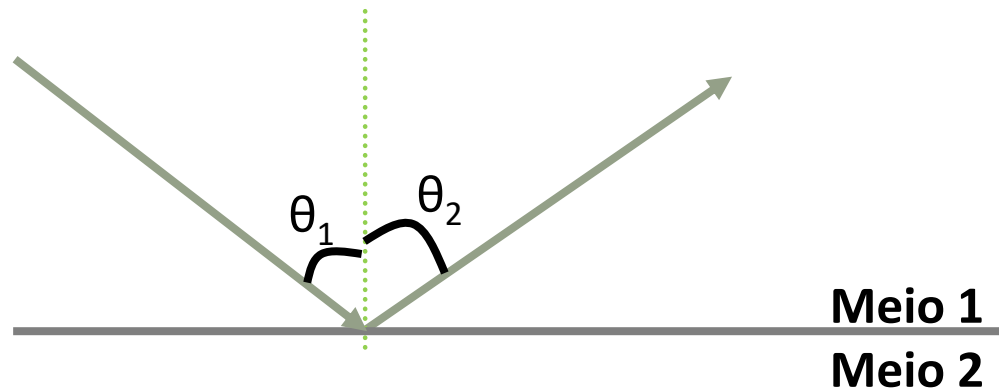


Figura - Reflexão.

# Reflexão

É a mudança de direção que a luz sofre quando se choca contra uma superfície plana.



Analisando-se a figura conclui-se:

- ✓ O ângulo de incidência ( $\theta_1$ ) é o ângulo formado pelo raio incidente e a normal a superfície;
- ✓ O ângulo de reflexão ( $\theta_2$ ) é igual ao ângulo de incidência ( $\theta_1$ );
- ✓ O ângulo de reflexão depende do ângulo de incidência e dos meios 1 e 2.

# Reflexão e refração na fronteira entre dois meios, reflexão interna total

## O princípio de Huygens e a reflexão

- Segundo a Lei da reflexão temos:

$$\theta_i = \theta_r$$

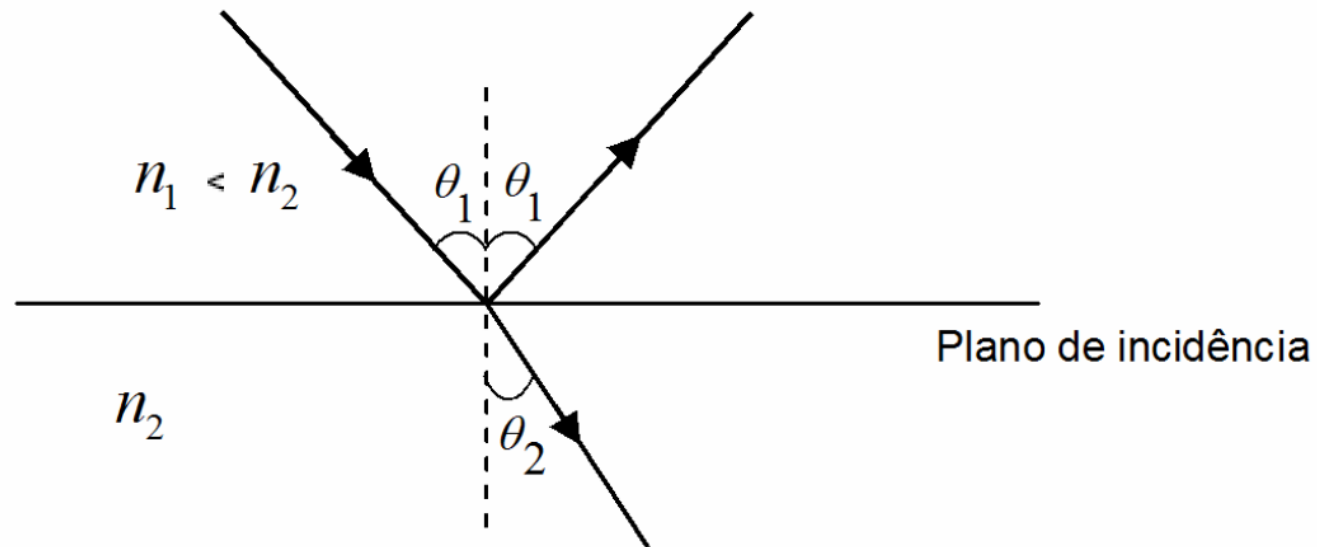


Figura – Refração.

