



EPUSP

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP  
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas - PEA  
Av. Prof. Luciano Gualberto, Travessa 3, No.158  
Butantã - São Paulo - SP  
CEP: 05508-900

## PEA-5716

### COMPONENTES E SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO E SENSOREAMENTO A FIBRAS ÓPTICAS

#### 2ª AULA

### GUIAS ÓPTICOS E PROPAGAÇÃO EM FIBRAS ÓPTICAS

Prof. Dr. Josemir Coelho Santos

**Contatos:** [josemir@pea.usp.br](mailto:josemir@pea.usp.br)

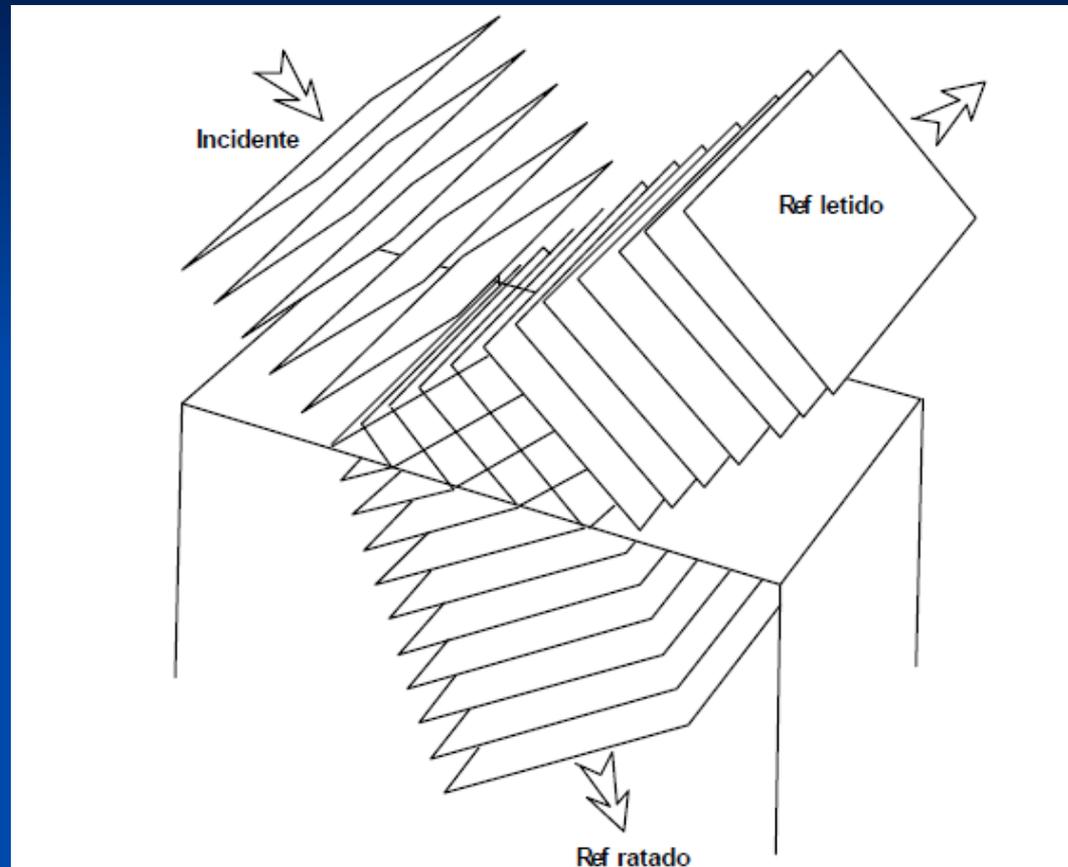
(011) 3091-5222 / 3091-5155

**Horário: 14 h às 17 h (4ª Feira)**

# Fibras Ópticas: Princípio de Funcionamento

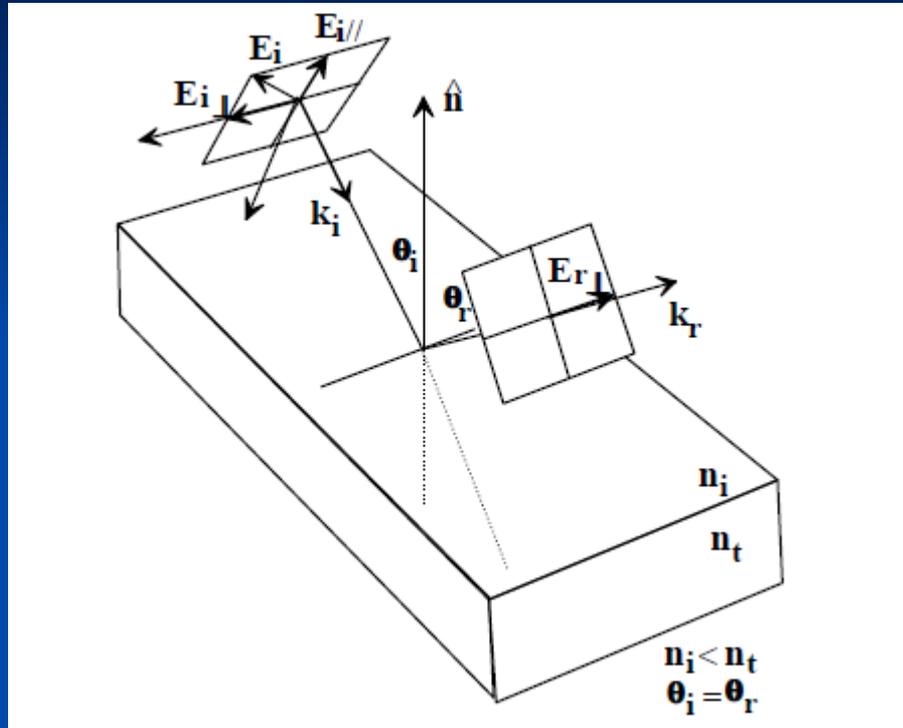
- **FIBRAS ÓPTICAS** são **GUIAS DE ONDA DIELÉTRICOS**, ou seja, são:
  - Estruturas que confinam luz dentro delas e
  - Feitos de materiais não metálicos
- **Princípio de funcionamento: Reflexão Interna Total**
- Duas abordagens teóricas possíveis:
  - 1 - **óptica geométrica** ou de raios
  - 2 - óptica ondulatória: Teoria Eletromagnética / Equações de Maxwell
- 1 - Descrição por **Óptica Geométrica**:
  - Desenhos de raios só são válidos na aproximação da óptica-geométrica (dimensões muito maiores que o comprimento de onda)
  - Útil para o entendimento físico do mecanismo de guiagem de ondas
  - Permite mostrar que a luz só permanece confinada no guia para um número específico de ângulos de incidência ao levar-se em conta os desvios de fase nas interfaces (desvios de Goos-Hänchen)

# Óptica Geométrica – Reflexão e Transmissão de Ondas Planas



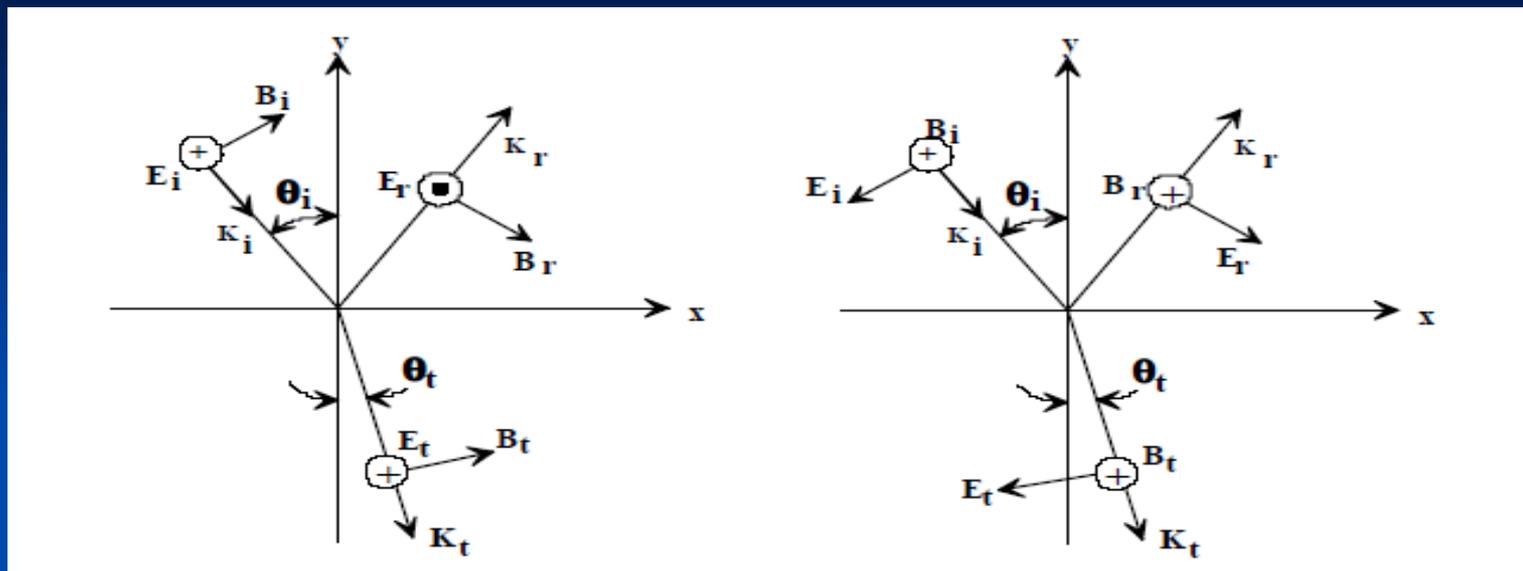
- Onda plana é uma idealização que pode ser vista como uma aproximação para uma pequena região de uma superfície de onda genérica a uma distância suficientemente grande da fonte.

# Óptica Geométrica – Plano de Incidência



- Plano de incidência com os vetores de onda incidente ( $\vec{k}_i$ ), refletida ( $\vec{k}_r$ ) e normal ( $\hat{n}$ ).

