

# Sistemas de Comunicações Ópticas

# Sumário

- 1. Introdução às Fibras Ópticas
- 2. Fundamentos Teóricos e Conceitos Básicos
- 3. Tipos de Fibras Ópticas
- 4. Características de Transmissão das Fibras Ópticas
- 5. Cabos de Fibras Ópticas
- 6. Emissores Ópticos
- 7. Detectores Ópticos
- 8. Conexões e Emendas de Fibras Ópticas
- 9. Acessórios e Ferramentas
- 10. Interfaces Optoeletrônicas e Aplicações

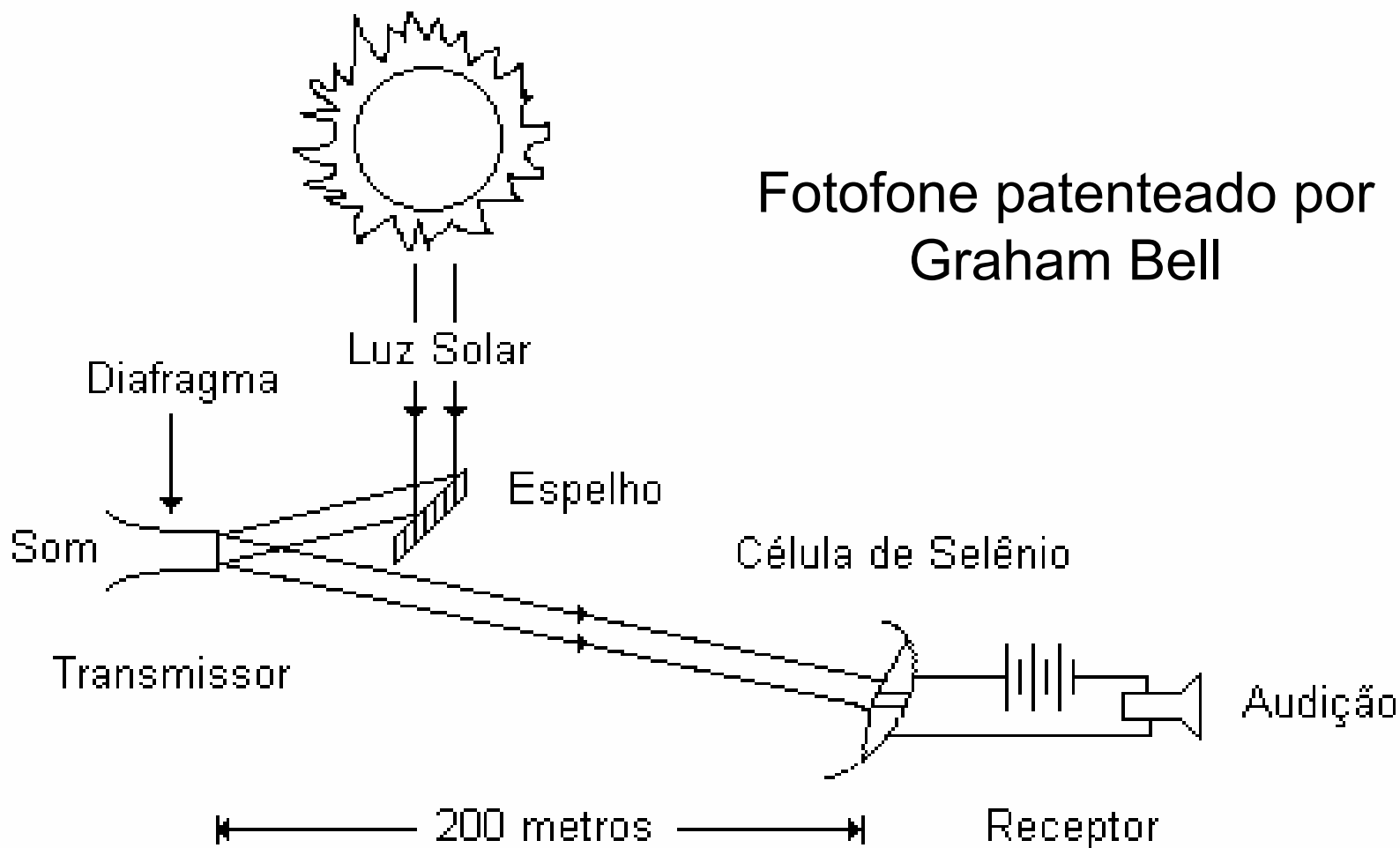
# Sumário

- **Apêndice A**
  - ➔ Dedução da Fórmula de Abertura Numérica
- **Apêndice B**
  - ➔ Característica Técnica de Emissor e Detector Óptico
- **Apêndice C**
  - ➔ Acopladores Ópticos
- **Apêndice D**
  - ➔ Amplificadores Ópticos a Fibra
- **Apêndice E**
  - ➔ Comparação entre Sistema Óptico e via Satélite
- **Apêndice F**
  - ➔ Gráfico Comparativo da Dispersão Cromática entre as fibras Matched Cladding e DS

# 1. Introdução

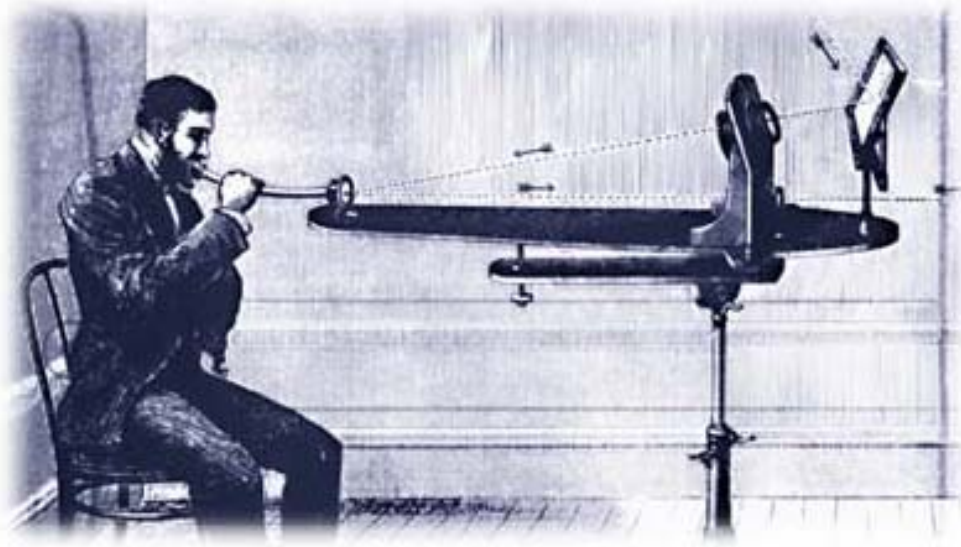
- **Transmissão de informações pela luz: evolução natural das transmissões via rádio.**
- **Em 1870 John Tyndall demonstra ser possível guiar a luz por um caminho.**
- **Em 1880 Graham Bell cria o fotofone e consegue transmitir informações a uma distância de 200 metros.**

# 1. Introdução

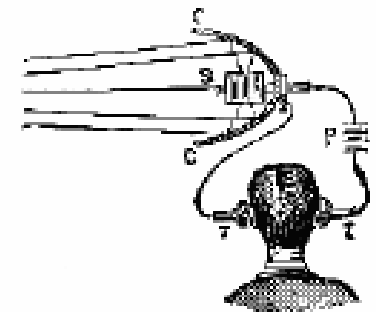
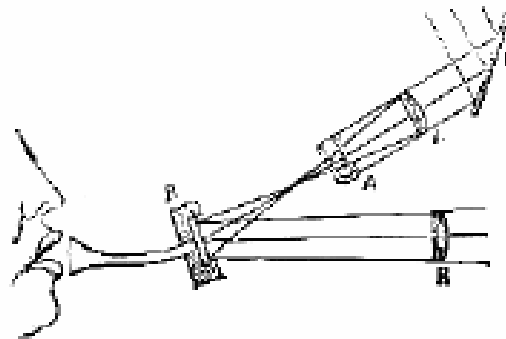


# 1. Introdução

Innocencio Henrique D'Amato, prof



Fotofone patenteado  
por Graham Bell



# 1. Introdução

- Em 1950 surgiram os primeiros bastões de vidro destinados a transmissão de imagens.
- Em 1960 foi criado o primeiro LASER  
*(light amplification by stimulated emission of radiation)*
- Em 1962 começaram as experiências com os LASER's de semicondutores.
- Em 1966 surgiram as primeiras fibras ópticas: atenuação de 1000 dB/Km.

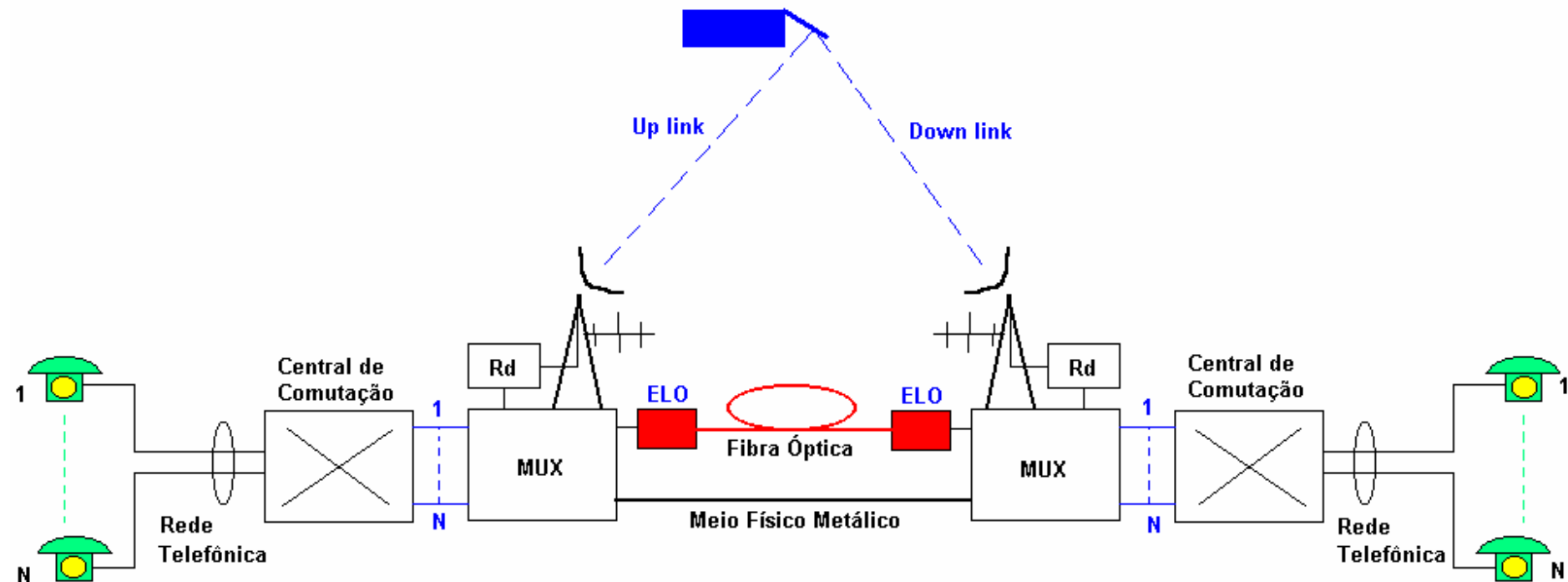
# 1. Introdução

- Em 1970 as fibras apresentavam atenuação da ordem de 20 dB/Km.
- Em 1972 as fibras apresentavam, em laboratórios, perdas de 4 dB/Km.
- Em 1975 iniciou-se a produção comercial de fibras ópticas.
- Hoje em dia as fibras apresentam perdas da ordem de 0,2 dB/Km.



