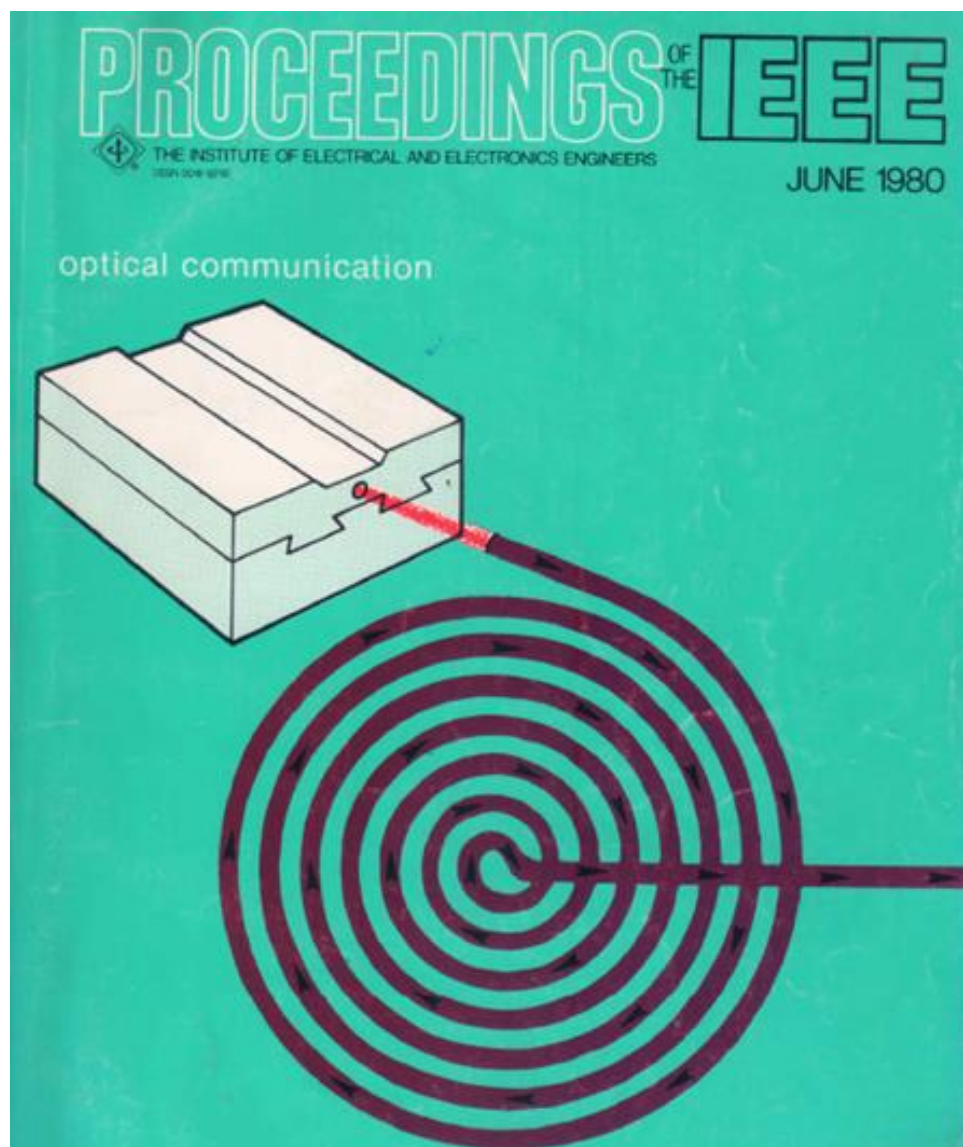


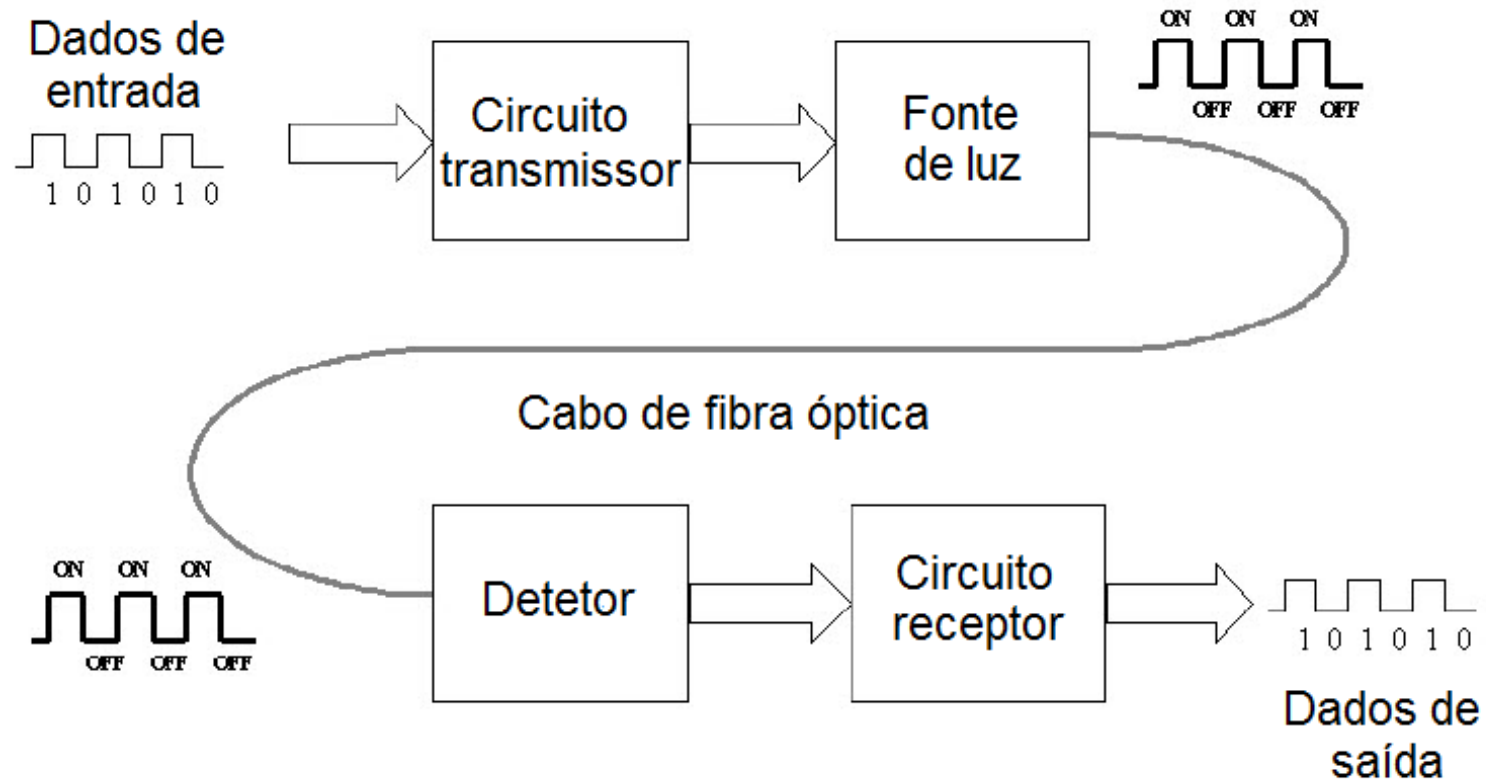
FIBRAS ÓPTICAS

PSI3483 – Ondas Eletromagnéticas em
meios guiados

Prof. José Kleber da Cunha Pinto