# Óptica Geométrica – Plano de Incidência



Polarização Normal

Polarização Paralela

Levando-se em consideração a conservação da energia e as condições de contorno na interface:

- Coeficientes de Reflexão

**Modo TE**

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\left(\frac{n_r}{n_i}\right)^2 - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\left(\frac{n_r}{n_i}\right)^2 - \sin^2 \theta_i}}$$

**Modo TM**

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{\left(\frac{n_r}{n_i}\right)^2 \cdot \cos \theta_i - \sqrt{\left(\frac{n_r}{n_i}\right)^2 - \sin^2 \theta_i}}{\left(\frac{n_r}{n_i}\right)^2 \cdot \cos \theta_i + \sqrt{\left(\frac{n_r}{n_i}\right)^2 - \sin^2 \theta_i}}$$

• Coeficientes de Reflexão

Modo TE

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\cos \theta_i - j \sqrt{\text{sen}^2 \theta_i - \left(\frac{n_r}{n_i}\right)^2}}{\cos \theta_i + j \sqrt{\text{sen}^2 \theta_i - \left(\frac{n_r}{n_i}\right)^2}} = 1e^{-j\phi_{\perp}}$$

Modo TM

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{\left(\frac{n_r}{n_i}\right)^2 \cdot \cos \theta_i - j \sqrt{\left(\frac{n_r}{n_i}\right)^2 - \text{sen}^2 \theta_i}}{\left(\frac{n_r}{n_i}\right)^2 \cdot \cos \theta_i + j \sqrt{\left(\frac{n_r}{n_i}\right)^2 - \text{sen}^2 \theta_i}} = 1e^{-j\phi_{\parallel}}$$

**ÂNGULO CRÍTICO**

Ângulo de incidência mínimo para que a reflexão total ocorra

$$\theta_c = \arcsen\left(\frac{n_r}{n_i}\right)$$

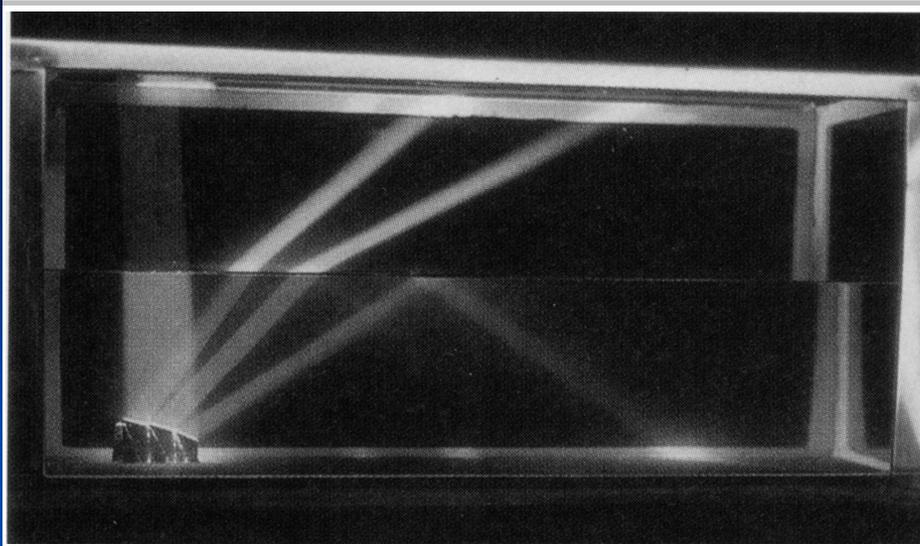
**REFLEXÃO TOTAL**

$n_r = n_i \cdot \text{sen} \theta_i$  e  $\theta_i > \theta_c$   
 Módulos dos coeficientes de reflexão são unitários, ou seja, toda a energia da onda incidente é refletida



$$\phi_{\perp} = -2 \arctg \left[ \frac{\sqrt{\text{sen}^2 \theta_i - \left(\frac{n_r}{n_i}\right)^2}}{\left(\frac{n_r}{n_i}\right)^2 \cdot \cos \theta_i} \right]$$

$$\phi_{\parallel} = -2 \arctg \left[ \frac{\sqrt{\text{sen}^2 \theta_i - \left(\frac{n_r}{n_i}\right)^2}}{\cos \theta_i} \right]$$



## REFLEXÃO TOTAL

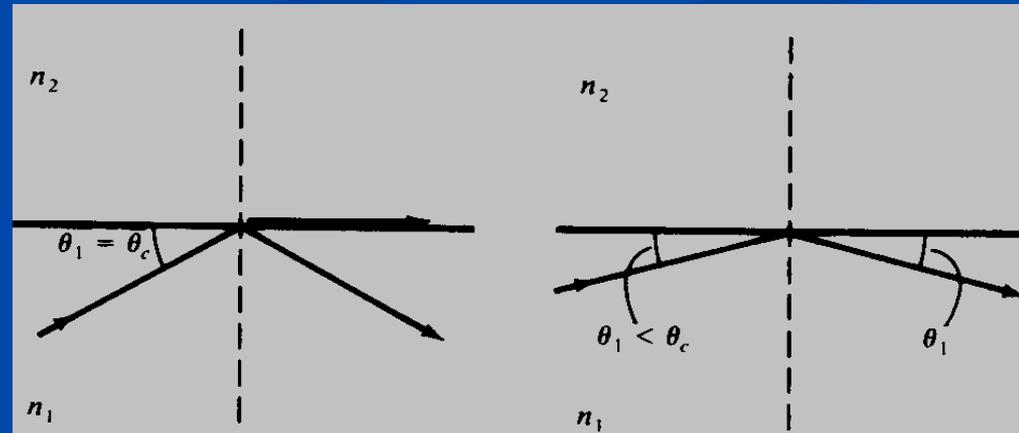
$$n_r = n_i \cdot \text{sen}\theta_i \text{ e } \theta_i > \theta_c$$



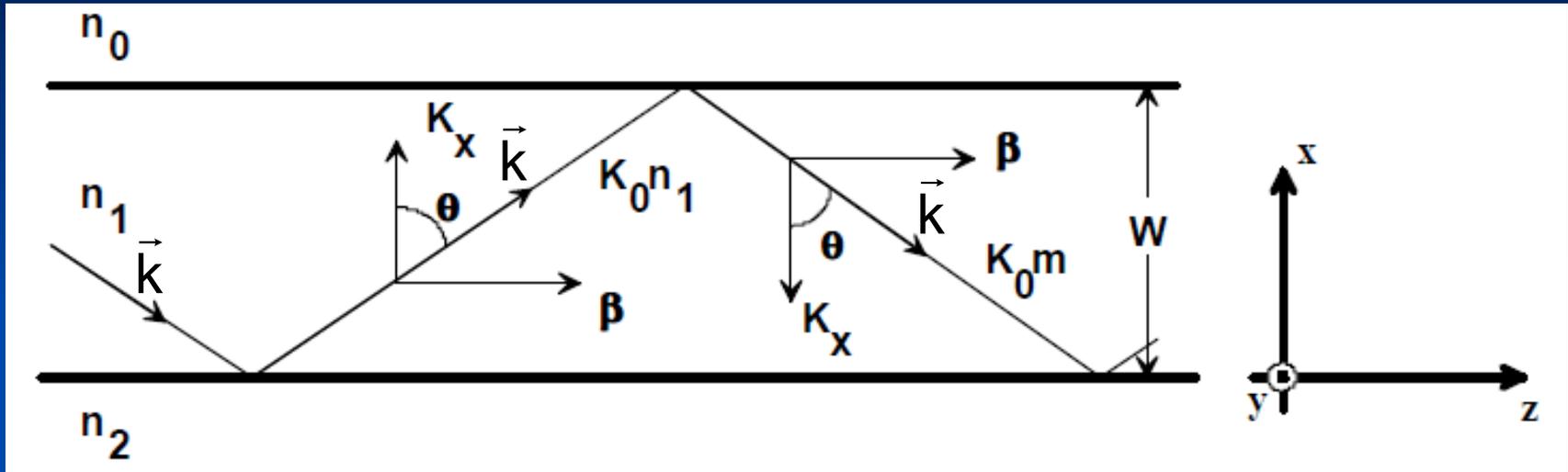
Módulos dos coeficientes de reflexão são unitários, ou seja, toda a energia da onda incidente é refletida

## ÂNGULO CRÍTICO

Ângulo de incidência mínimo para que a reflexão total ocorra



# Guia de Onda Planar



- **Comprimento de caminho óptico percorrido**

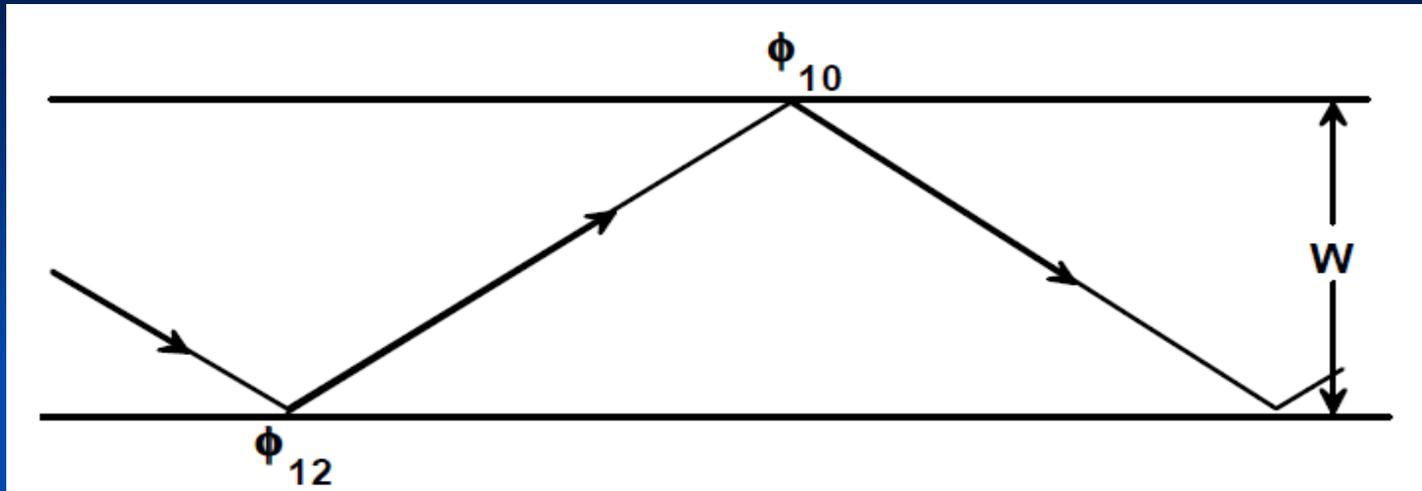
Fase relativa ao ponto de partida  $s = 0$

$$f = -n_1 \cdot k_0 \cdot s$$

Componente de  $k$  na direção transversal do guia

$$k_x = k_0 \cdot n_1 \cdot \cos\theta_1$$

# Modos de Propagação



## Ressonância Transversal

- Duas ondas propagam-se transversalmente ao guia, uma em cada sentido da sua espessura  $W$ .
- Quando a interferência entre elas é positiva, origina-se um perfil de campos cuja envoltória das intensidades é uma onda estacionária e quando a interferência é destrutiva a energia tende a irradiar e anula-se.