# 1. Introdução

## Sistema Básico de Comunicação



# 1. Introdução

## Sistema Básico de Comunicação Óptica



**ELO – Equipamento de Linha Óptica**

# 1. Introdução

## ➤ Vantagens das Fibras Ópticas sobre os meios convencionais de comunicação

### ➔ Baixa atenuação:

- ➔ Possibilita maiores distâncias sem repetidores ou regeneradores de sinal, representando menores investimentos no sistema e de gastos com a manutenção dos repetidores;
- ➔ A atenuação independe da frequência do sinal transmitido, o que não ocorre com os cabos convencionais.

# 1. Introdução

## ➤ Vantagens das Fibras Ópticas sobre os meios convencionais de comunicação

### ➔ Largura de Banda:

- Elevada largura de Banda, permite futuras expansões do sistema, com maior capacidade de transmissão, superando em muito os sistemas de transmissão por cabos metálicos;

Meio de Transmissão	Taxa (Mbps) de Transmissão	Canais de Voz	Distância entre Repetidores (km)
Coaxial	3,1	48	1 a 2
	6,3	96	
	45	672	
	90	1344	
Fibra Óptica	90	1344	6 a 15 (multimodo) 30 a 40 (monomodo)
	180	2688	
	435	6048	
	565	8064	
	1700	24192	

\* fonte: Fibras Ópticas Érica

# 1. Introdução

## ➤ Vantagens das Fibras Ópticas sobre os meios convencionais de comunicação

- ➔ Imunidade à interferência eletromagnética (EMI):
  - Constituída de material dielétrico
- ➔ Baixo Peso
  - Peso de aproximadamente 30g/km se comparada com cabo coaxial, o cabo óptico possui um peso da ordem de 10 vezes menor, que viabiliza instalações em automóveis e aviões;
- ➔ Pequena dimensão
  - O diâmetro de uma fibra óptica é da ordem de 125 $\mu$ m, que possibilita a fabricação de cabos compactos. Atrativo para aplicações onde o espaço é limitado. Ex: duto/sub-dutos.
- ➔ Sigilo
  - Impossibilidade de se retirar ou colocar sinais ópticos sem prejudicar o sistema, que o torna altamente sigiloso e seguro.

# 1. Introdução

## ➤ **Vantagens das Fibras Ópticas sobre os meios convencionais de comunicação**

### ➔ **Isolação Elétrica**

- Devido às F.O. serem de dielétricas (vidro ou plástico), isolam eletricamente os terminais de comunicação, eliminando o uso de dispositivos de proteção contra surtos de faiscamentos (centelhadores), possibilitando sua utilização em áreas de atmosfera explosiva.

### ➔ **Aplicações das F.O.**

- Sistemas de comunicações de curtas e longas distâncias, principalmente aqueles sistemas que necessitam de confiabilidade e qualidade (QoS).
- Aplicações em Sistemas de comunicação de dados, voz e imagem:
  - LAN, WAN e MAN
  - CATV
  - Telefonia
- Outras aplicações:
  - Militares
  - Médicas
  - Aviões, navios e automóveis

# 1. Introdução

## ➤ Desvantagens das Fibras Ópticas

- ➔ Acoplamento e Emenda da F.O.
  - Cuidados especiais devem ser tomados quanto à emenda das Fibras Ópticas, para se evitar perdas desnecessárias de potência óptica.
  - Requerem a utilização de equipamentos e ferramentas de alta tecnologia e precisão e alguns fatores objeto de estudo posterior.
- ➔ Derivações Limitadas
  - Existem limitações quanto a quantidade de derivações passivas, pois os componentes (acopladores) utilizados para este fim atenuam consideravelmente o sinal.
- ➔ Padrão dos Sistemas Ópticos
  - Encontra-se em fase de padronização, pois trata-se de uma tecnologia em evolução e com grande quantidade de aplicações inexploradas.
- ➔ Fragilidade
  - Quando manuseada sem proteção mecânica (revestimento) esta sujeita a quebra com mais facilidade que os meios de comunicação (metálicos) convencionais.

## 2. Fundamentos Teóricos

### ➤ Classificação das ondas quanto a direção de propagação:

- ➔ Ondas unidimensionais: deslocam-se apenas em uma direção.
  - ➡ Exemplo: São como as ondas em uma corda, com uma das extremidades presa.
- ➔ Ondas bidirecionais
  - ➡ Deslocam-se em duas direções.
  - ➡ São como as ondas na superfície de um lago.
- ➔ Ondas tridimensionais: deslocam-se em todas as direções
  - ➡ São como as ondas sonoras.



## 2. Fundamentos Teóricos

### ➤ Classificação das ondas quanto ao tipo de propagação:

- ➔ Ondas longitudinais: as partículas do meio se deslocam na mesma direção de propagação da onda.
  - ➡ Como as pedras do dominó caindo ou as ondas sonoras.
- ➔ Ondas transversais: as partículas do meio se deslocam perpendicularmente em relação a direção de propagação da onda.
  - ➡ Como as ondas na superfície de um lago.

## 2. Fundamentos Teóricos

- **Importante:** nem sempre as ondas indicam deslocamento de partículas. É o caso da luz.
- **A luz é uma onda eletromagnética de alta frequência.**
- **Grandezas que caracterizam uma onda:**
  - ➔ Velocidade de propagação  $\rightarrow v(m)$
  - ➔ Frequência  $\rightarrow f(Hz)$
  - ➔ Período  $\rightarrow T(s)$
  - ➔ Comprimento de onda  $\rightarrow \lambda(m)$

$$\lambda_{(m)} = \frac{v_{(m/s)}}{f_{(Hz)}} \quad e \quad T_{(s)} = \frac{1}{f_{(Hz)}}$$

## 2. Fundamentos Teóricos

### ➤ Velocidade de Propagação:

➔ É a velocidade de propagação da energia no meio onde a onda se desloca.

➔ No vácuo (*luz*) :  $C = 300.000 \text{ km.s}^{-1}$

### ➤ Freqüência:

➔ É o número de vezes que a perturbação no meio se repete em um intervalo de tempo.

➔ Se esse intervalo for de *1 segundo* a freqüência será dada em *Hertz (hz)*.

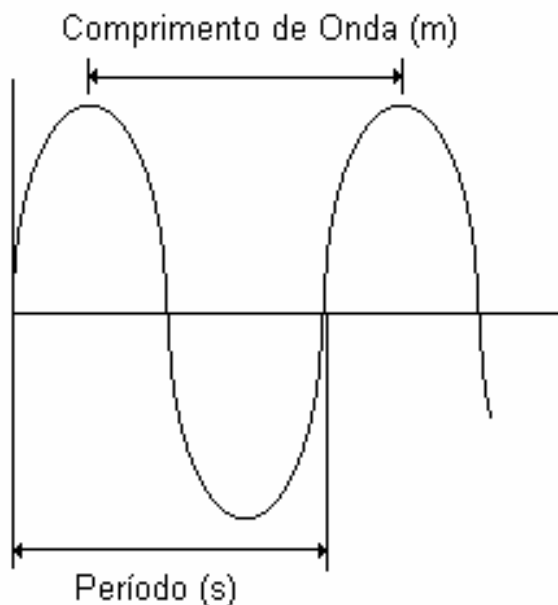
## 2. Fundamentos Teóricos

### ➤ Período:

➔ É o tempo gasto para que a onda repita seu ciclo.

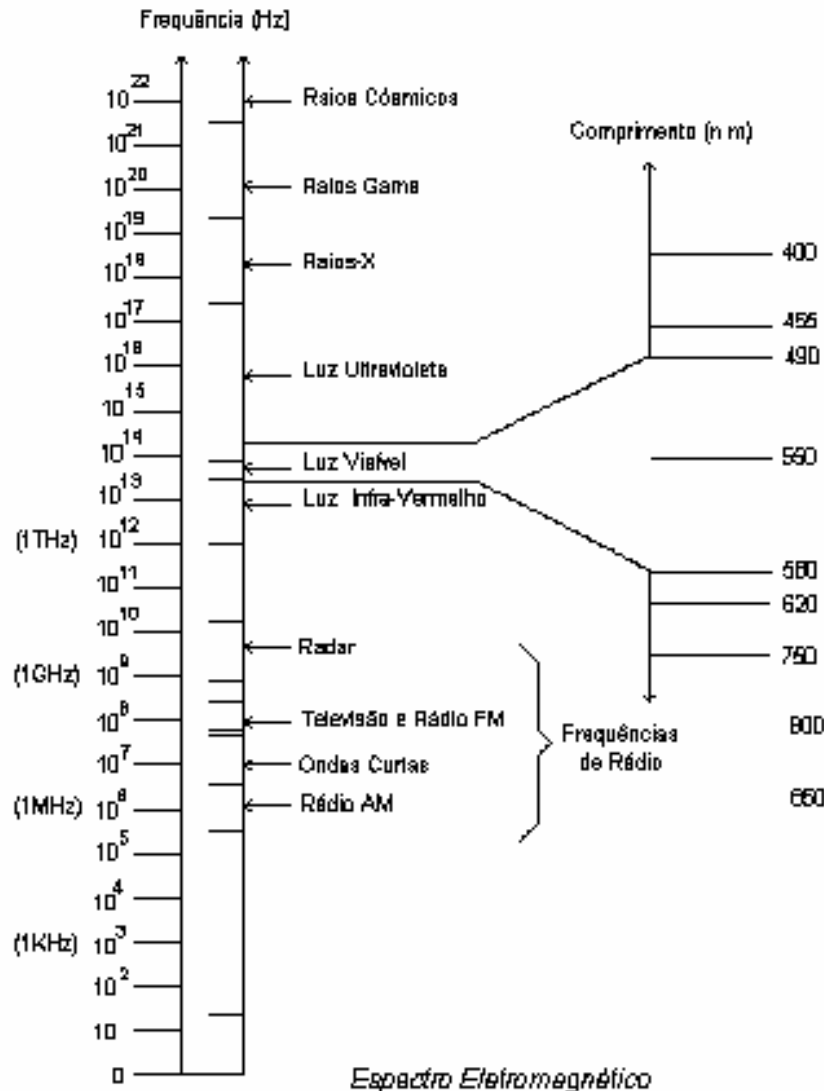
### ➤ Comprimento de onda ( $\lambda$ ):

➔ É a distância entre dois picos (ou dois vales) de uma onda.