Sistemas de comunicações por fibra óptica

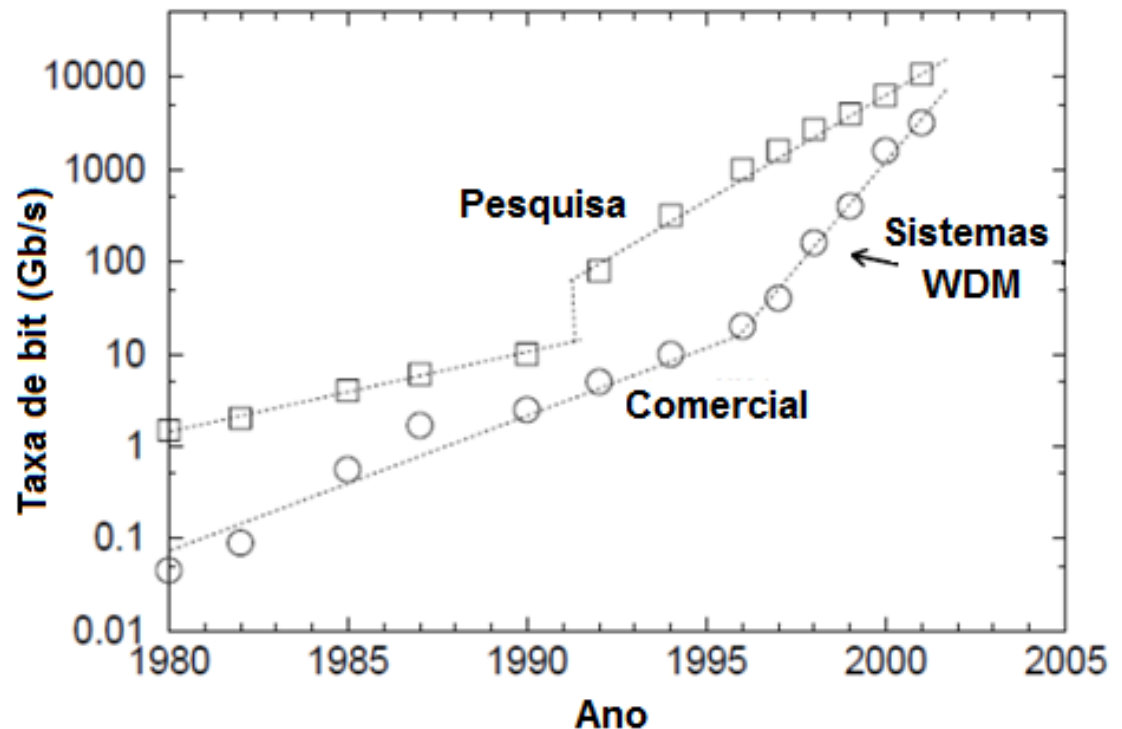


- Fibra óptica → meio guiado
- Conduz o sinal de luz, com a intensidade luminosa modulada pela informação

Vantagens de comunicação por fibras ópticas