$$-\phi_{12} + k_x \cdot W - \phi_{10} + k_x \cdot W = 2m\pi$$

# Equações de Dispersão para Polarização

- **Modo TE**

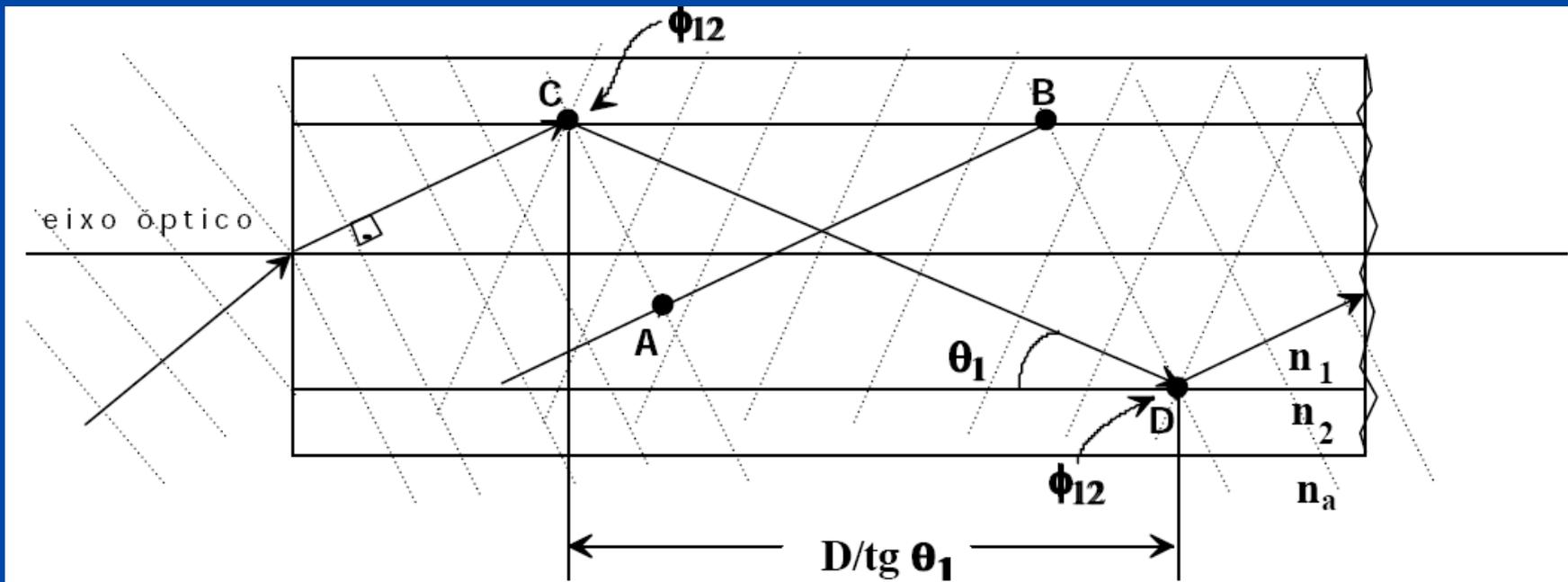
$$W \cdot k_0 \cdot n_1 \cdot \cos \theta_1 = m\pi + \operatorname{arctg} \left[ \frac{\sqrt{\operatorname{sen}^2 \theta_1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2}}{\left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \cdot \cos \theta_1} \right] + \operatorname{arctg} \left[ \frac{\sqrt{\operatorname{sen}^2 \theta_1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cdot \cos \theta_1} \right]$$

- **Modo TM**

$$W \cdot k_0 \cdot n_1 \cdot \cos \theta_1 = m\pi + \operatorname{arctg} \left[ \frac{\sqrt{\operatorname{sen}^2 \theta_1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2}}{\cos \theta_1} \right] + \operatorname{arctg} \left[ \frac{\sqrt{\operatorname{sen}^2 \theta_1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}{\cos \theta_1} \right]$$

# Modos de propagação

- Ressonância Transversal ou Condição de Fase (impostas pela óptica ondulatória)
- Equações de Maxwell - Lei ABCD



## Modos de propagação

Vetor de onda:  $\vec{k} = k_0 \cdot \vec{n}$

Número de onda no espaço livre:  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$

$\phi$  = atraso de fase

$$\phi_{AB} = k_x \cdot AB$$

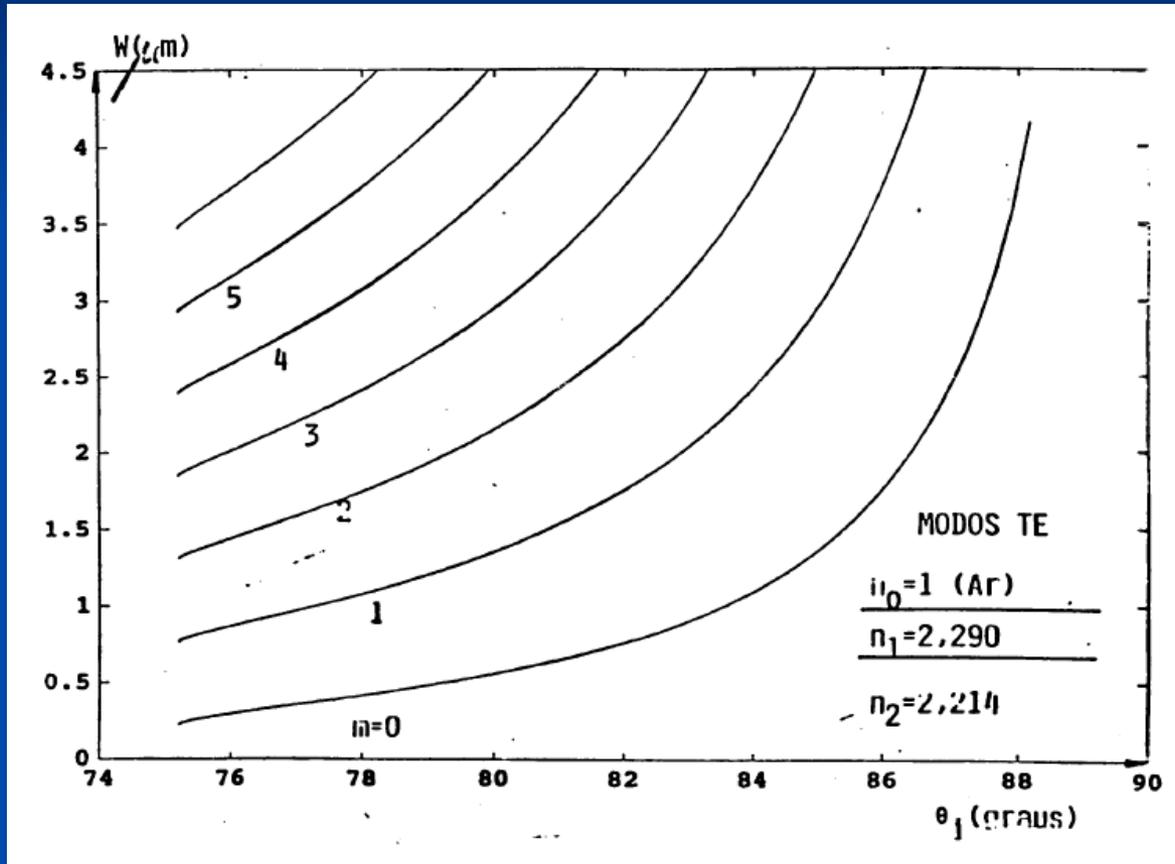
$$\phi_{CD} = -k_x \cdot CD$$

$\phi_{12}$  = constante, depende do coeficiente de reflexão  $\Gamma_{12}$

- Para que haja fluxo de energia :  $\phi_{AB} = \phi_{12} + \phi_{CD} + \phi_{12} + 2m\pi$
- Apenas um número finito de ângulos satisfarão a condição de fase para um dado diâmetro de núcleo, comprimento de onda da luz e relação entre índices de refração  $n_1 / n_2$ .
- Estes ângulos definem os MODOS DE PROPAGAÇÃO.

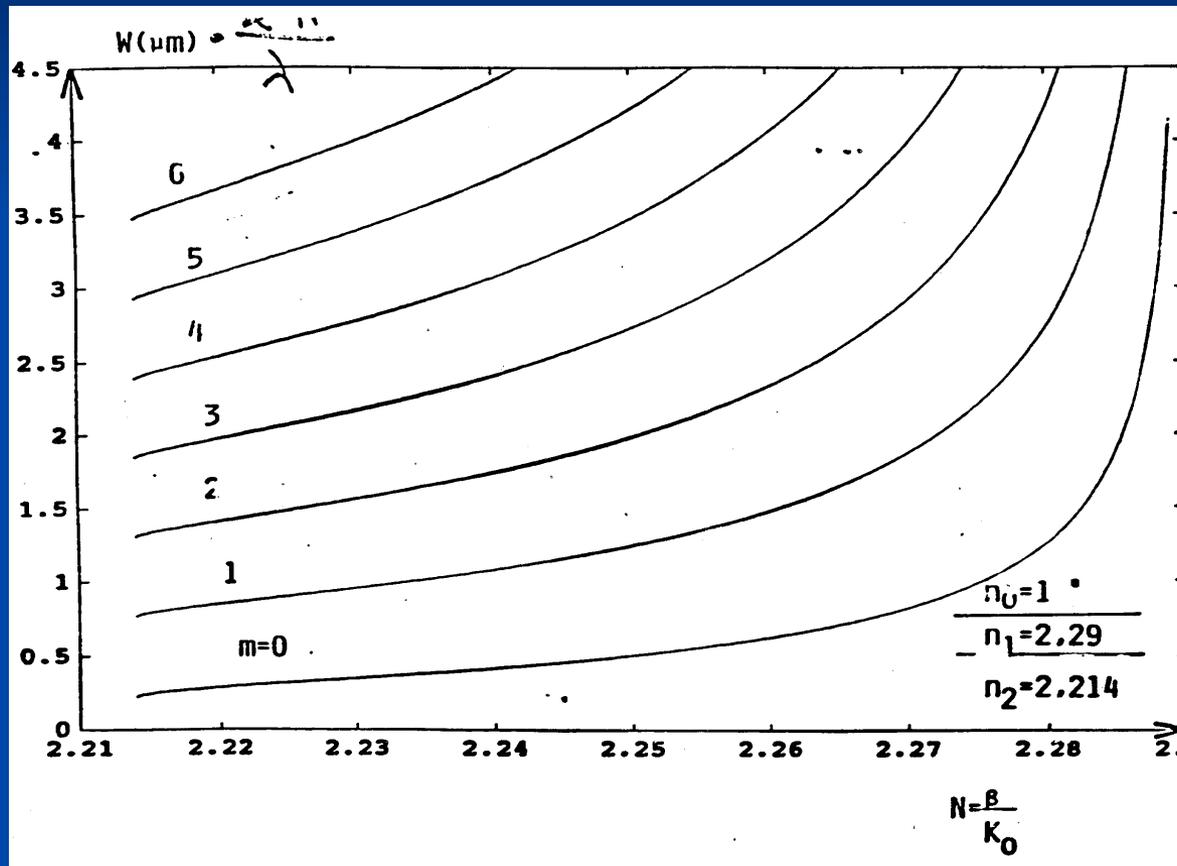
# Carta de Modos ou Diagrama de Dispersão

- Função do ângulo de inserção e da espessura do guia



# Carta de Modos ou Diagrama de Dispersão

- Função do índice efetivo de propagação ( $N$ ) e da espessura do guia



$$N = \frac{\beta}{k_0}$$

- Falta conhecer como a energia se distribui transversalmente em cada modo...

# Equações de Maxwell na sua forma diferencial

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{array} \right.$$

Relações Constitutivas:

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{M}$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$$

$\vec{P}$  é a polarização elétrica induzida

$\vec{M}$  é a polarização magnética induzida

$\sigma$  é a condutividade elétrica do material

Em  
materiais  
lineares 

# Equações de Maxwell na sua forma diferencial

Nos meios anisotrópicos (em que as propriedades do meio dependem da direção em que o mesmo é perturbado) as direções do campo elétrico  $\vec{E}$  e da densidade de fluxo elétrico  $\vec{D}$  podem não coincidir, e pode ocorrer o mesmo entre as direções do campo magnético  $\vec{H}$  e da densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$ .