# 2. Fundamentos Teóricos

Innocencio Henrique D'Amato, prof

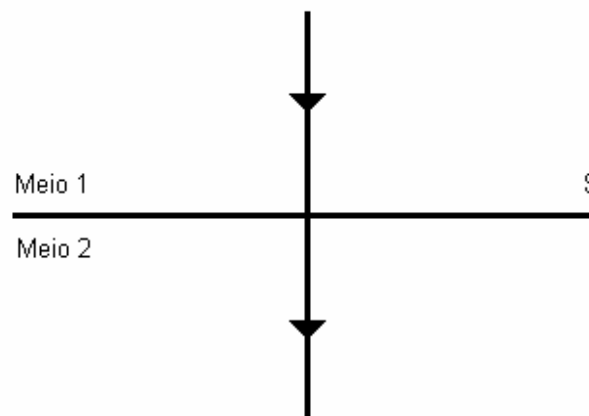
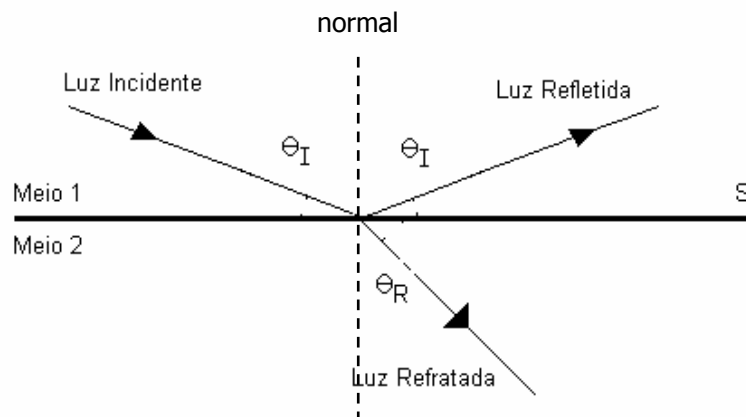


Espectro Eletromagnético

## 2. Fundamentos Teóricos

### ➤ Refração

- ➔ Ocorre sempre que a luz muda de um meio para outro.
- ➔ Parte da luz pode ser refletida de volta ao primeiro meio.
- ➔ Se o ângulo de incidência for de  $0^\circ$  com a normal não ocorre reflexão no raio.



## 2. Fundamentos Teóricos

### ➤ Índice de Refração ( $n$ )

➔ É a relação entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio.

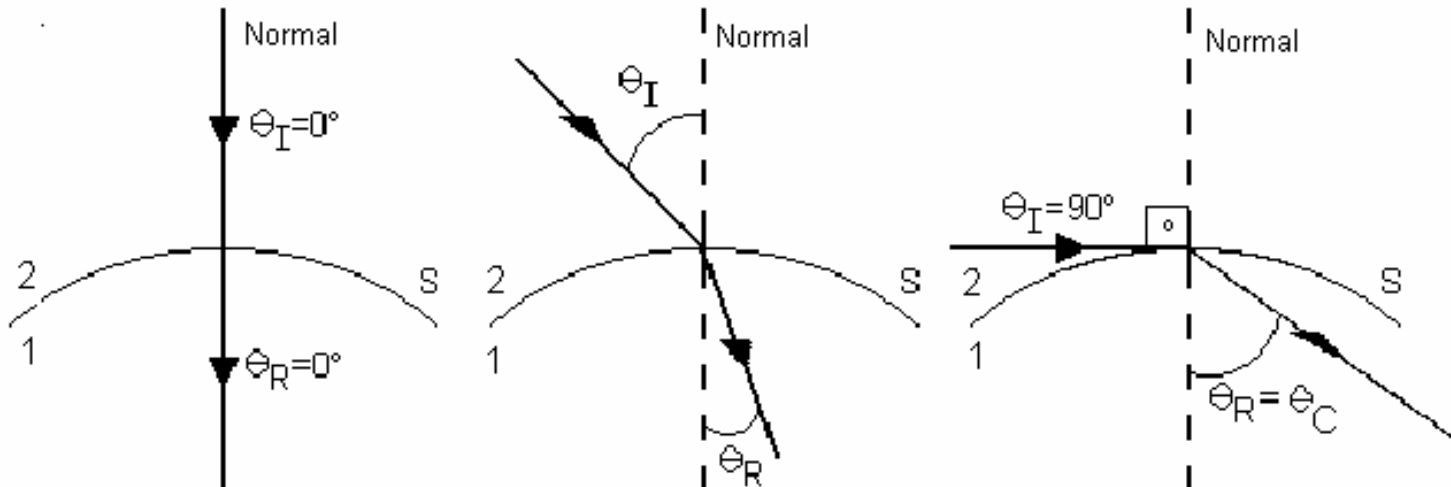
$$n = \frac{C}{v}, \text{então}$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{C}{n \cdot f}$$

Meio	Índice de Refração	Velocidade da luz (Km/s)
Vácuo	1,0	300.000
Ar	1,0003	300.000
Água	1,33	250.000
Vidro	1,5 a 1,9	200.000
Diamante	2,0	150.000

## 2. Fundamentos Teóricos

- **Reflexão Total e Ângulo Limite ou Crítico**
  - ➔ Dois meios  $1$  e  $2$ , com  $n_1 > n_2$ .
  - ➔ Um feixe de luz partindo de  $2$  para  $1$ .
  - ➔ Variando-se o ângulo de incidência ( $\theta_I$ ) na superfície de separação destes meios ( $S$ ), teremos:



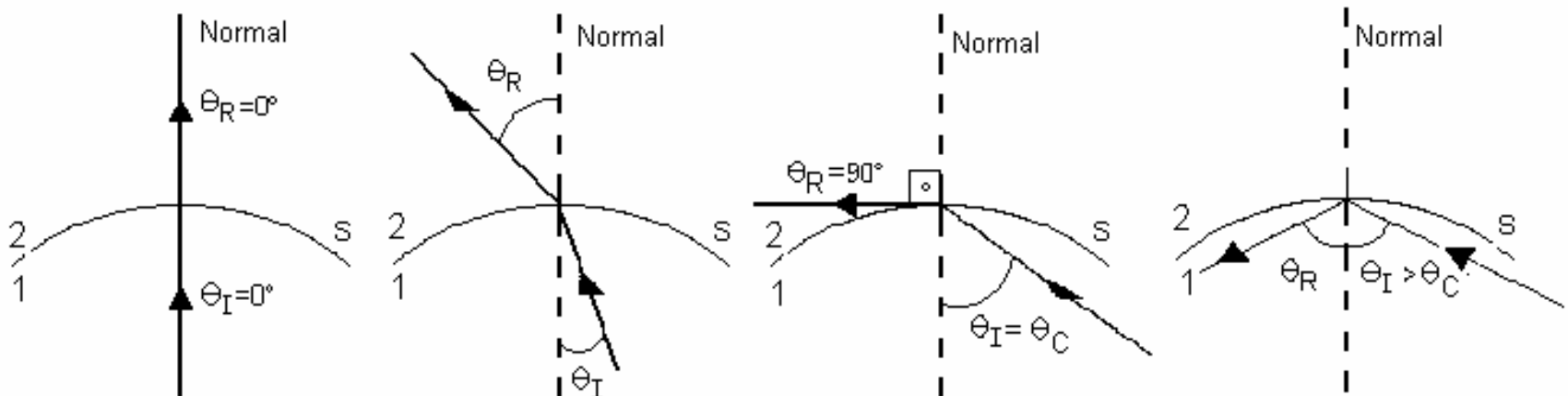


## 2. Fundamentos Teóricos

### ➤ Considerando:

- ➔ Os mesmos dois meios 1 e 2 da situação anterior ( $n_1 > n_2$ ).
- ➔ O mesmo feixe de luz incidindo na superfície de separação destes meios.
- ➔ O feixe de luz parte, agora, do meio 1 para o meio 2.

### ➤ Variando o ângulo de incidência teremos:



## 2. Fundamentos Teóricos

- Quando o ângulo de incidência “ $\theta_I$ ” assume qualquer valor maior do que um valor máximo “ $\theta_C$ ”, todo o feixe de luz é refletido para o meio *1*.
- Esse valor máximo “ $\theta_C$ ” é conhecido como ângulo limite ou ângulo crítico “ $\theta_C$ ”.