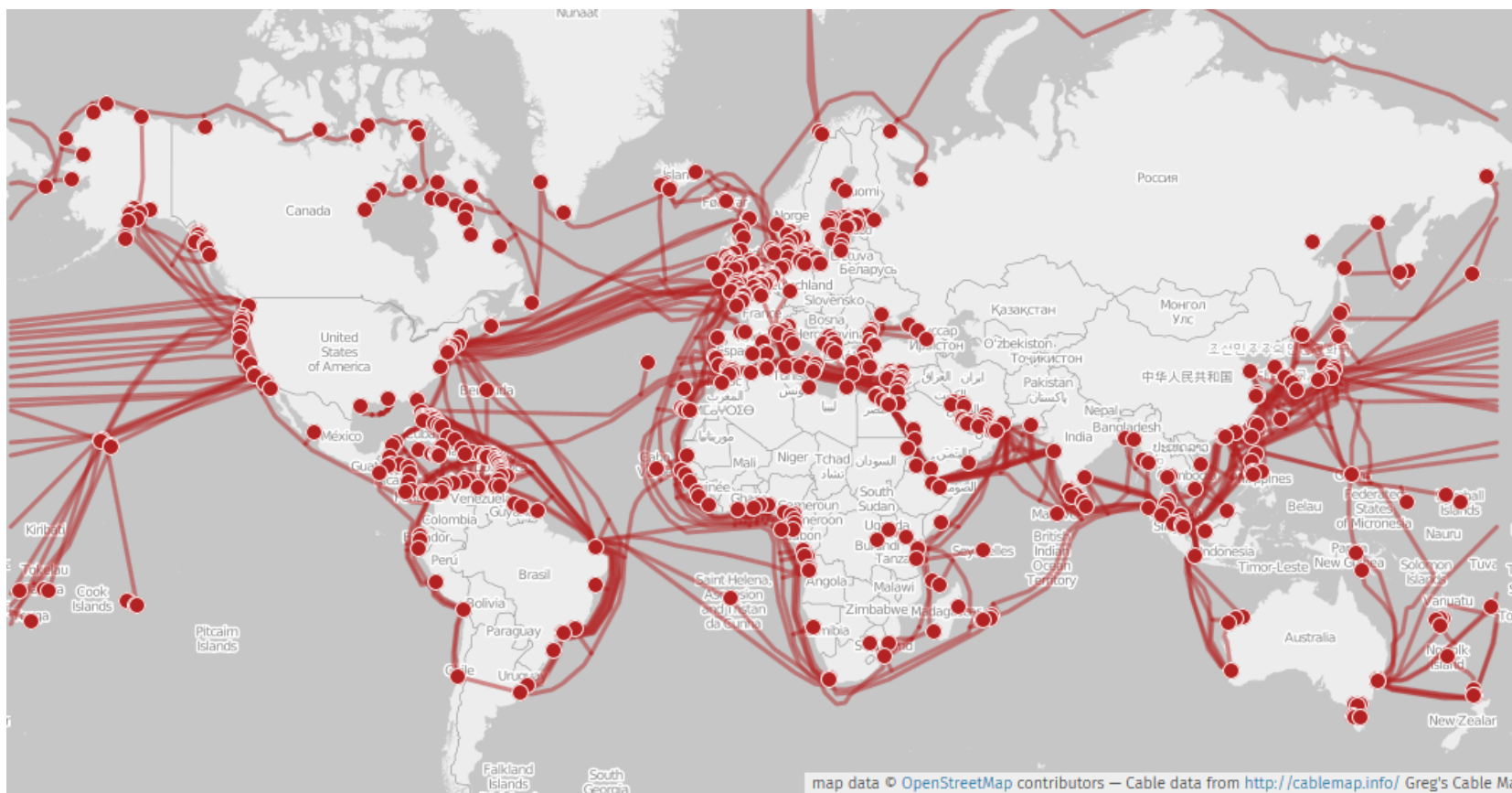
- Banda mais largas
- Altas taxas de transmissão
- Transmissão a longas distâncias com baixas perdas (0,1 dB/km)
- Imunidade a interferência eletromagnética