# Reflexão e refração na fronteira entre dois meios, reflexão interna total

## O princípio de Huygens e a reflexão

- Segundo a Lei da reflexão temos:

$$\theta_i = \theta_r$$

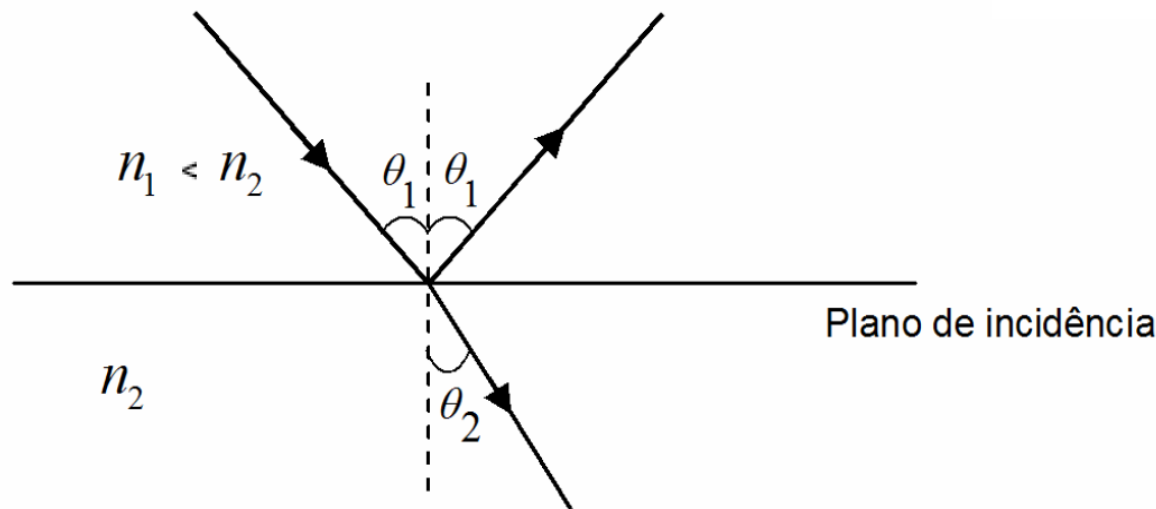


Figura – Refração.

Através do Princípio de Huygens também é possível afirmar que quando um raio de luz atinge uma superfície que separa dois meios com índices de refração diferentes, parte da luz é refletida e a outra penetra no meio sendo desviada ou refratada, assim como ilustrado.

# Reflexão e refração na fronteira entre dois meios, reflexão interna total

---

A relação entre os ângulos de incidência, refração e velocidades de propagação nos dois meios é dada pela Lei de Snell.

Segundo a Lei de *Snell*, quando um feixe luminoso ultrapassa de um meio para outro, existe uma razão constante entre o seno do ângulo de incidência ( $\theta_1$ ) e o seno do ângulo de refração ( $\theta_2$ ), definidos como :

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}, \text{ então } \frac{1}{v_1} \text{sen } \theta_1 = \frac{1}{v_2} \text{sen } \theta_2$$

$$\frac{c}{v_1} \text{sen } \theta_1 = \frac{c}{v_2} \text{sen } \theta_2, \text{ mas } n = \frac{c}{v}$$