# 2. Fundamentos Teóricos

## ➤ Lei de Snell

➔ A lei de Snell diz que, há uma razão constante entre o "seno do ângulo de incidência  $\theta_I$  e o seno do ângulo de refração  $\theta_R$ ", ou seja:

$$\frac{\text{sen } \theta_I}{\text{sen } \theta_R} = \frac{n_2}{n_1} \quad \Leftrightarrow \quad n_1 \cdot \text{sen } \theta_I = n_2 \cdot \text{sen } \theta_R$$

➔ Ângulo Crítico ( $\theta_R = 90^\circ \Rightarrow \theta_I = \theta_C$ )

➔ Deduzido a partir da Lei de Snell como:

$$\theta_C = \arcsen \frac{n_2}{n_1}$$

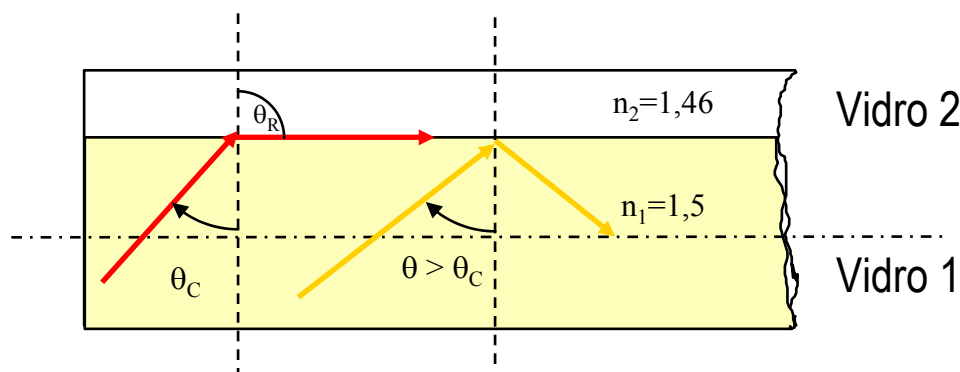
# 2. Fundamentos Teóricos

## ➤ Propagação da Luz

➔ Supondo a seguinte situação: duas camadas de vidro sobrepostas, sendo camada 1 com índice de refração  $n_1=1,50$  e a outra camada 2, possui índice de refração  $n_2=1,46$ , pela lei de Snell obtemos o ângulo crítico  $\theta_C$ :

$$\theta_C = \arcsen \frac{n_2}{n_1} = \arcsen \frac{1,46}{1,50} = \arcsen(0.973)$$

$$\theta_C = 76,7^\circ$$

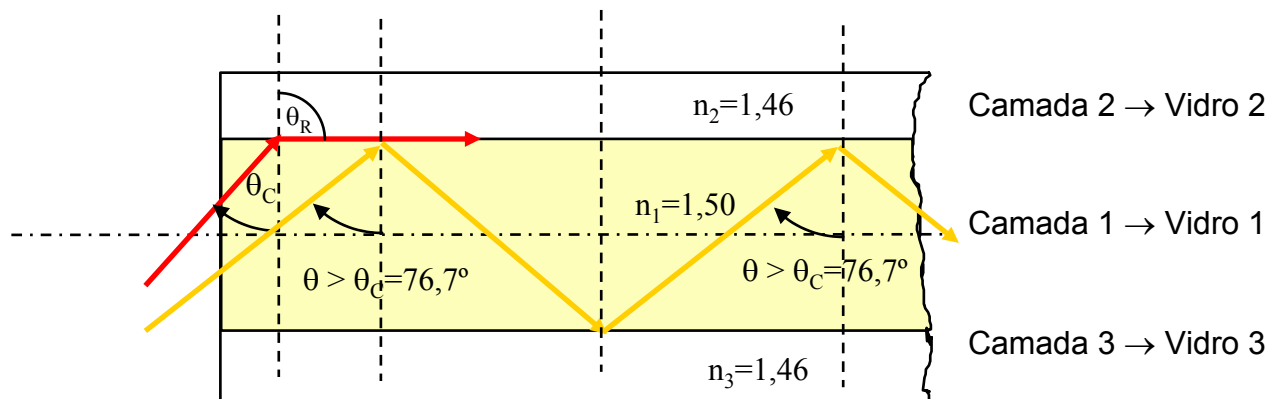


➔ Assim, o raio de luz que incidir na fronteira entre as camadas 1 e 2 com ângulo de incidência maior que  $76,7^\circ$  da normal, sofrerá reflexão total e voltará para a camada 1

## 2. Fundamentos Teóricos

### ➤ Propagação da Luz

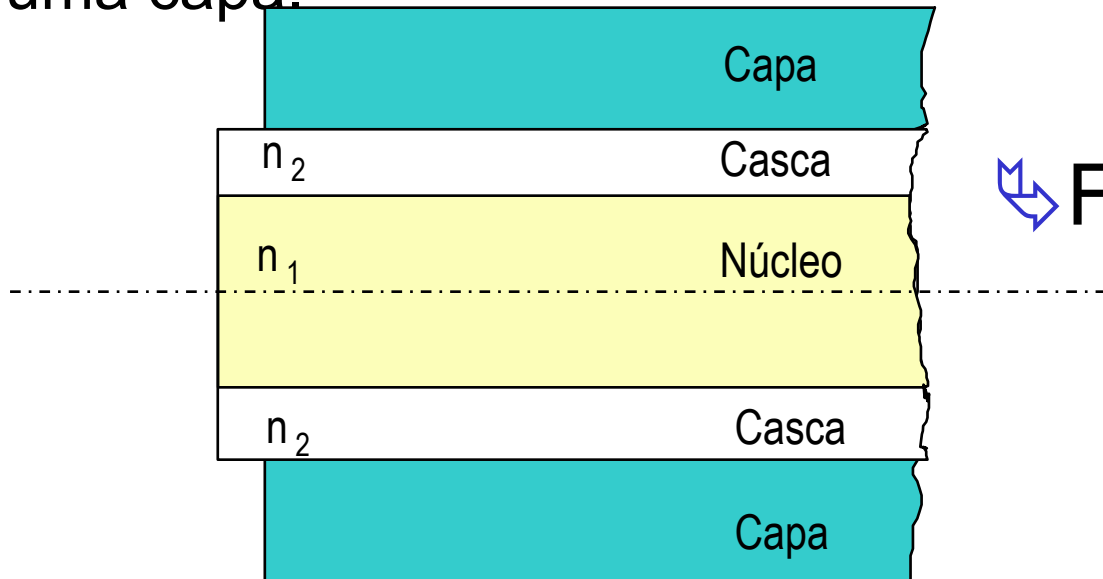
- ➔ Considerando ainda a situação anterior, vamos introduzir mais uma camada de vidro (camada 3) idêntica a camada 2 e sobreposta à camada 1.
- ➔ Na situação anterior o raio de luz sofreu reflexão total, e agora esse raio refletido tornou-se um raio incidente para a nova fronteira entre as camadas 1 e 3, com ângulo de incidência  $76,7^\circ$  da normal, que sofrerá reflexão total novamente retornando para a camada 1. O raio novamente refletido se tornará novamente um raio incidente e assim sucessivamente, portanto desta forma é possível guiar a luz entre as duas camadas 2 e 3, através da reflexão total.
- ➔ Concluindo, é assim que ocorre o guiamento, na propagação da luz numa fibra óptica.



## 2. Fundamentos Teóricos

### ➤ Propagação da Luz

- ➔ Na fibra óptica, a camada 1 é chamada de núcleo e as camadas 2 e 3 são chamadas de casca. Na prática a fibra óptica, é cilíndrica, onde a casca envolve o núcleo que por sua vez é protegido por uma capa.

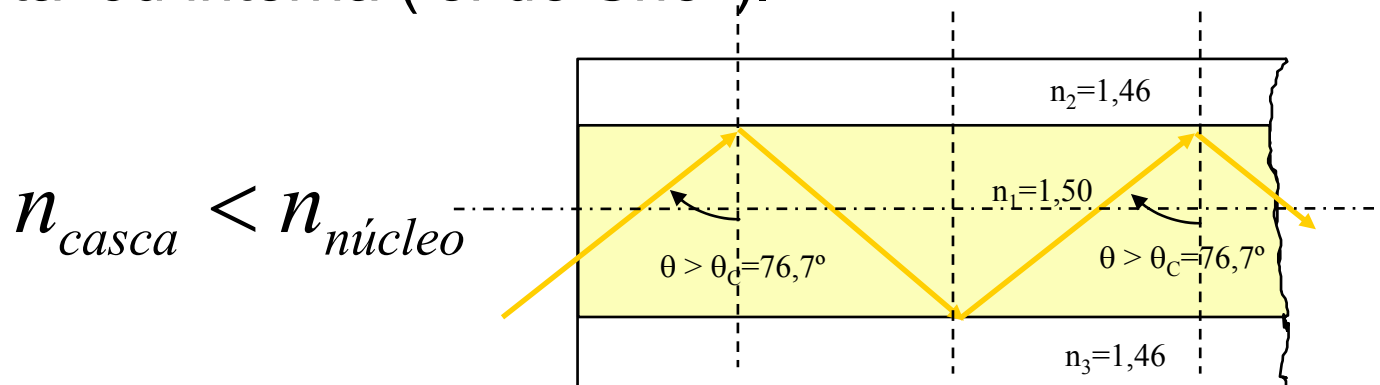


➔ Fibra Óptica

# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Características Gerais

- ➔ São feitas de materiais dielétricos (vidro ou plástico).
- ➔ São formadas por um núcleo e uma casca.
- ➔ Estas duas partes são fabricadas em um único procedimento (de uma vez)
  - ➡ não é possível separá-las por processo mecânico.
- ➔ O núcleo possui índice de refração maior que o da casca para garantir que a luz se propague ao longo do núcleo pelo fenômeno da reflexão total ou interna (lei de Snell).



# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Função da Geometria e do Perfil do Índice de Refração do Núcleo (tipos básicos usuais)

### ➔ Fibra Multimodo de Índice Degrau

- Foram as primeiras fibras ópticas a terem aplicações práticas.
- Possui apenas um tipo de material compondo o núcleo de forma a termos um índice de refração constante.
- O índice de refração do núcleo varia abruptamente, dando origem ao perfil degrau.

### ➔ Fibra Multimodo de Índice Gradual

- Possui seu do núcleo composto por vários materiais de diversos índices de refração que diminuem a partir do eixo central da fibra, gradualmente.

### ➔ Fibra Monomodo (índice degrau)

- Possui contém apenas um modo de propagação, enquanto as fibras do tipo multimodo possuem milhares modos de propagação.



# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Modos de Propagação

- ➔ O número de modos de propagação da luz em uma fibra depende de três fatores:
  - Diâmetro do núcleo, Abertura Numérica e do comprimento de onda da luz
- ➔ Trajetórias ou caminhos que os raios luminosos podem percorrer dentro da fibra, podendo suportar desde 1 até 100.000 modos de propagação e segundo as equações de Maxwell (teorias eletromagnéticas), são definidos:

$$V = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} \cdot AN$$

Onde:

V .....é a frequência normalizada

d .....é o diâmetro do núcleo

$\lambda$  .....é o comprimento de onda da luz

AN ...é a abertura numérica

O número de modos é definido por:

$$M = \frac{V^2}{4} \quad \text{para fibras de índice gradual}$$

$$M = \frac{V^2}{2} \quad \text{para fibras de índice degrau}$$

# 3. Tipos de Fibras Ópticas

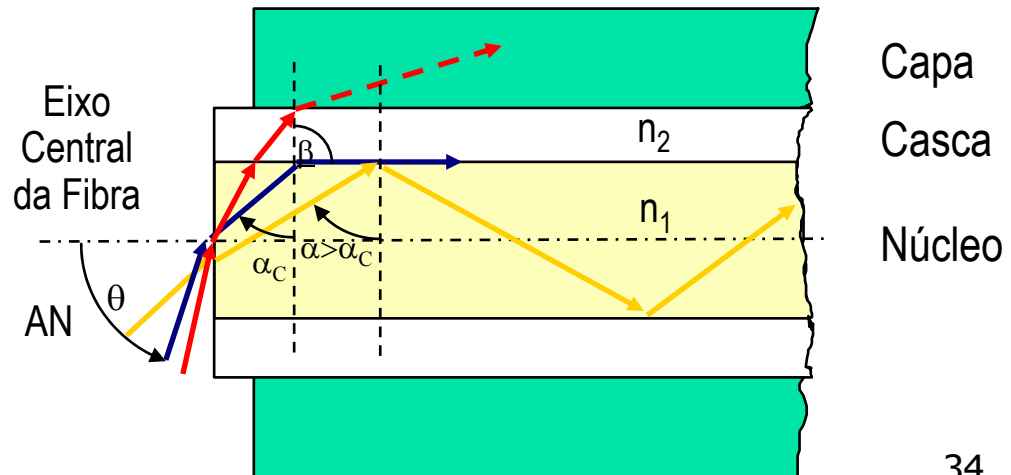
## ➤ Abertura Numérica - AN

- ➔ O número de modos de propagação depende do comprimento de onda da luz a ser transmitida, do diâmetro do núcleo e da abertura numérica.
- ➔ A “**AN**” representa o ângulo máximo que um raio luminoso pode formar com o eixo central da fibra, para que se propague no núcleo pelo fenômeno de reflexão total ou interna, ou seja:

$$AN = \sin \theta$$

*aplicando a lei de Snell*

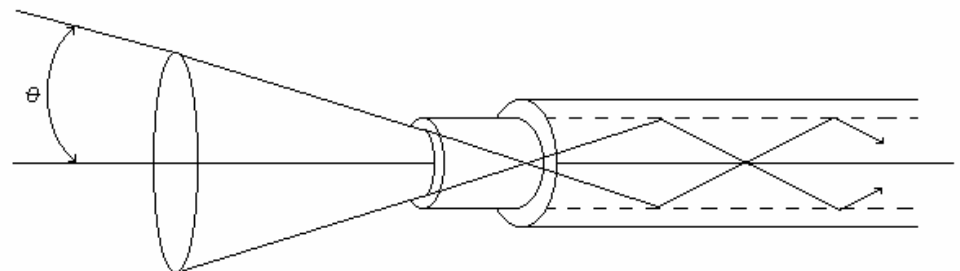
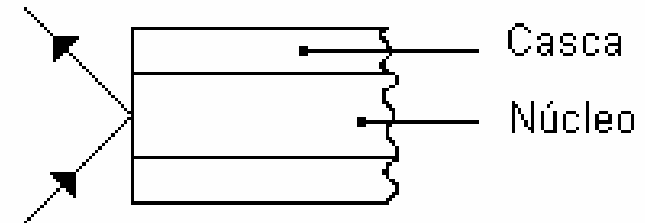
$$AN = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Abertura Numérica

- ➔ O feixe de luz deve incidir na fibra óptica com um ângulo tal que não ocorra a reflexão total do sinal.
- ➔ A abertura numérica define um cone de aceitação para o sinal óptico.
- ➔ Este cone aparece na entrada e na saída da fibra.



# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Função da Geometria e do Perfil do Índice de Refração do Núcleo (tipos básicos usuais)

### ➔ Fibra Multimodo de Índice Degrau

#### ➔ Vantagens:

- ➔ Abertura numérica e diâmetro do núcleo relativamente grandes, podendo variar entre  $100\mu m$  a  $1000\mu m$ .
- ➔ Requerem pouca precisão de fácil acoplamento óptico, facilidade de injetar luz em seu interior.
- ➔ Possibilitam o uso de fontes ópticas mais baratas.
- ➔ Fabricadas em sílica, vidro ou até plástico (polímeros)
- ➔ Podem ser fabricadas com apenas um índice de refração, isto é, sem casca (o ar teria essa função)

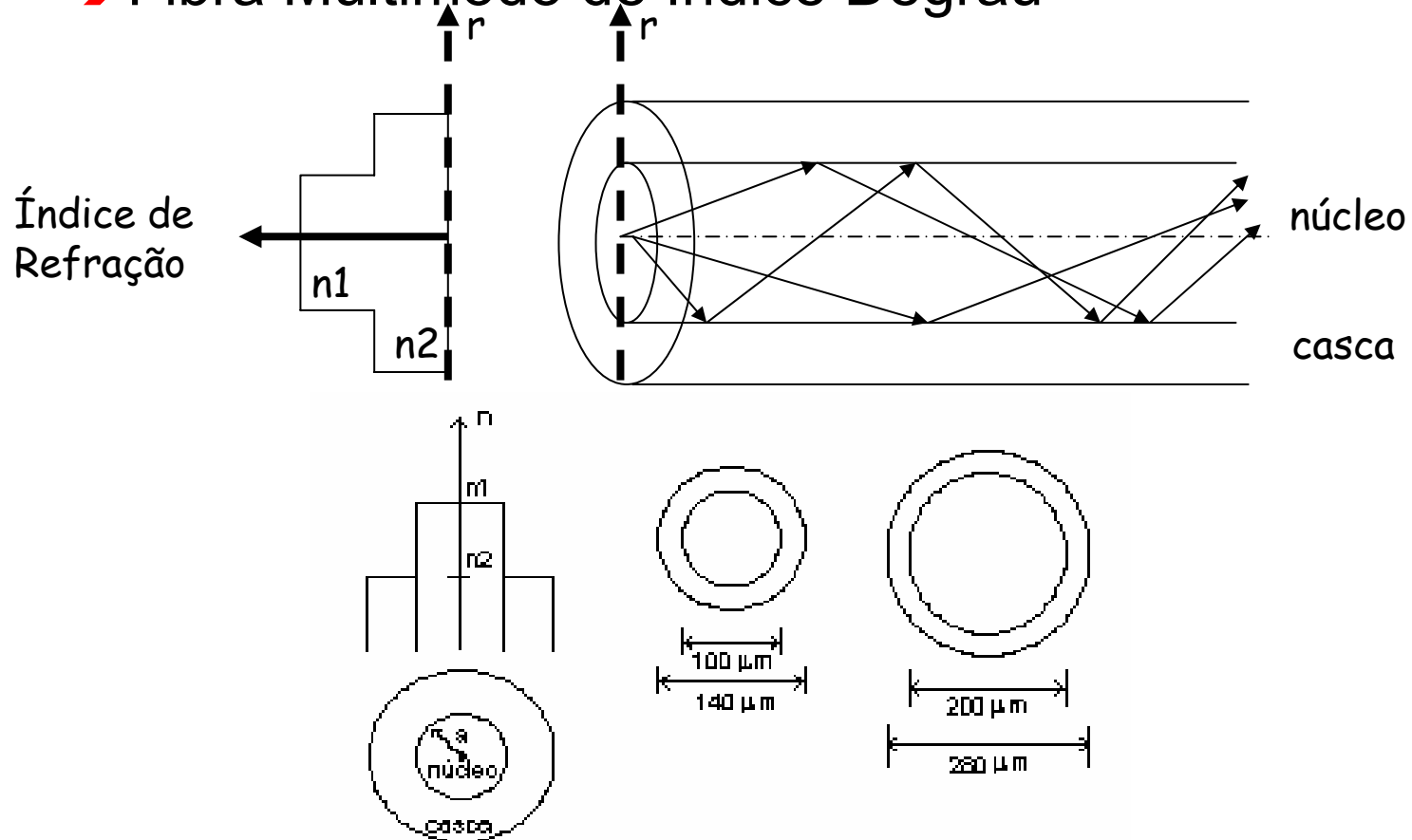
#### ➔ Desvantagem:

- ➔ Baixa capacidade de transmissão devido a atenuação elevada ( $>4\text{dB/km}$ ) e largura de banda pequena ( $\leq 25\text{ MHz}$ ), limitando a transmissão de dados em curtas distâncias.

# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## Função da Geometria e do Perfil do Índice de Refração do Núcleo (tipos básicos usuais)

→ Fibra Multimodo de Índice Degrau



# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Função da Geometria e do Perfil do Índice de Refração do Núcleo (tipos básicos usuais)

### ➔ Fibra Multimodo de Índice Gradual

➤ Possui seu do núcleo composto por várias camadas de vidro de diversos índices de refração que diminuem a partir do eixo central da fibra, gradualmente, e variam segundo as equações:

$$n(r) \cong n_1 \left[ 1 - \Delta \left( \frac{r}{a} \right)^\alpha \right] \text{ para } r < a;$$

$$n_2 \cong n_1 (1 - \Delta) \text{ para } r \geq a;$$

$$\text{sendo } \Delta \cong \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \text{ onde :}$$

$n_1 \rightarrow$  é índice de refração do centro da fibra;  $n_2 \rightarrow$  é índice de refração da casca da fibra;

$\Delta \rightarrow$  é a diferença percentual dos índices de refração do centro da fibra e da casca;

$r \rightarrow$  é a distância do eixo da fibra;  $\alpha \rightarrow$  é o coeficiente de otimização;

$a \rightarrow$  é o raio do núcleo.