Desempenho de sistemas ópticos a partir de 1980



Exemplo de Sistema Óptico

- Comunicação intercontinental
- Cabos submarinos de fibra óptica



Instalação de cabos submarinos de fibra óptica

Cables ship

“Sir Erik Sharp”

Navio que coloca
cabos de fibra óptica
no fundo do mar

Vídeo ilustrativo

https://youtu.be/_T-wlGgB1zM

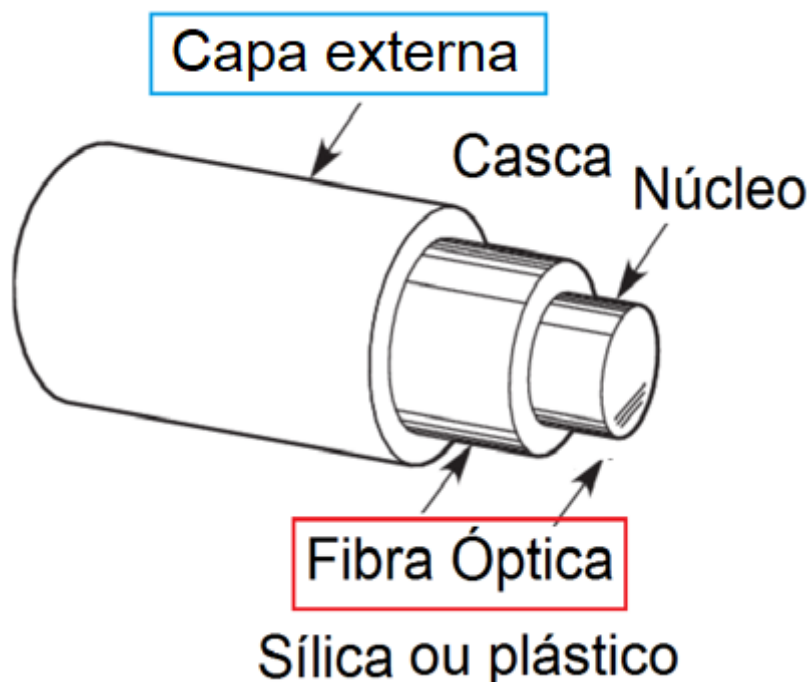
The capability of our cable-
laying Vessels