Pode-se definir a Polarização em termos da Susceptibilidade Linear ( $\chi$ ):

$$\vec{P}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \chi(\vec{r}, t - t') \vec{E}(\vec{r}, t') dt'$$

Para um meio dielétrico, não magnético, homogêneo, sem cargas e não condutor:  
 $\vec{M} = 0$ ,  $\rho_v = 0$ ,  $\sigma = 0$  e  $\vec{J} = 0$ .

$$\vec{P} = \epsilon_0 \cdot \chi^{(1)} \cdot \vec{E}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$\chi_{ij}^{(1)}$  é o tensor de susceptibilidade elétrica linear de ordem 1

# Equações de Maxwell - Equação de Onda

Através de substituições das equações anteriores, tem-se:

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial}{\partial t} [\epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P}]$$

## Equação de Onda

Utilizando a identidade vetorial de Lagrange, a equação diferencial de segunda ordem que descreve a propagação de uma perturbação do campo elétrico e magnético no meio é dada por:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{ij} \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}$$

## Perfis de Amplitude de Campo

Propagação dos campos eletromagnéticos utilizando as equações de Maxwell

$$(\nabla^2 + k^2)\vec{E} = 0 \text{ e } (\nabla^2 + k^2)\vec{H} = 0$$

$$\psi_0 = A \cdot e^{-k_{x0}(x-W)} \quad x > W$$

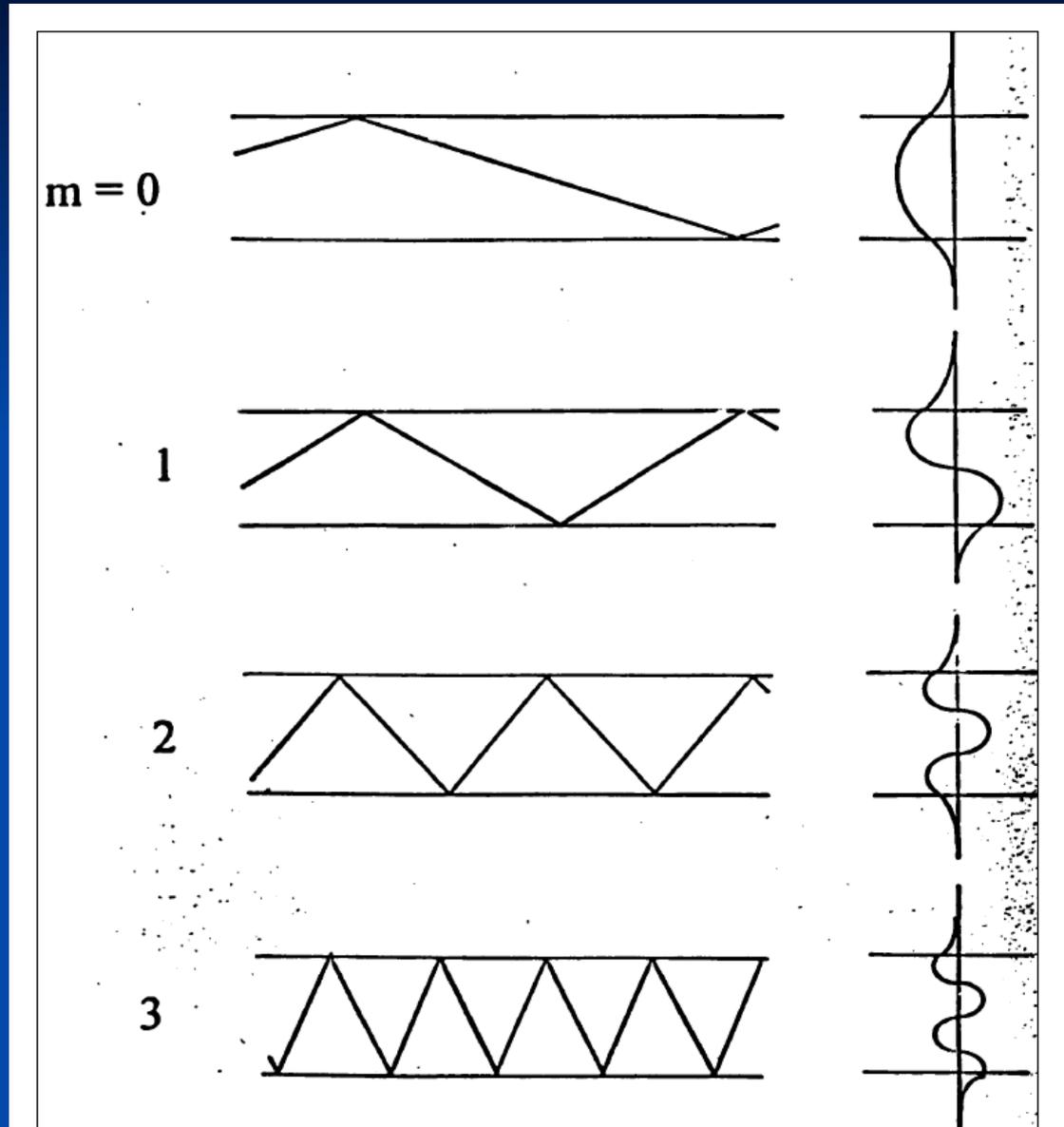
$$\psi_1 = B \cdot \cos(k_{x1} \cdot x) + C \cdot \text{sen}(k_{x1} \cdot x) \quad 0 < x < W$$

$$\psi_2 = D \cdot e^{k_{x2}x} \quad x < 0$$

$$k_{x1} = k_0 \sqrt{n_1^2 - n^2}, \quad k_{x2} = k_0 \sqrt{n^2 - n_2^2} \text{ e } k_{x0} = k_0 \sqrt{n^2 - n_0^2}$$

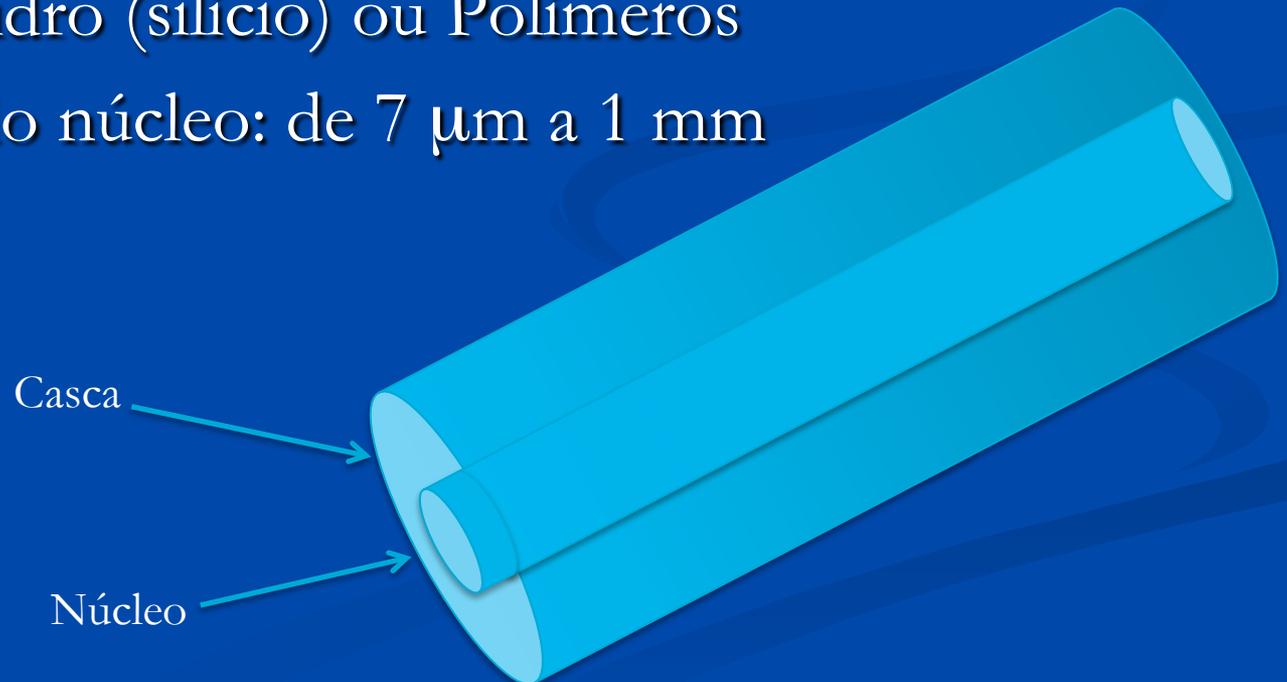
- O perfil da envoltória da amplitude dos campos dos modos guiados apresenta um comportamento de decaimento exponencial no substrato e na cobertura com um comportamento senoidal no interior do guia;
- Os campos que se estabelecem nas regiões de substrato e de cobertura são os chamados campos evanescentes e suas profundidades de penetração dependem das diferenças entre os índices de refração dos meios limítrofes.

# Perfis de Amplitude dos Campos



# Propagação em Fibras Ópticas

- Fibras Ópticas consistem em estruturas :
  - cilíndricas;
  - filamentosas,
  - com duas regiões de índices de refração diferentes: uma central (núcleo) e uma periférica (casca).
- Materiais: Vidro (silício) ou Polímeros
- Diâmetros do núcleo: de  $7\ \mu\text{m}$  a  $1\ \text{mm}$