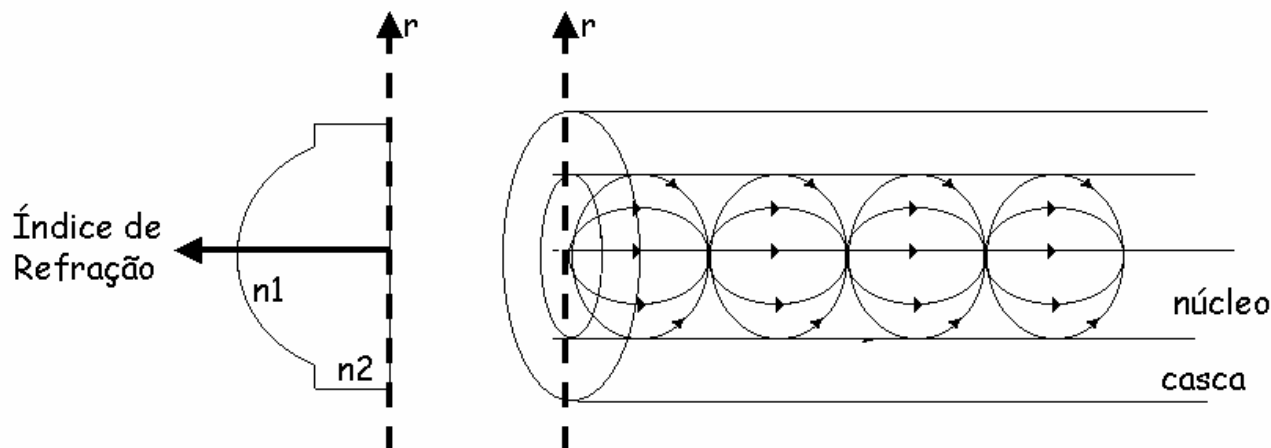
- ➔ Para  $\alpha=2$ , o índice de refração é parabólico
- ➔ Possui núcleos com diâmetros da ordem de 50; 62,5 ou 85 $\mu\text{m}$  e casca de 125 $\mu\text{m}$ .

# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Função da Geometria e do Perfil do Índice de Refração do Núcleo (tipos básicos usuais)

### ➔ Fibra Multimodo de Índice Gradual

- Apresentam maior capacidade de transmissão comparada à Fibra Óptica Multimodo Índice Degrau;
- Apresentam diâmetro e abertura numérica menores do que as fibras multimodo índice degrau;
- São indicadas para sistemas de telecomunicações cobrindo distâncias de alguns quilômetros, com atenuação da ordem e de no máximo  $3\text{dB/km}$  a  $850\text{ nm}$ .



# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Função da Geometria e do Perfil do Índice de Refração do Núcleo (tipos básicos usuais)

### ➔ Fibra Monomodo (índice degrau – mais usual)

- Se alterarmos a dimensão do núcleo da fibra ou sua abertura numérica “AN” e operarmos com maiores comprimentos de onda “ $\lambda$ ”, matematicamente, verificaremos que o número de modos de propagação diminuirá, porém:
  - Se diminuirmos a “AN”  $\Rightarrow$  acoplamento óptico inviável
  - Valores de “ $\lambda$ ” superiores  $\Rightarrow$  atenuação do sinal
  - Solução  $\Rightarrow$  reduzir o diâmetro do núcleo para valor pouco maior do que “ $\lambda$ ”, de forma que apenas um modo seja guiado
- Núcleo da ordem de  $2$  a  $10\ \mu\text{m}$  de diâmetro e casca com diâmetro 12 vezes maior, sendo o mais comum entre  $80$  a  $120\ \mu\text{m}$ .
- Possui apenas um modo de propagação, enquanto as fibras do tipo multimodo possuem milhares modos de propagação.
- Possuem maior capacidade de transmissão, do que as fibras multimodo.

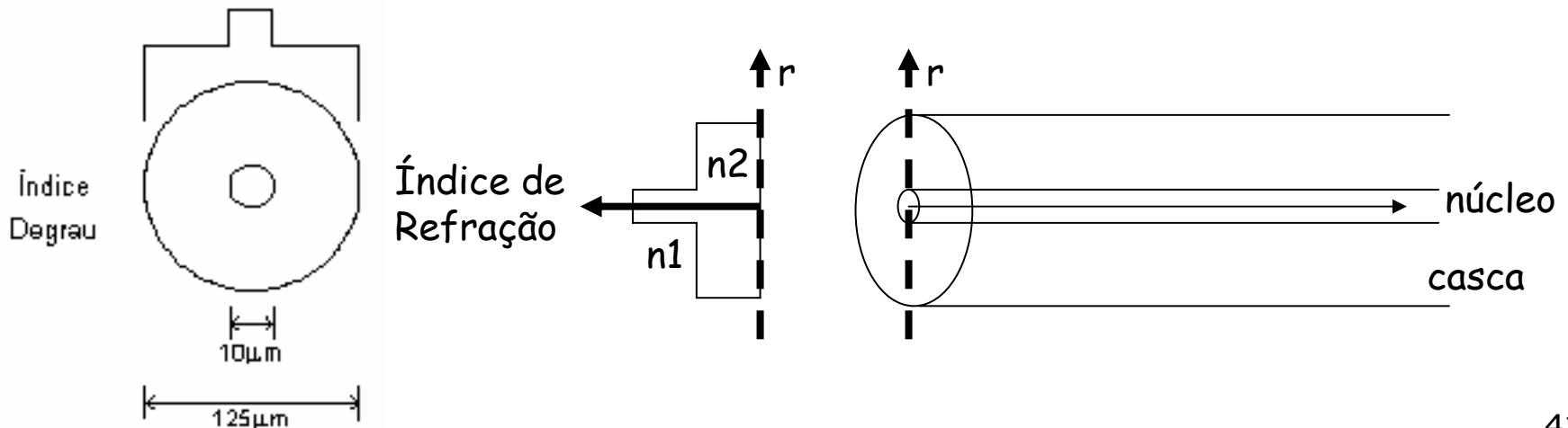


# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Função da Geometria e do Perfil do Índice de Refração do Núcleo (tipos básicos usuais)

### ➔ Fibra Monomodo (índice degrau – mais usual)

- ➔ Uma grande largura de banda da ordem de 10 a 100 GHz, pois não há dispersão modal.
- ➔ Baixa atenuação da ordem de  $0,2$  a  $0,5$  dB/km.
- ➔ Possuem dimensões bastante reduzidas, dificultando as conexões.



# 3. Tipos de Fibras Ópticas

- **Função da Geometria e do Perfil do Índice de Refração do Núcleo (tipos básicos usuais)**
  - ➔ **Fibra com Dispersão Deslocada (DS – dispersion shift)**
    - Aplicações em sistemas de longa distância (menor atenuação);
    - Devido a preocupação com a dispersão cromática foram desenvolvidas fibras com outras características de dimensões, índices de refração e perfil, de forma a “deslocar” a dispersão cromática a valores mínimos na região de interesse, onde é praticado a  $1,55\mu m$ , denominadas “Fibras com Dispersão Deslocada” (dispersion shift – DS).

# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Fabricação da Fibra Óptica

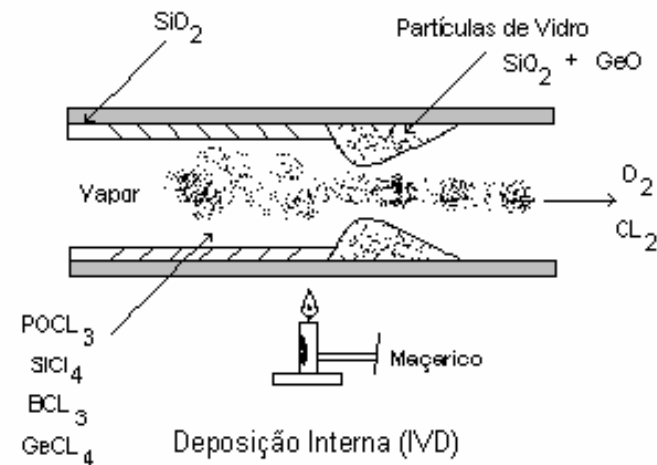
- ➔ Vários processos de fabricação;
- ➔ Requerem equipamentos especiais e de grande precisão;
- ➔ Matéria prima utilizada  $\Rightarrow$  Sílica ( $\text{SiO}_2$ )
- ➔ Etapas de fabricação
  - ➡ 1ª Etapa: Preforma (tubo):
    - IVD (deposição interna)
    - OVD (deposição externa)
    - VAD (deposição axial)
  - ➡ 2ª Etapa: Puxamento
    - Consiste no estiramento da preforma até o diâmetro que se deseja para a fibra óptica.

# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Fabricação da Fibra Óptica

➔ Processo MCVD - utiliza a técnica da deposição interna (IVD).

- ➔ Consiste basicamente na deposição de várias camadas de partículas de vidros (dopantes), no interior de um tubo de Sílica pura que são injetadas na forma gasosa ( $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{GeCl}_4$  e etc).
- ➔ Esse tubo de sílica pura será a casca de fibra, fica girando, à medida que são depositados os dopantes em seu interior, enquanto um maçarico o percorre longitudinalmente a uma temperatura aproximada de  $1600^\circ\text{C}$ .

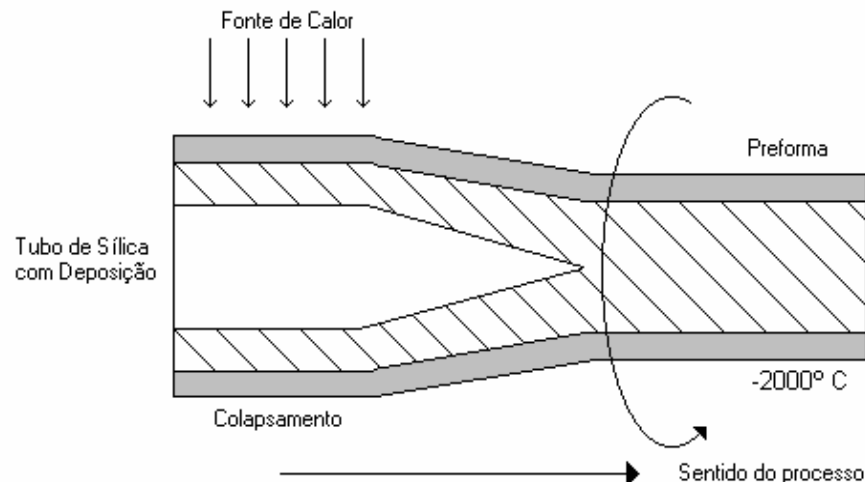


# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Fabricação da Fibra Óptica

### ➔ Processo MCVD

- Para cada camada depositada, controla-se a concentração dos materiais dopantes, de maneira a se conseguir vários índices de refração.
- Após a deposição do número desejado de camadas, aumenta-se a temperatura para  $2000^{\circ}\text{C}$ , onde ocorre o colapso do tubo, isto é um encolhimento radial, tornando-o maciço e finalizando a fabricação da preforma.