finalmente:  $n_1 \text{sen } \theta_1 = n_2 \text{sen } \theta_2$



# Reflexão e refração na fronteira entre dois meios, reflexão interna total

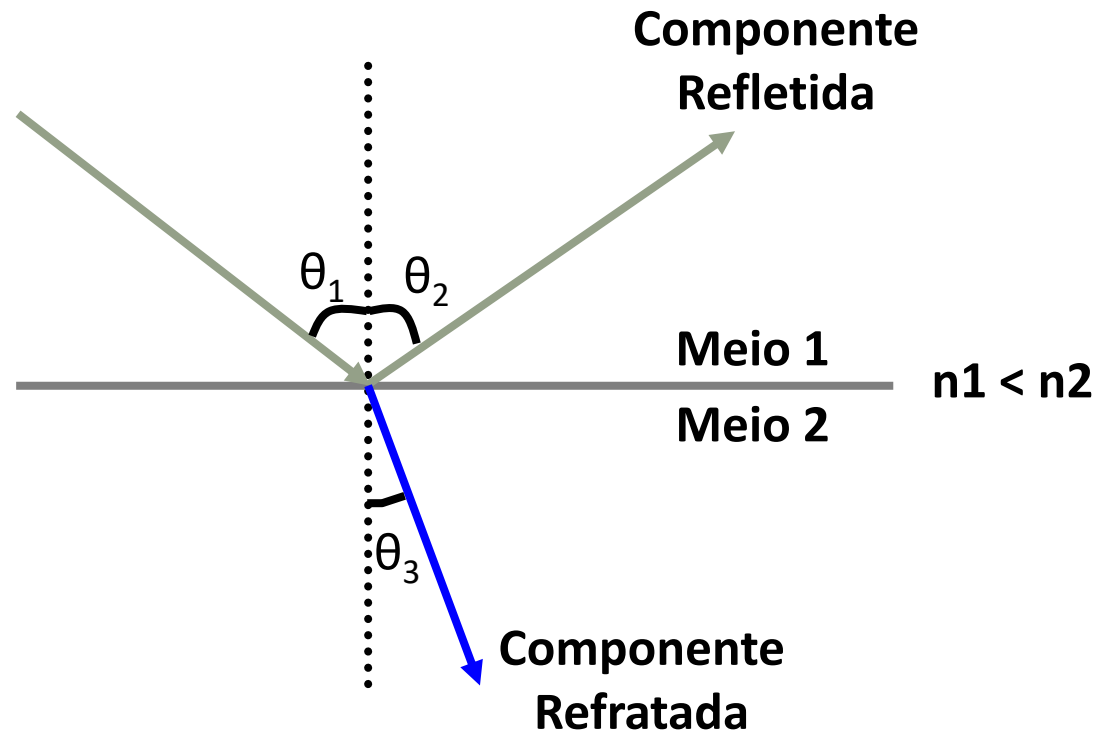
---

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$$

- Onde,  $\theta_1$  é o ângulo do raio incidente com relação à normal à superfície,  $\theta_2$  é o ângulo do raio refratado,  $n_1$  é o índice de refração do meio 1 de incidência, e  $n_2$  é o índice de refração do meio 2.

# Lei de Snell

Quando um raio luminoso incidir em uma superfície que separa dois meios com índice de refração diferentes (p. ex.  $n_1$  e  $n_2$ ), este será dividido em duas componentes, uma irá **REFRATAR** e a outra **REFLETIR**.



# Reflexão e refração na fronteira entre dois meios, reflexão interna total

---

- Esta expressão mostra que a relação entre as velocidades das ondas em meios com índices de refração diferentes é proporcional à relação entre os senos dos ângulos dos raios incidentes e refratados.
- Assim, se o ângulo de incidência  $\theta_1$  for zero,  $\theta_2$  também será zero, ou seja, a luz incidindo normalmente sobre uma superfície plana não será refratada.
- Por outro lado, se a luz incide obliquamente sobre um sólido opticamente mais denso, ou com maior índice de refração, o raio refratado se aproximará da normal e passará a se propagar com uma velocidade menor do que aquela em que vinha se propagando no outro meio.

# Reflexão e refração na fronteira entre dois meios, reflexão interna total

---

## Ângulo crítico e reflexão total

- De acordo com a equação

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

- se  $n_1$  for maior que  $n_2$  a relação  $n_2 / n_1$  será sempre menor do que 1 e, conseqüentemente,  $\theta_2$  será sempre maior que  $\theta_1$  , ou seja, sempre haverá refração com o raio refratado aproximando-se da normal.
- Por outro lado, se o meio de incidência do raio de luz tiver um índice de refração  $n_1$  menor que  $n_2$  , a relação  $n_2 / n_1$  será sempre maior do que 1,0 e, o ângulo refratado, será sempre maior que o ângulo incidente.

# Reflexão e refração na fronteira entre dois meios, reflexão interna total

---

## Ângulo crítico e reflexão total

- Portanto para que haja refração, há necessidade que o ângulo  $\theta_1$  seja tal que leve  $\theta_2$  ser menor do que  $90^\circ$ , ou seja, que  $\sin \theta_2 < 1$ .
- Nesse caso, existe uma situação limite para a refração onde um raio incidente com um determinado ângulo menor que  $90^\circ$ , conhecido como ângulo crítico  $\theta_c$ , implicando num raio refratado que se propaga paralelamente à superfície entre os dois meios dielétricos. **Então de acordo com a lei de Snell:**