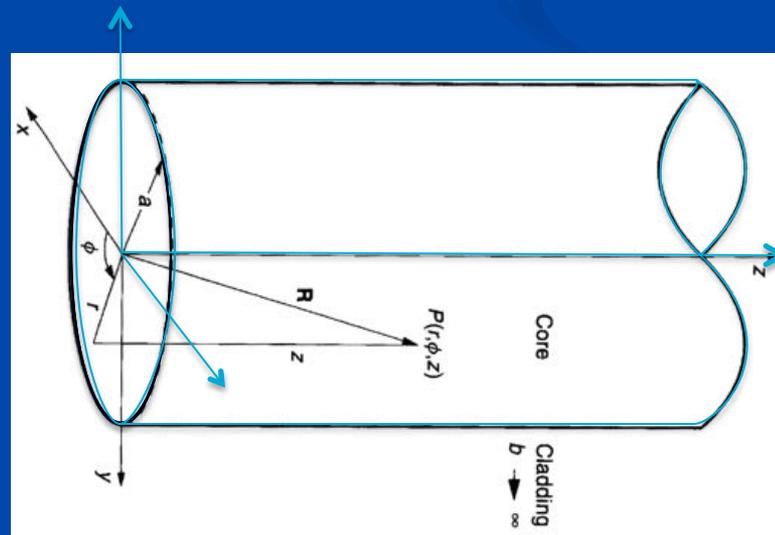
# Guiagem em Fibras Ópticas

## ■ Modos em Fibras

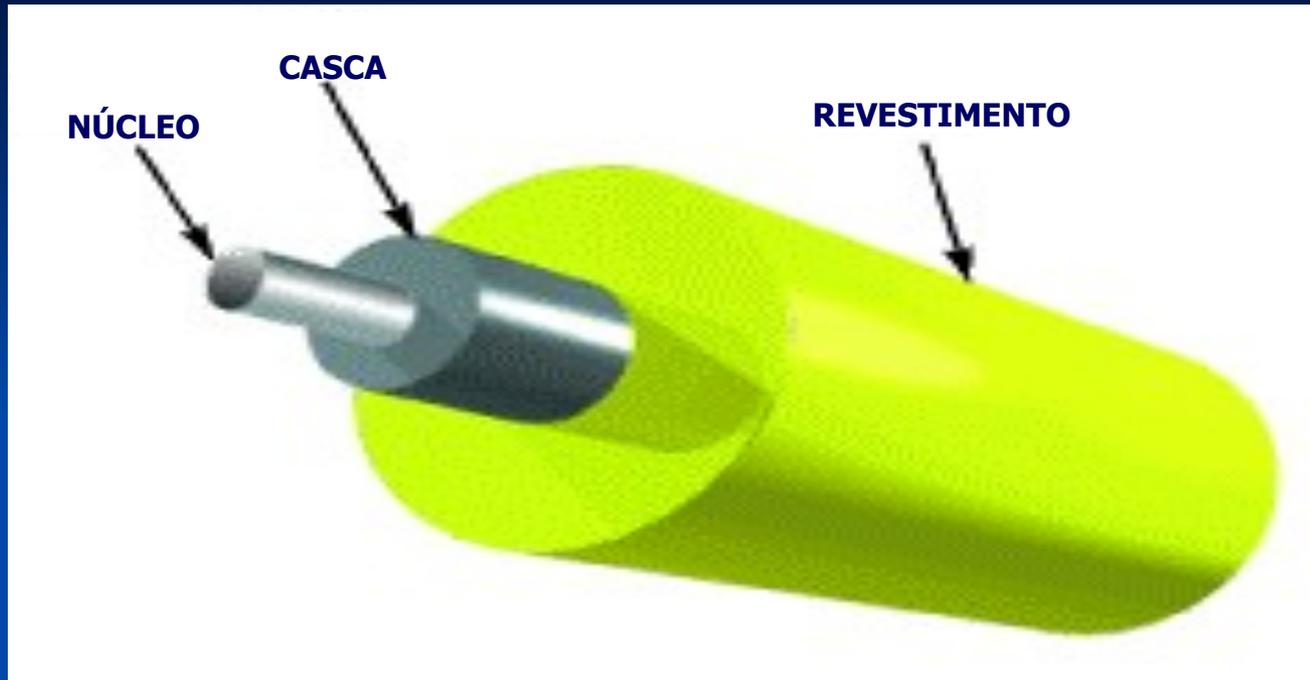
### ■ Equações de Maxwell no Domínio da Frequência

$$\nabla^2 \tilde{\vec{E}} + n^2(\omega) k_0^2 \tilde{\vec{E}} = 0$$

- $n = n_1$  (dentro do núcleo) e  $n = n_2$  (na região da casca)



# Definição de Fibra Óptica



É um guia de onda dielétrico de simetria cilíndrica que confina radiação eletromagnética na região das frequências ópticas (visíveis ou infravermelhas), ou seja, é uma estrutura não metálica que possui uma direção característica ao longo da qual uma onda óptica inserida propaga-se com pequena perda. Ela é constituída de material dielétrico, plástico ou de vidro, em forma cilíndrica, transparente e flexível, de dimensões microscópicas, comparáveis às de um fio de cabelo. O núcleo é dopado com  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  e F.

# Classificação das Fibras Ópticas

- Primeiramente quanto ao número de modos

- monomodo

núcleo com diâmetro reduzido ( $5\ \mu\text{m}$ ) e por isto comportam apenas um modo, apresentando índice de refração constante (o que caracteriza um fibra de índice em degrau);

- bimodais (não tem grande emprego em comunicações);

- multimodo (comporta vários modos de propagação).

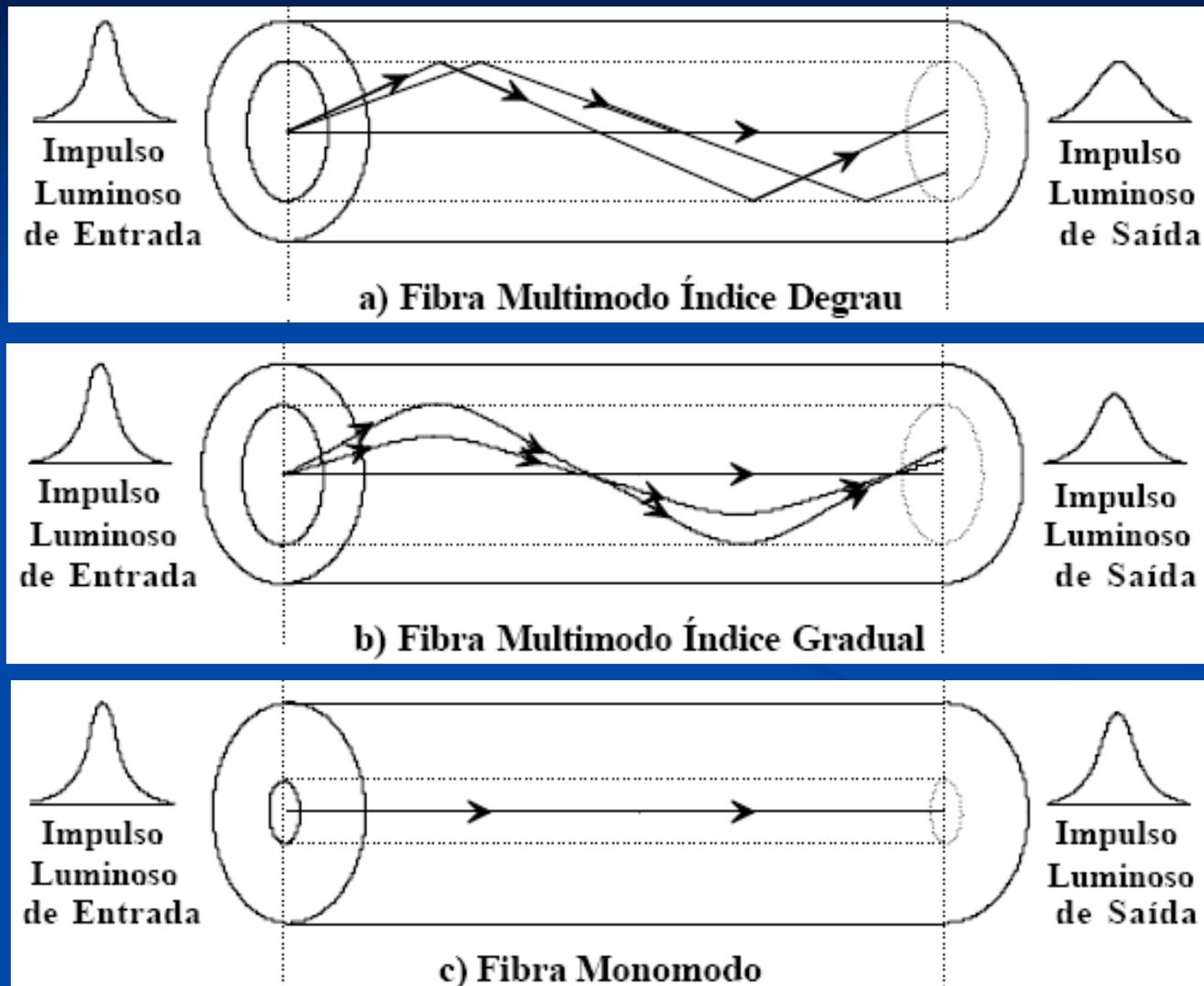
- Quanto ao perfil dos índices de refração do núcleo e da casca

- O índice de refração da casca é sempre constante e ligeiramente inferior ao do núcleo;

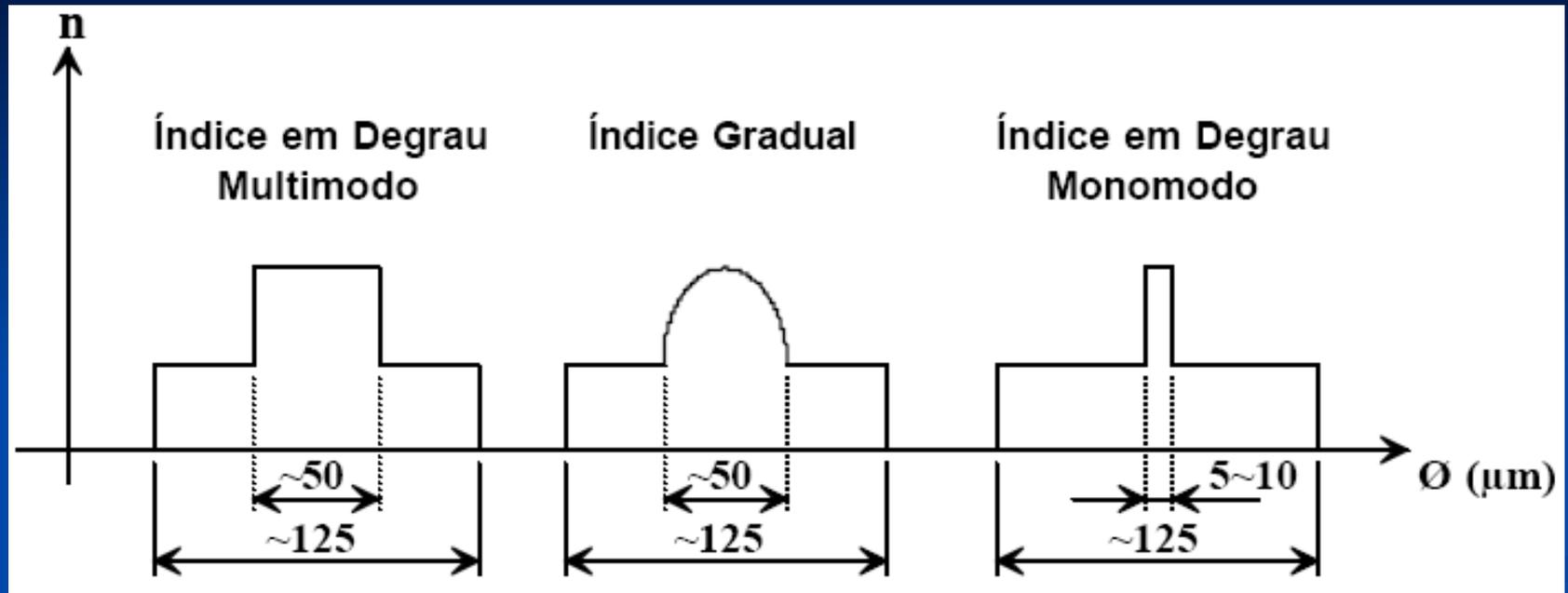
- As fibras multimodo podem ser de índice DEGRAU ou GRADUAL;

- Nas fibras ópticas de índice degrau, o índice de refração do núcleo é constante, sendo a diferença entre ele e o da casca da ordem de  $10^{-2}$  a  $10^{-3}$ .