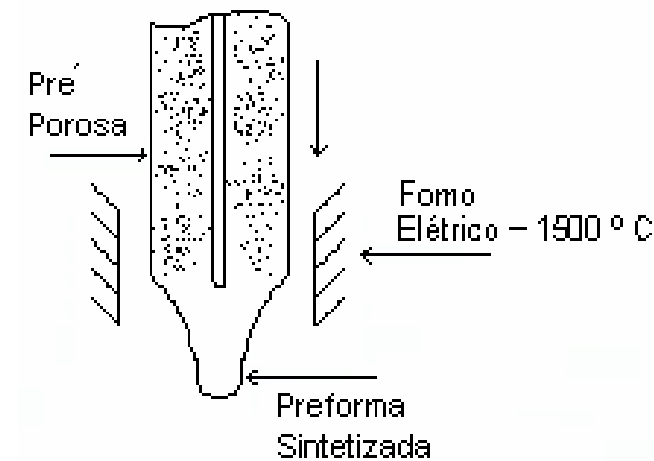
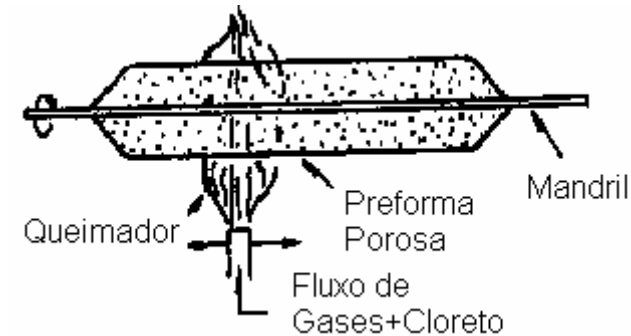


# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Fabricação da Fibra Óptica

➔ Processo OVD - utiliza a técnica da deposição externa (OVD).

- ➔ Várias camadas de material dopante são depositadas sobre um mandril rolante.
- ➔ A casca da fibra também é feita com esse processo (a casca é feita com mais uma camada de material dopante adequado, de maneira a se ter a variação no índice de refração casca - núcleo).
- ➔ O colapso do tubo ocorre a cerca de 2000° C



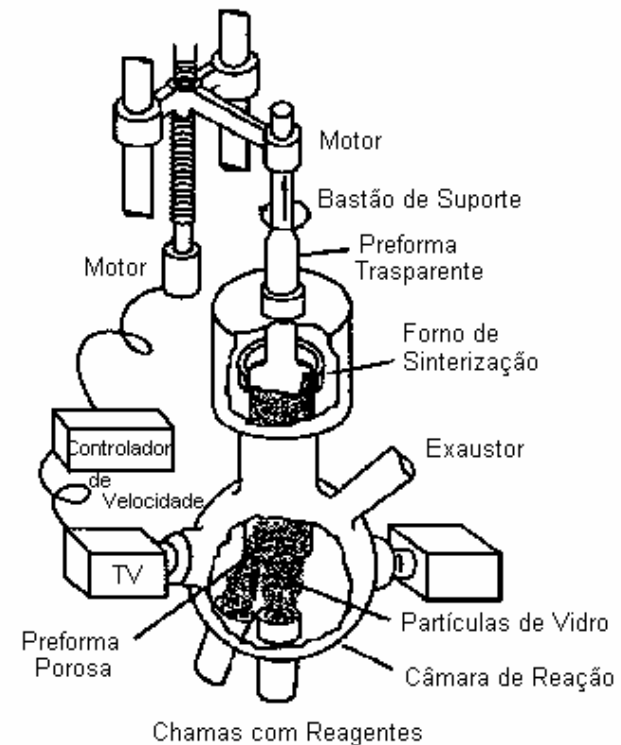
Deposição Externa (OVD)

# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Fabricação da Fibra Óptica

### ➔ Processo VAD

- A preforma é formada a partir de um tubo de Sílica que funciona como um suporte para a formação da preforma porosa.
- A preforma porosa é formada depositando-se partículas de vidro sobre o tubo de Sílica.
- A preforma porosa passa por um forno em forma de anel que se encarrega do processo de sinterização, onde é formada a preforma de vidro transparente



# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Fabricação da Fibra Óptica

### ➔ Puxamento

- ➔ A preforma (fabricada por um dos processos anteriores) é posicionada verticalmente.
- ➔ A extremidade inferior é inserida em um forno com temperatura de cerca de  $2000^{\circ}\text{C}$ , onde ocorre o escoamento da fibra.
- ➔ O diâmetro da fibra é controlado variando-se a velocidade do puxamento da fibra.



# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Fabricação da Fibra Óptica

➔ O processo de puxamento pode ser feito de duas maneiras:

### ➔ Duplo cadinho:

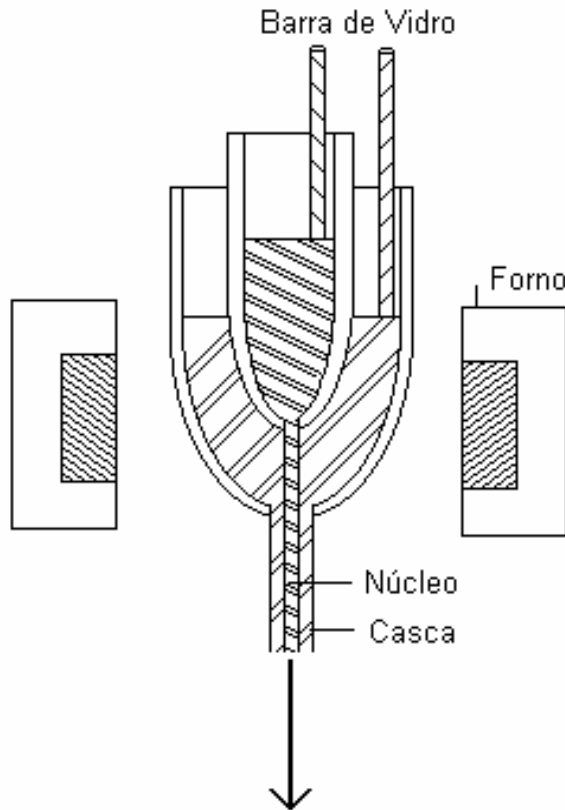
- ➔ dois bastões de vidro (com índices de refração diferentes) são fundidos em um forno com dois cadinhos.
- ➔ Os vidros fundidos escorrem dos cadinhos, formando a fibra óptica

### ➔ Rod in Tube

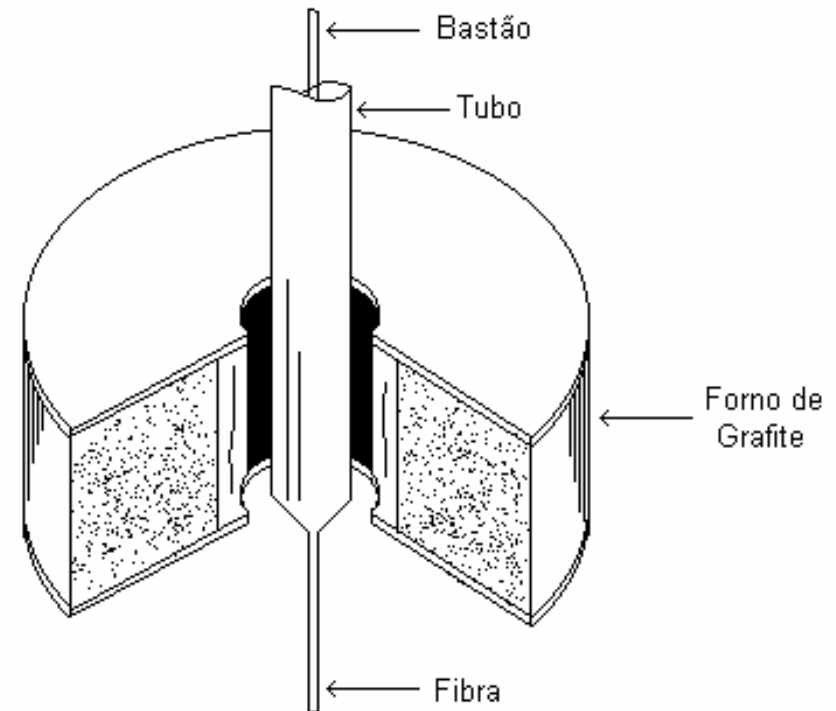
- ➔ No processo de puxamento com Rod in Tube, um tubo contendo um bastão (ambos de vidro), com os índices de refração adequados, são inseridos em um forno.
- ➔ Os materiais (do tubo e do bastão) são fundidos e puxados, formando a fibra óptica.

# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Fabricação da Fibra Óptica



Duplo Cadinho



Rod in Tube

# 3. Tipos de Fibras Ópticas

## ➤ Fabricação da Fibra Óptica

➔ A atenuação “ $A_{(dB)}$ ” de uma fibra óptica é a diferença entre o níveis de potência óptica na entrada “ $P_{in(dBm)}$ ” da fibra e na saída desta fibra “ $P_{out(dBm)}$ ” .

$$A_{(dB)} = P_{in(dBm)} - P_{out(dBm)}$$

# 4. Características de Transmissão

➤ As principais características de Tx das F.O. das quais depende e limitam um projeto de Sistema Óptico são:

## ➔ Dispersão

- ➔ É o alargamento do pulso luminoso que trafega ao longo da fibra óptica, limitando a banda passante e conseqüentemente a capacidade de transmissão de informação nas fibras.
- ➔ A velocidade das informações tem que ser de baixas taxas o suficiente para assegurar que os pulsos não se sobreponham (overlap). O alargamento é provocado por três tipos de dispersão: modal, material e do guia de onda.



Figura 4.1 - Overlap

# 4. Características de Transmissão

## ➤ Dispersão Modal

- ➔ É provocada pelos diferentes caminhos de propagação (modos) de um feixe de luz e por consequência, o seu tempo de percurso no núcleo das fibras multimodo, o que já não ocorre nas fibras monomodo.
- ➔ Considerando-se em uma fibra multimodo de índice degrau, que todos os modos terão a mesma velocidade, existirá uma diferença máxima no tempo de percurso, entre o modo que se propaga exatamente no centro do núcleo e o modo próximo ao ângulo crítico. Isto porque o modo próximo ao ângulo crítico (alta ordem) percorre um caminho mais longo que o modo que se propaga no eixo da fibra (baixa ordem). Sendo assim todos os modos intermediários a estes chegarão na extremidade final da fibra em tempos diferentes (defasados), alargando o pulso.
- ➔ Só é encontrada em fibras multimodo

# 4. Características de Tx - F.O.

## ➤ Dispersão Modal (continuação)

➔ O cálculo da diferença máxima dos tempos de chegada dos modos é dado pela fórmula:

$$\tau = \Delta \cdot t_1$$

Onde :

$t_1 \Rightarrow$  é o tempo de propagação da luz no eixo da fibra

$\Delta \Rightarrow$  como vimos, é a diferença percentual entre os índices de refração do núcleo da casca, que é dado por :

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

# 4. Características de Tx - F.O.

## ➤ Dispersão Modal (continuação)

- ➔ A dispersão modal é bastante reduzida em fibras com índice gradual, pois devido ao seu perfil de índice de refração variável em função do raio, todos os modos terão suas velocidades de propagação alteradas.
- ➔ Desta forma, todos os modos chegarão na extremidade final quase que ao mesmo tempo, pois a velocidade de propagação varia em função do índice de refração, obtendo-se assim velocidades maiores para os modos de alta ordem e menores para modos de baixa ordem.