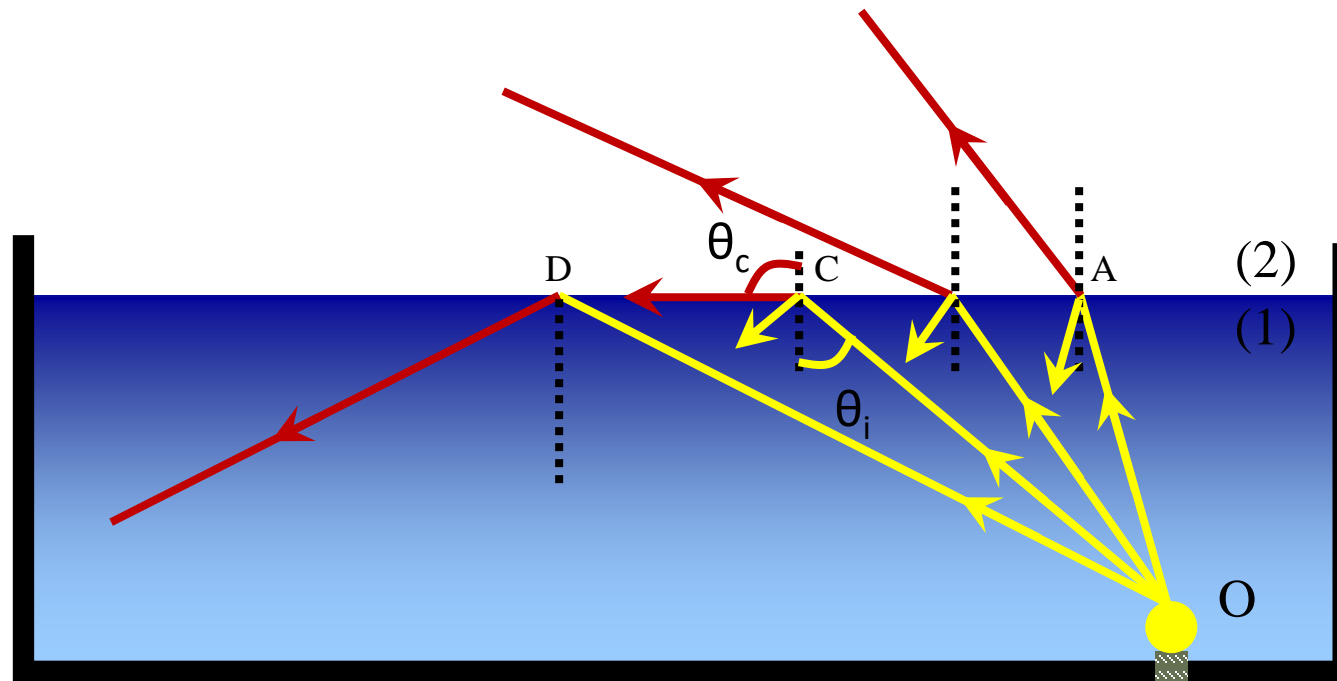
$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

- Qualquer raio incidente com um ângulo superior ao ângulo crítico não será mais refratado, mas refletido totalmente. Esse efeito de reflexão interna total é o mecanismo básico de propagação da luz em fibras ópticas.