# Tipos Básicos de Fibras Ópticas - Multimodo e Monomodo



# Tipos Básicos de Fibras Ópticas - Multimodo e Monomodo



- Multimodo Índice Degrau: núcleo com dimensões de 50 a 400  $\mu\text{m}$ , atenuação elevada (maior que 5 dB/km) e operam em  $\lambda = 850$  nm;
- Multimodo Índice Gradual: diâmetro típico do núcleo de 50; 62,5 e 80  $\mu\text{m}$ , atenuação típica de 3 dB/km e operam em  $\lambda = 850$  nm e  $\lambda = 1310$  nm;
- Monomodo: **diâmetro do campo modal** de 8,6 a 9,5  $\mu\text{m}$ , atenuação típica de 0,25 dB/km e operam em  $\lambda = 1310$  nm e  $\lambda = 1550$  nm;

## Perfil de Índice de Refração

- Nas fibras de índice gradual o índice de refração do núcleo varia em função do raio da fibra segundo a relação:

$$n(r) = n_1 \cdot \left[ 1 - 2\Delta \left( \frac{r}{a} \right)^g \right]^{1/2}$$

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - 2\Delta)^{1/2}$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

$$n(r) \cong n_1 \left[ 1 - \Delta \left( \frac{r}{a} \right)^g \right]$$

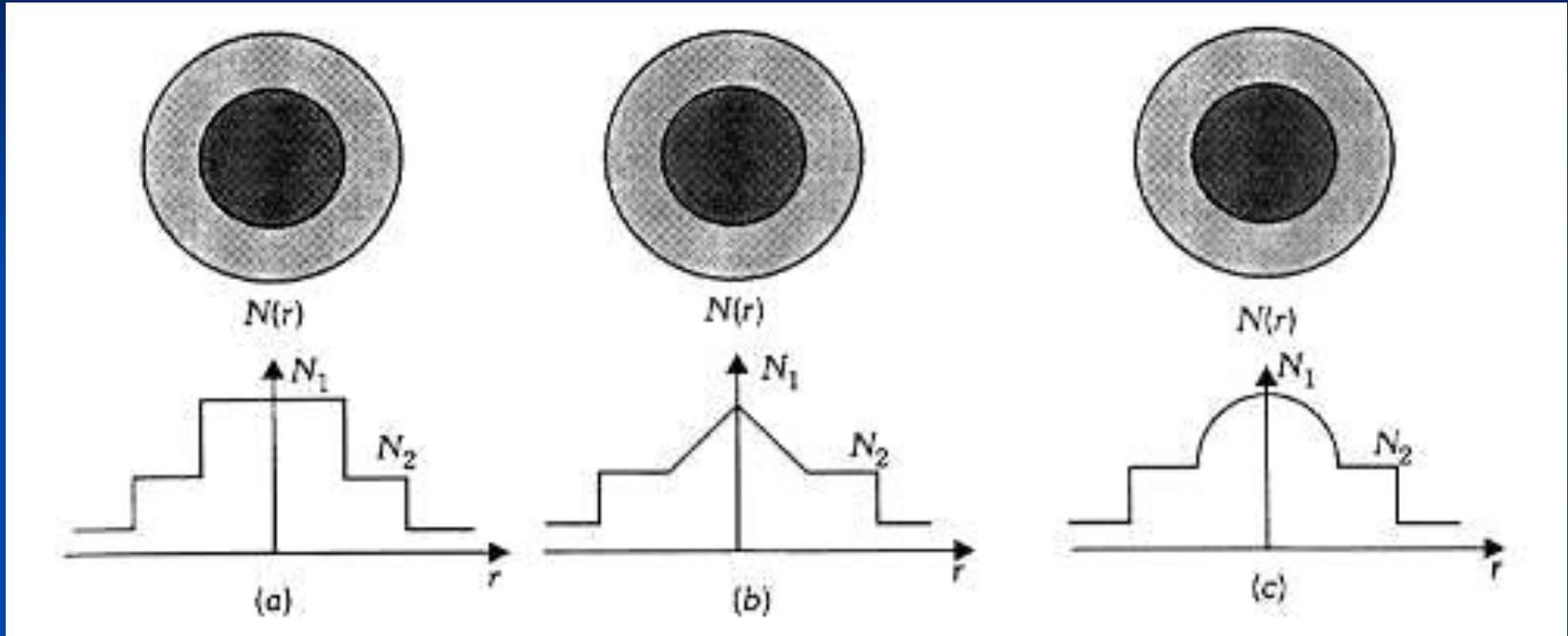
$$n_2 \cong n_1 (1 - \Delta)$$

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

**VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE  
REFRAÇÃO NÚCLEO-CASCA**

**APROXIMAÇÃO**

# Perfil de Índice de Refração

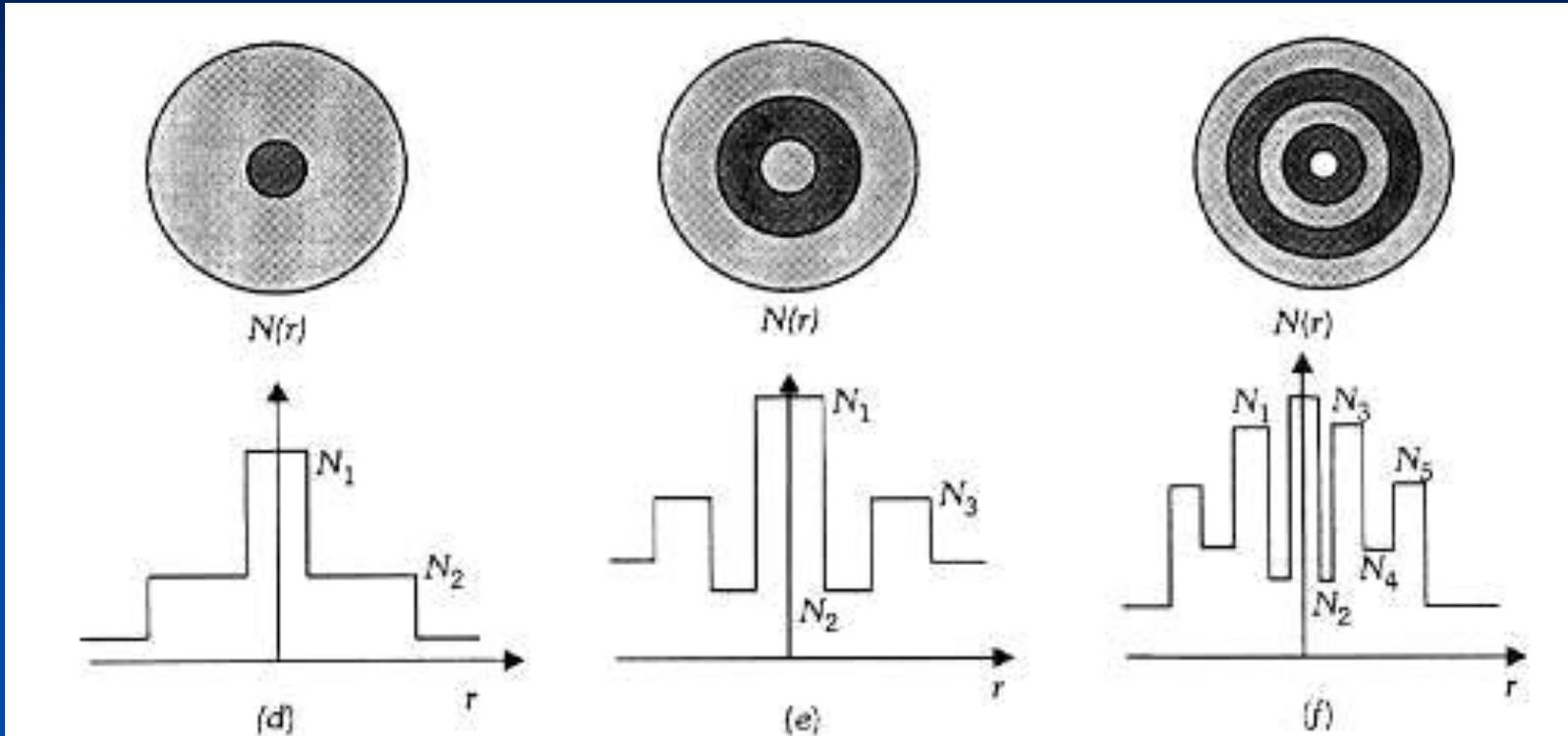


(a) Fibra com índice de refração em degrau.

(b) Fibra com índice de refração linear.

(c) Fibra com índice de refração parabólico.

# Perfil de Índice de Refração

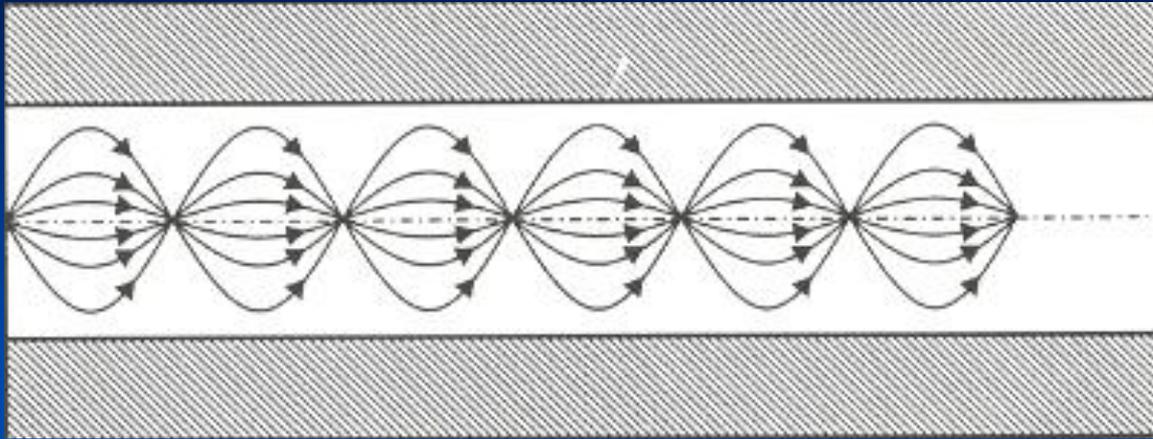


(d) Fibra de índice em degrau de tipo monomodo.

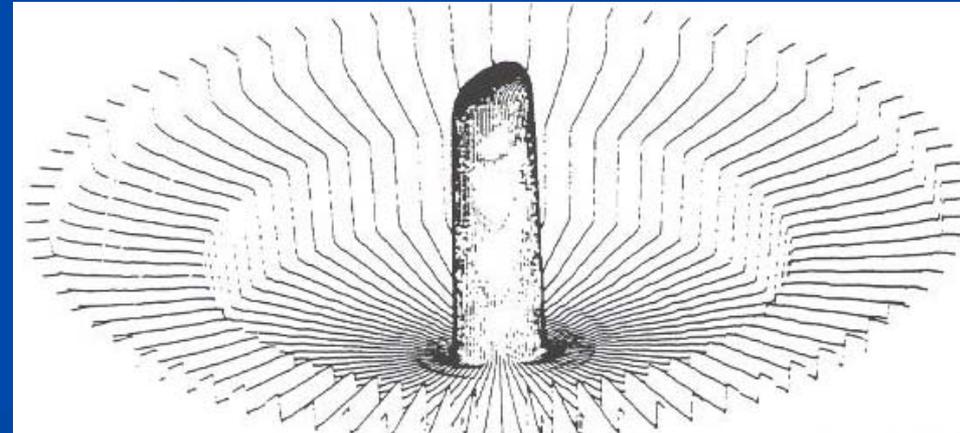
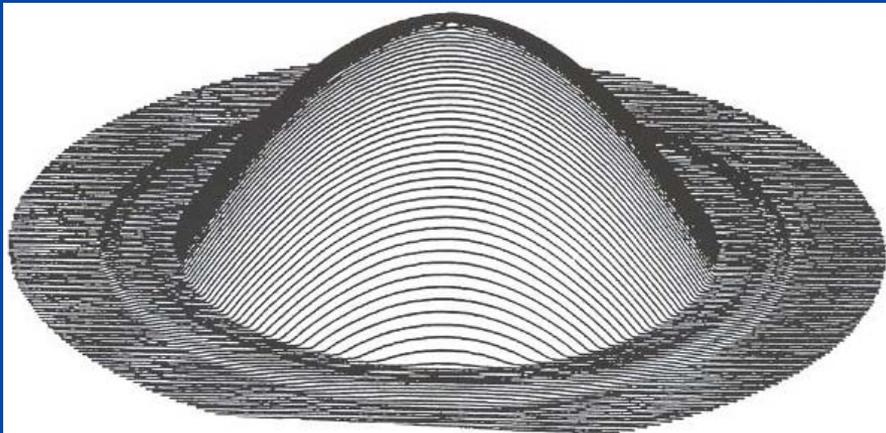
(e) Fibra com índice em W.