# 4. Características de Tx - F.O.

## ➤ Dispersão Material (Dispersão Cromática)

- ➔ Ocorre em todas as fibras, pois este tipo de dispersão, também chamada de cromática, é consequência da composição da matéria prima da fibra e da largura espectral da fonte luminosa.
- ➔ Sendo o índice de refração e conseqüentemente a velocidade de propagação função do comprimento de onda, cada componente da fonte luminosa viaja com velocidade diferente, pois na realidade, as fontes luminosas possuem uma certa largura espectral.
- ➔ Para diminuir a dispersão material é necessário diminuir a largura espectral das fontes luminosas e utilizá-las em fibras de baixa dispersão.
  - ➡ Como exemplo, o LASER (que causa menor dispersão que o LED), sendo utilizado em fibras cuja matéria prima é a sílica que próximo a 1300nm de comprimento de onda, apresenta uma dispersão mínima.



## 4. Características de Tx - F.O.

### ➤ Dispersão do Guia de Onda

- ➔ Provocada pelas variações no índice de refração dos materiais utilizados na construção da fibra (núcleo e casca). A luz se propaga com diferentes velocidades durante a trajetória.
- ➔ Provocada pela variação da dimensão do núcleo ao longo da fibra, pois a propagação de um modo é função do comprimento de onda da luz e do diâmetro do núcleo.
- ➔ É mais comum em fibras monomodo.

# 4. Características de Tx - F.O.

## ➤ Atenuação

- ➔ Uma característica de maior importância para o projeto de um sistema óptico.
- ➔ Representa a perda de potência óptica em um determinado lance de fibra óptica e é expressa em dB/km, expressa por:

$$Atenuação \Rightarrow A_{(dB)} = \left( 10 \log \frac{p_e}{p_s} \right) \cdot \frac{1}{L}$$

$p_e \Rightarrow$  potência de entrada

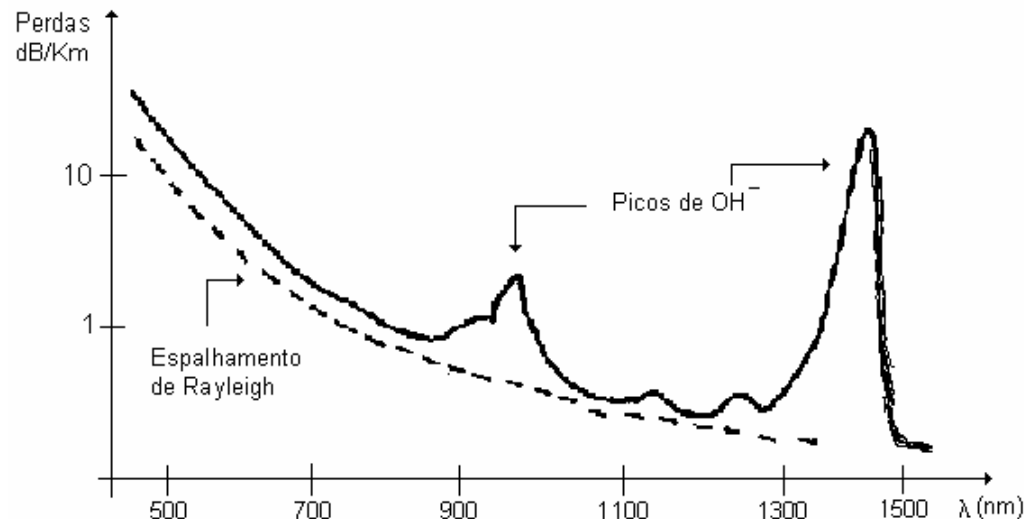
$p_s \Rightarrow$  potência de saída

$L \Rightarrow$  comprimento da fibra em km

# 4. Características de Tx - F.O.

## ➤ Atenuação

- ➔ Varia em função do comprimento de onda da luz.
- ➔ As regiões de dentro do espectro eletromagnético são chamadas de janelas.
  - ➔ A 1ª geração das fibras ópticas opera na 1ª janela que se compreende entre 820 e 850nm;
  - ➔ A 2ª janela, onde a atenuação é baixa, é a região correspondente a 1300nm;
  - ➔ A 3ª janela corresponde a 1550nm.



## 4. Características de Tx - F.O.

➤ **As principais causas para a atenuação nas fibras ópticas são:**

➔ **Espalhamento do sinal**

- Provocado por imperfeições menores do que o comprimento de onda do sinal e desviam o sinal em varias direções dentro da fibra.
- O espalhamento Rayleigh, e causada pela variação da composição da fibra e densidade

➔ **Absorção** é provocada por impurezas presentes na fibra que transformam parte do sinal óptico em calor. A hidroxila (íon  $\text{OH}^-$ ) é a impureza mais difícil de ser eliminada.

## 4. Características de Tx - F.O.

➤ **As principais causas para a atenuação nas fibras ópticas são:**

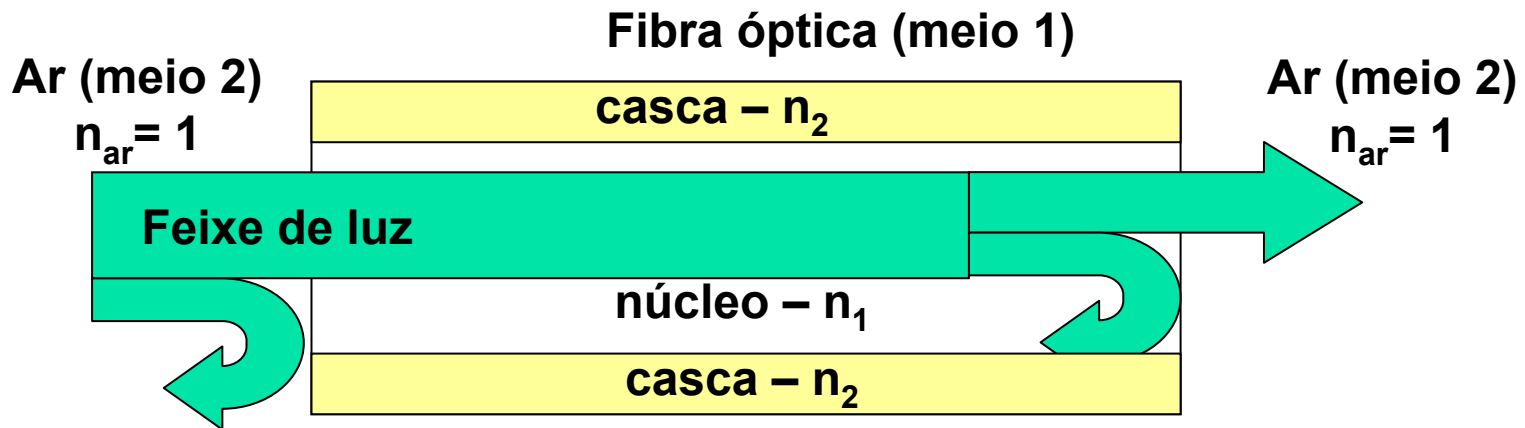
➔ **Deformações mecânicas** podem ser resultado de:

- ➔ **Microcurvaturas:** são curvaturas microscópicas se comparadas com o núcleo da fibra. Ocorrem quando as fibras são incorporadas aos cabos ópticos.
- ➔ **Macrocurvaturas:** são curvaturas de raios longos se comparados ao raio da fibra. Ocorrem quando dobramos esquinas com o cabo óptico.

# 4. Características de Tx - F.O.

## ➤ Perda por Reflexão Fresnel

➔ Quando um feixe de luz é injetado em uma fibra, parte dele é refletido de volta à fonte de luz. Essa reflexão é chamada de reflexão Fresnel e ocorre em função da diferença entre os índices de refração dos meios onde ocorre a propagação da luz.



***Reflexão Fresnel***

# 4. Características de Tx - F.O.

## ➤ Perda por Reflexão Fresnel

- ➔ A perda do sinal de luz tem que ser considerada tanto na entrada da luz, como na saída, isto porque a reflexão Fresnel ocorre tanto na passagem da luz do ar (meio 2) para a fibra (meio 1) como da fibra (meio 1) para o ar (meio 2).
- ➔ A reflexão Fresnel que ocorre entre o ar e a fibra pode ser definida pela equação:

$$\rho = \left( \frac{n_{meio1} - n_{meio2}}{n_{meio1} + n_{meio2}} \right)^2 = \left( \frac{n_{meio1} - 1}{n_{meio1} + 1} \right)^2, \text{ onde : } \rho \rightarrow \text{é a reflexão Fresnel}$$

$n_{meio1} \rightarrow$  índice de refração do meio 1

$n_{meio2} = n_{ar} = 1 \rightarrow$  índice de refração do meio 2 (ar)

# 4. Características de Tx - F.O.

## ➤ Perda por Reflexão Fresnel

➔ Essa reflexão ocasiona uma perda no sinal de luz transmitido, que é definida por:

$$A_{Fresnel(dB)} = -10 \log(1 - \rho)$$

➔ Se por exemplo, a luz passa do ar para uma fibra com índice de refração igual a 1,5, a perda é de aproximadamente 0,18 dB. E a mesma ocorre quando a luz saí da fibra para o ar, totalizando 0,36 dB de perda, ou seja:

$$\rho = \left( \frac{1,5 - 1}{1,5 + 1} \right)^2 = 0,040 \Rightarrow A_{Fresnel(dB)} = -10 \log(1 - 0,040) \cong 0,18 dB$$

$$A_{Total\ Fresnel(dB)} = 2 A_{Fresnel(dB)} = 2 \times 0,18 = 0,36 dB$$