# Ângulo Crítico

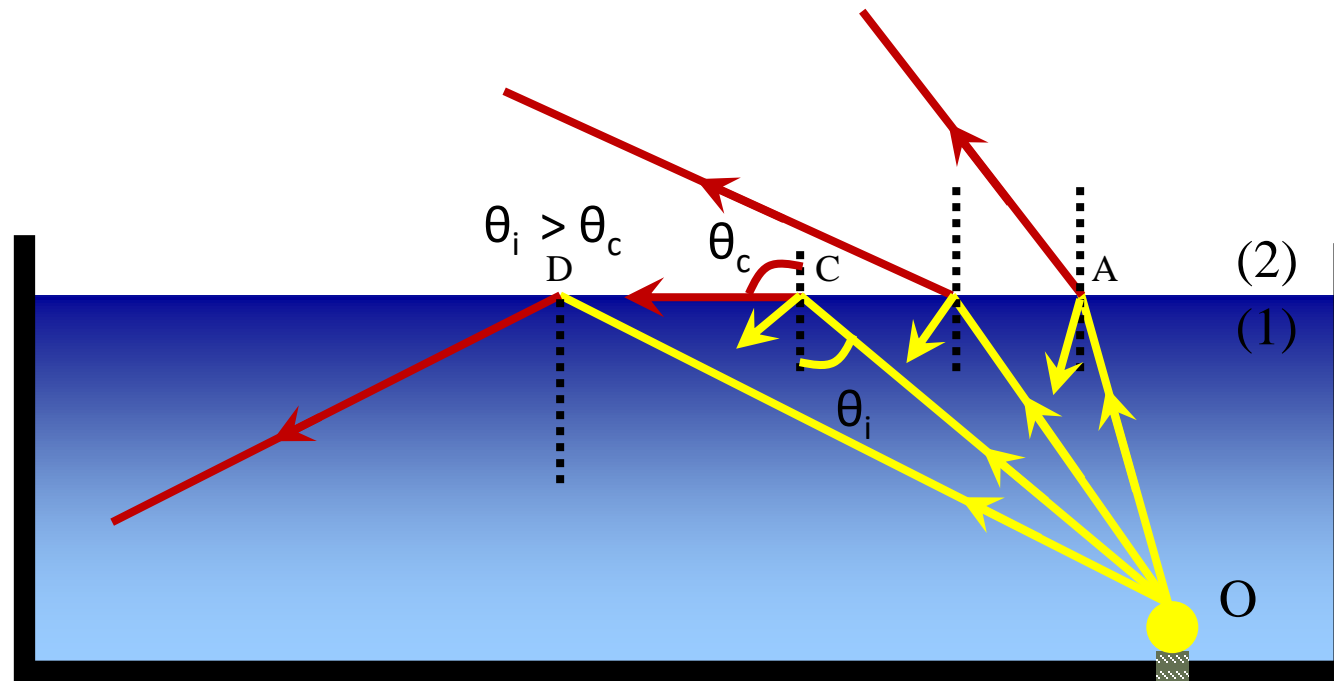
Aumentando o ângulo de incidência  $\theta_i$ , o ângulo de refração  $\theta_r$  se aproxima de  $90^\circ$ .

Ângulo crítico é o ângulo de incidência que produz um ângulo de refração de  $90^\circ$  em relação a normal à superfície.



# Reflexão Total da Luz

Se o ângulo de incidência  $\theta_i$  for maior que o ângulo crítico  $\theta_c$ , haverá reflexão total.



Para ocorrer reflexão total é necessário que duas condições sejam satisfeitas:

- ✓ O ângulo de incidência deve ser maior que o ângulo crítico.
- ✓ O sentido de propagação da luz deve ser do meio mais denso para o meio menos denso, obrigatoriamente.

# Cálculo do Ângulo Crítico

---

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$$

$$\theta_2 = 90^\circ$$

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} 90^\circ$$

$$\operatorname{sen} \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Para ângulos de incidência maiores que o CRÍTICO ocorre a REFLEXÃO TOTAL.



# Reflexão e refração na fronteira entre dois meios, reflexão interna total

---



# Informações

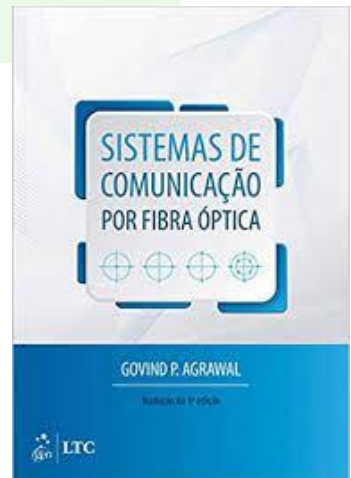
---

Este material de slides foi escrito, para esta disciplina, por meio de colaboração dos professores: Prof. Dr. Valdez Aragão de Almeida Filho e profa. Dra. Cindy Stella Fernandes.

# Bibliografia

## Bibliografia Básica

- RIBEIRO, José Antônio Justino. **Comunicações ópticas**. 4. ed. São Paulo: Érica, 2009. 454 p. ISBN: 9788571949652.
- KEISER, Gerd. **Comunicações por fibras ópticas**. Porto Alegre: Bookman, 2014. xxiii, 670 p. ISBN:9788580553970.
- AGRAWAL, G. P.: **Fiber-Optic Communication Systems**. John Wiley & Sons, 2002.
- TRONCO, T. R., AVILA, L.F.: **Fundamentos de Comunicações Ópticas**. 1ª Edição, Abril de 2007.



# Contato

---

## Contato Aluno/professor

- **SIGAA (Oficial)**
- Dias de aulas
- E-mails para contato: cindy.fernandes@unifesspa.edu.br (Oficial Unifesspa)  
cindy.fernandes@gmail.com (Não Oficial - pessoal)
- WhatsApp: (91) 98256 – 9649 (Não Oficial)