(f) Fibra com cobertura quádrupla.

## Perfil de Índice de Refração



- Fibra óptica com núcleo de índice de refração gradual, com perfil aproximadamente hiperbólico



## Atenuação

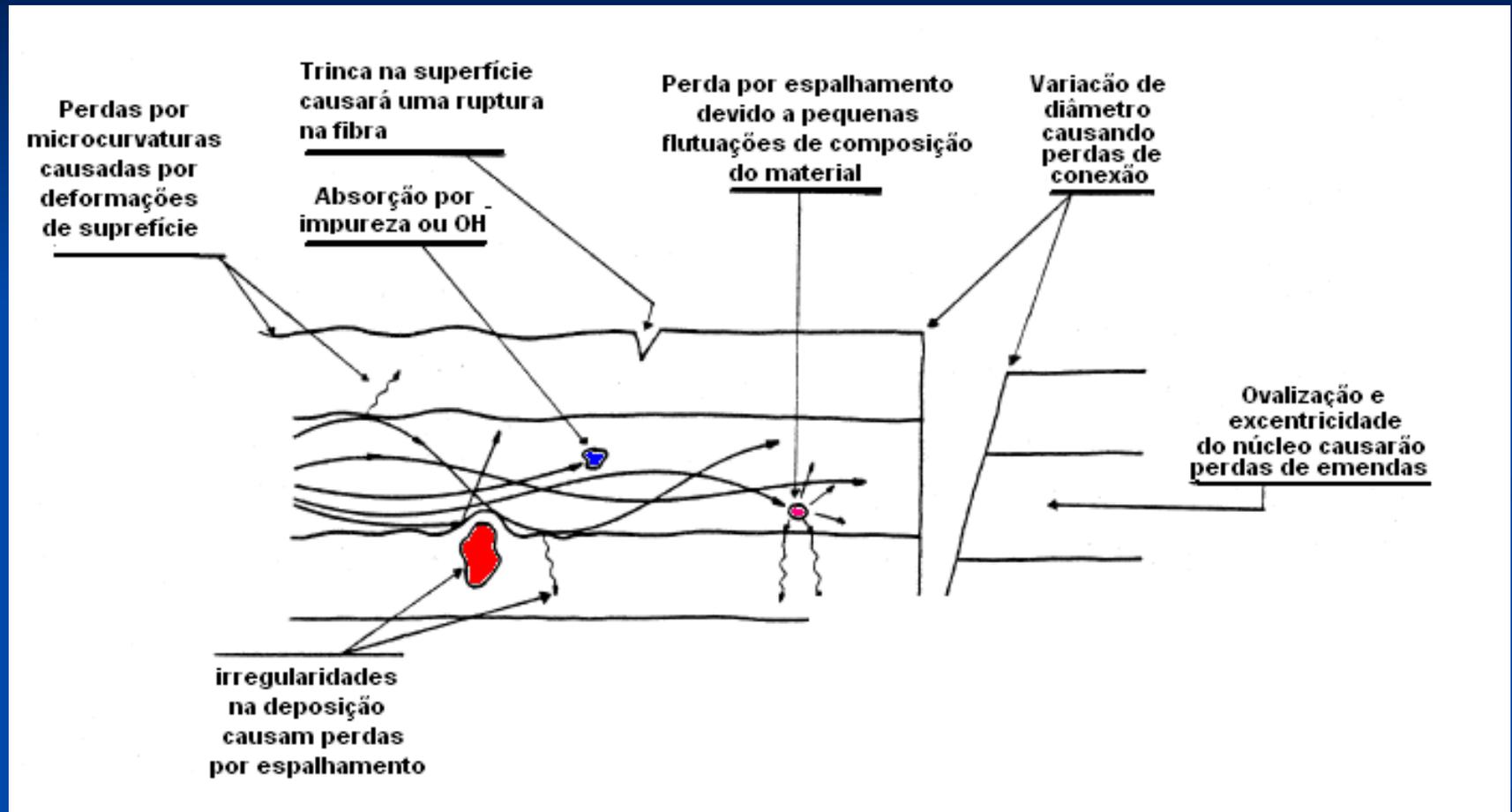
É a perda na transmissão devido à diminuição da intensidade de energia de um sinal ao se propagar através de um meio (fibra óptica).

$$\alpha \text{ (dB)} = 10 \cdot \log \frac{P_e \text{ (mW)}}{P_s \text{ (mW)}}$$

## Absorção Material

- Mecanismo de atenuação que exprime a dissipação de parte da energia luminosa transmitida numa fibra óptica em forma de calor

# Atenuação



Mecanismos que influenciam a atenuação nas fibras

# Atenuação – Absorção Material

## Fatores Extrínsecos

- **Íons Metálicos:** fabricação de fibras ópticas contém íons metálicos (Mn, Ni, Cr, U, Co, Fe e Cu), os quais propiciam o fenômeno da absorção na região da luz visível;
- **Íons de Hidroxila  $\text{OH}^-$ :** incorporado ao núcleo quando da sua fabricação, sendo muito difícil de ser eliminado.

## Fatores Intrínsecos

- **Absorção do Ultravioleta:** íons de oxigênio, cuja atenuação cresce exponencialmente na direção do ultravioleta;
- **Absorção do Infravermelho:** a vibração e rotação dos átomos do vidro em torno de sua posição de equilíbrio, cuja atenuação cresce exponencialmente em direção ao infravermelho.

## Atenuação – Espalhamento

Dispersão causada pelo próprio material, por imperfeições e bolhas no núcleo da fibra óptica.

### Espalhamento de Rayleigh

- Resulta em consequência de irregularidades microscópicas na composição e na densidade do material, que surgem durante as etapas de fabricação da fibra óptica;
- As perturbações do meio devem estar separadas de uma distância muito menor do que o comprimento de onda do sinal luminoso. Assim, cada irregularidade age como se fosse puntiforme para o espalhamento da irradiação.

$$\alpha_R = ( 0,75 + 66 \Delta n_{Ge} ) \lambda^{-4}$$

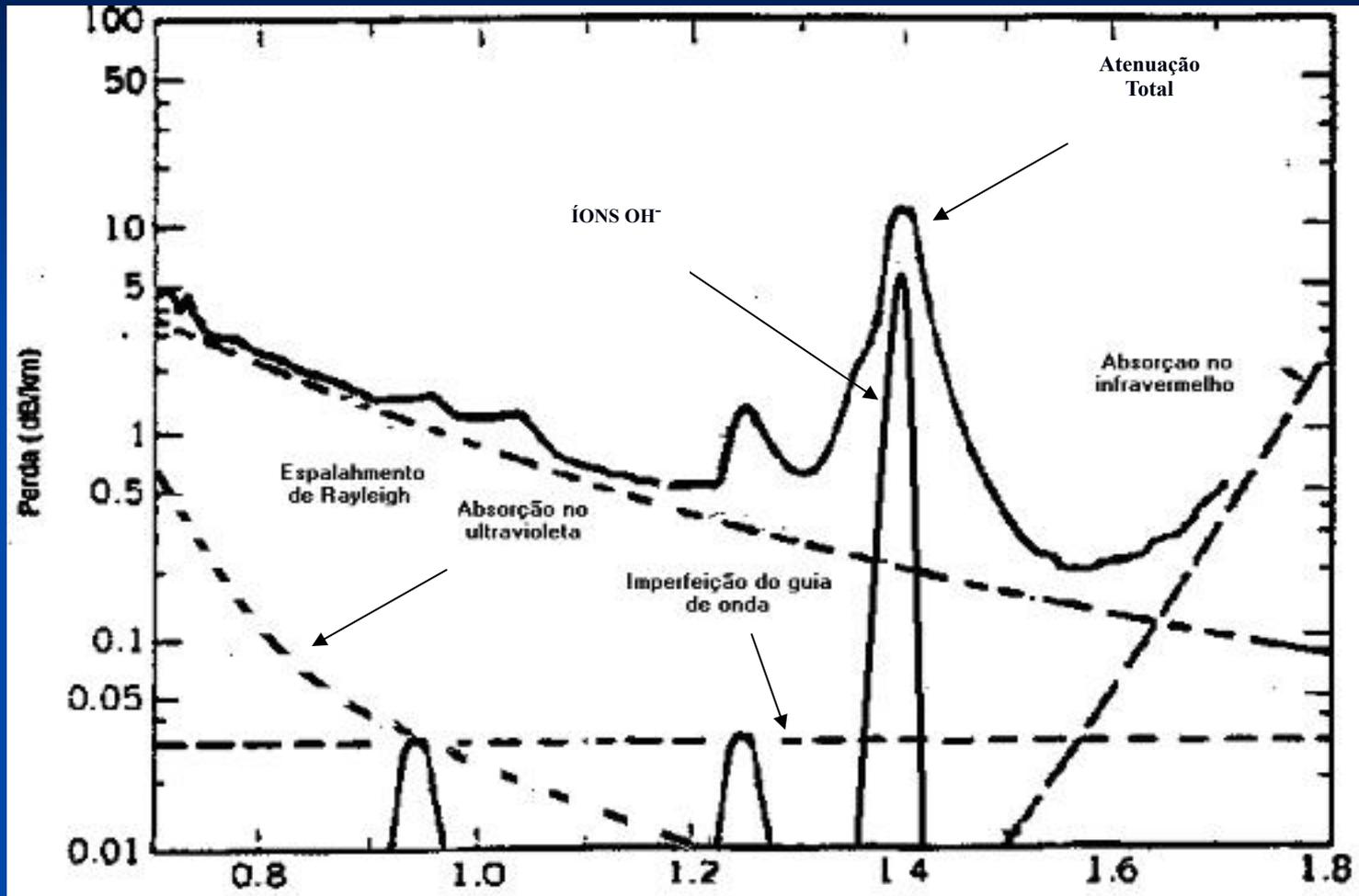
### Espalhamento de Mie

- O comprimento de onda do sinal é maior ou da mesma ordem de grandeza da separação entre as irregularidades na fibra óptica;

### Espalhamentos Estimulados de Raman e Brillouin

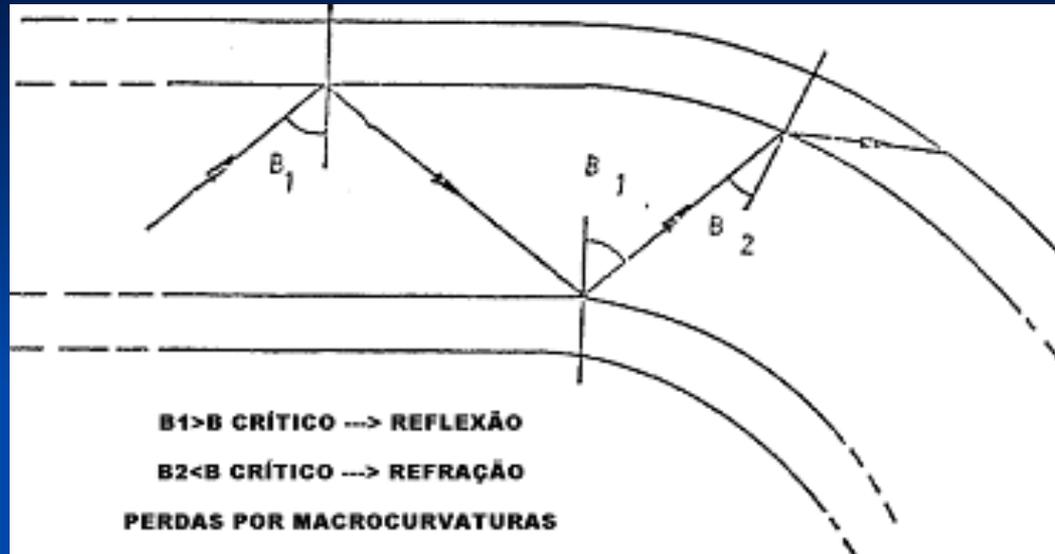
- Efeitos não lineares causados por elevado campo elétrico no seu interior.

# Curva de Atenuação

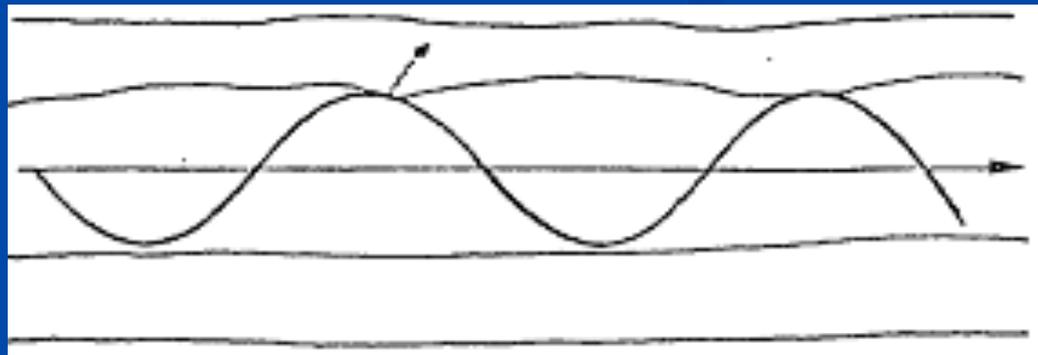


Curva de atenuação típica para fibra óptica índice degrau

# Característica de Transmissão

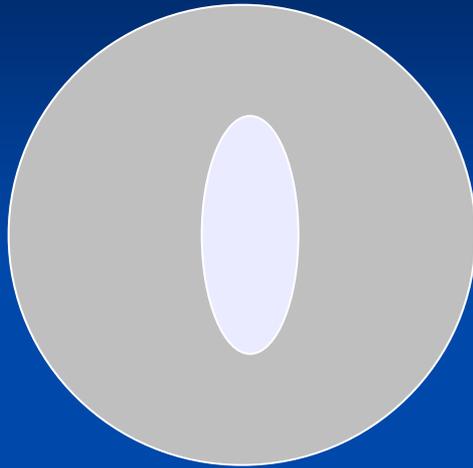


Macrocurvatura

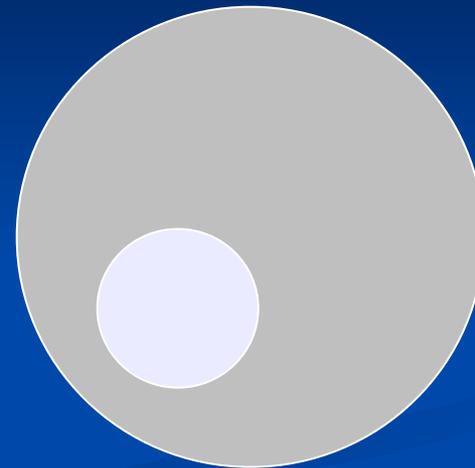


Microcurvatura

# Característica de Transmissão – Causas de Perdas em Conexões



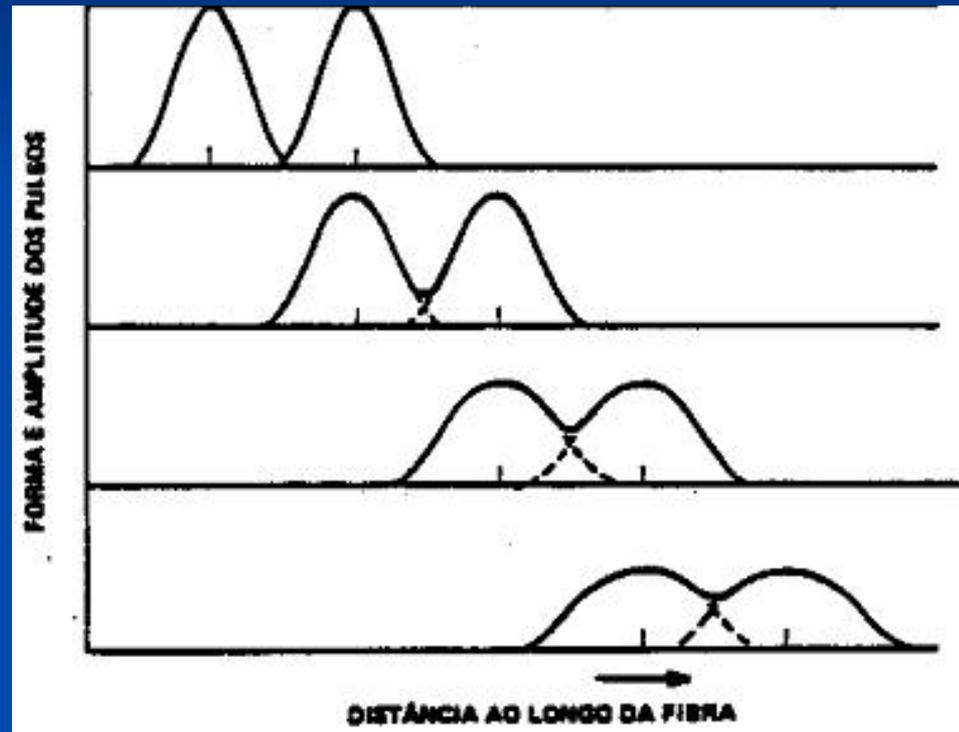
**Ovalização do núcleo**



**Excentricidade entre núcleo e casca**

# Dispersão

- A dispersão em fibras ópticas é uma característica de transmissão que exprime o alargamento dos pulsos transmitidos.



DISPERSÃO E ATENUAÇÃO DE DOIS PULSOS  
ADJASCENTES SE PROPAGANDO NUMA FIBRA

# Dispersão Modal e Cromática

## Modal

- Este tipo de dispersão só existe em fibras do tipo multimodo (degrau e gradual) e é provocada basicamente pelos vários caminhos possíveis de propagação (modos) que a luz pode ter no núcleo;
- O perfil de índice gradual foi criado para diminuir a distorção dos pulsos luminosos por dispersão modal presente nas fibras multimodo (energia de um pulso luminoso quando acoplada à fibra se distribui entre os vários modos).
- Como cada modo propaga-se por um percurso diferente ao longo da fibra a velocidade e o tempo de propagação da energia transmitida em cada modo é diferente.
- Quando o pulso luminoso deixa a fibra as energias dos diversos modos se combinam dando origem a um pulso mais "alongado".
- A dispersão modal inexiste em fibras monomodo, pois apenas um modo será guiado.

# Dispersão Cromática

Esse tipo de dispersão depende do comprimento de onda e divide-se em dois tipos:

- **Dispersão Material**
- **Dispersão de Guia de Onda**

## Dispersão Material

- Devido à não linearidade do índice de refração do material do núcleo em relação ao comprimento de onda da luz, gerada por microvariações na estrutura cristalina deste material;
- Cada comprimento de onda enxerga um valor diferente de índice de refração num determinado ponto. Logo, cada comprimento de onda viaja no núcleo com velocidade diferente, provocando uma diferença de tempo de percurso.

# Dispersão Cromática

## Dispersão de Guia de Onda

- Não monocromaticidade da fonte luminosa. Como nenhuma fonte de luz real emite apenas uma única linha espectral, mas apresenta uma largura de faixa em torno de um comprimento de onda central e a velocidade de propagação da luz depende de seu comprimento de onda, a energia de um pulso luminoso distribuída neste espectro de frequências;
- Ao ingressar na fibra irá se espalhar no espaço e se deformar no tempo, mesmo que só haja um modo de propagação;
- Provocado por variações nas dimensões do núcleo e variações no perfil de índice de refração ao longo da fibra óptica;
- Essa dispersão só é percebida em fibras monomodo que tem dispersão material reduzida.

# Dispersão

- Estes dois últimos tipos de dispersão tornam-se particularmente importantes em fibras monomodo, pois nas multimodo a dispersão modal costuma ser muito maior que ambas e mascará-las.
- É possível obter fibras monomodo com dispersão total próxima de zero, para um determinado comprimento de onda, atuando sobre a dispersão do material a fim de contrabalançar a dispersão cromática. Tais fibras, chamadas *fibras "shiftadas"*, vem se tornando importantes para as comunicações por sua maior capacidade de transmissão de informações.

## Cálculo da Dispersão ( $\sigma$ )

$$\sigma = \sqrt{(\Delta\tau)^2 + (\sigma_{\text{crom}})^2}$$

$\sigma$  = Dispersão (ps)

$\Delta\tau$  = Dispersão Modal (ps)

$\sigma_{\text{crom}} = D \cdot \Delta\lambda \cdot L$  = Dispersão Cromática (ps)

onde:

$D$  = Coeficiente de Dispersão Cromática (ps/nm.km)

$\Delta\lambda$  = Largura Espectral da Fonte Óptica (nm)

$L$  = Comprimento da Fibra Óptica (km)

Em fibras monomodo a dispersão modal é nula:

$$\sigma = \sigma_{\text{crom}} \text{ (ps)}$$

# Tipos Básicos de Fibras Ópticas - Monomodo

- **Monomodo de Dispersão Deslocada (DS)**: diâmetro do campo modal de 7,8 a 8,5  $\mu\text{m}$ , atenuação típica de 0,23 dB/km e operam em  $\lambda = 1550$  nm com dispersão cromática nula, apresentando alto impacto a efeitos não lineares;
- **Monomodo de Dispersão Deslocada Não Zero (NZD)**: diâmetro do campo modal de 8,0 a 11  $\mu\text{m}$ , atenuação típica de 0,23 dB/km e operam em  $\lambda = 1550$  nm, apresentando baixo impacto a efeitos não lineares quando comparada à fibra DS e trafega altas taxas de transmissão.