FIBRAS ÓPTICAS

Estrutura e exemplos de fibras ópticas

Estrutura da fibra óptica



Fibra óptica propriamente dita

- Núcleo ou “*core*”
 - Conduz o sinal de luz
- Casca ou “*cladding*”
 - Tem índice de refração inferior ao do núcleo
 - Confina a luz no núcleo

Componente adicional

- Capa externa
 - Proteção mecânica
 - Proteção a intempéries

FIBRAS ÓPTICAS

Exemplos de fibras ópticas



Fibras ópticas
sem capa protetora

Cabo de fibras ópticas

- Feixes de fibras ópticas agrupadas em um mesmo cabo
- Fibras ópticas com capas protetoras individuais

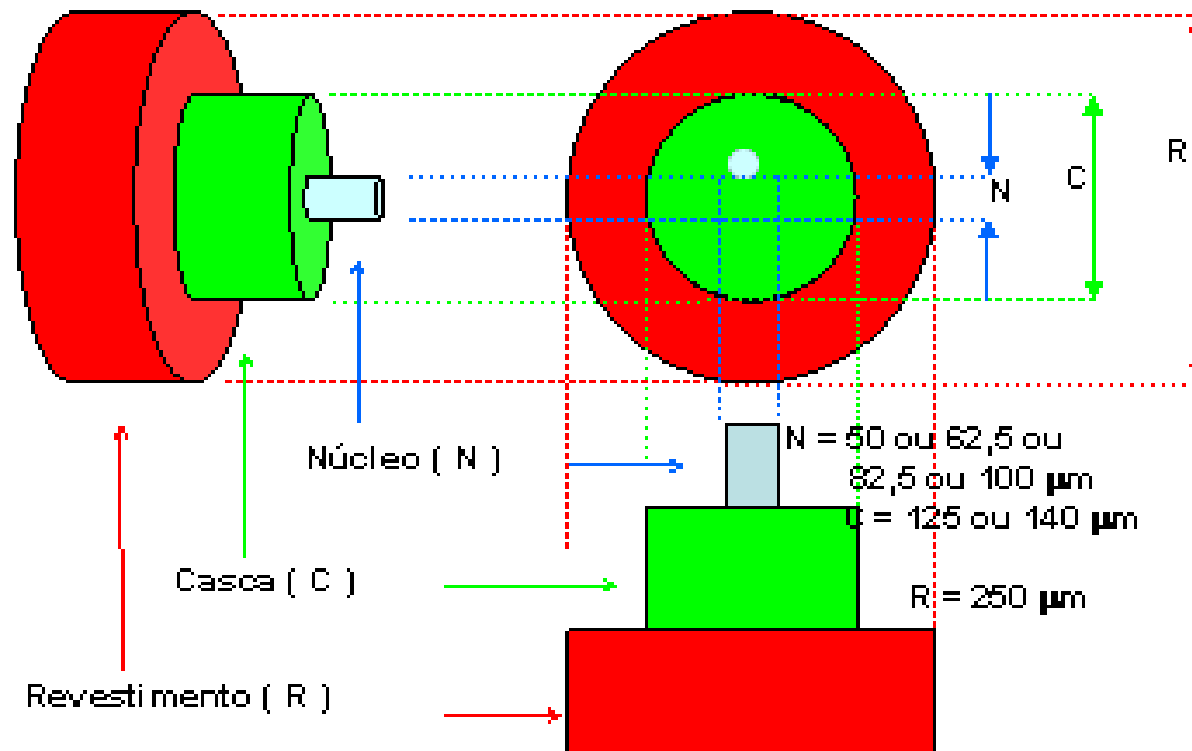


Sistemas de comunicações por fibra óptica

- Fibras ópticas multimodo
 - Aplicações de curta distância, que exigem baixo custo
 - Distribuição de TV de alta definição para assinantes
 - Distribuição de Internet com taxas de **300 Mb/s** (2019)
- Fibras ópticas monomodo
 - Transmissão de dados, voz e imagem a longa distância
 - Transmissão de altas taxas de bits
 - Sistemas DWDM – *Dense Wavelength Division Multiplexing*, usando vários comprimentos de onda, com taxas que totalizam **Tb/s**

Fibra Óptica Multimodo

Dimensões e geometria



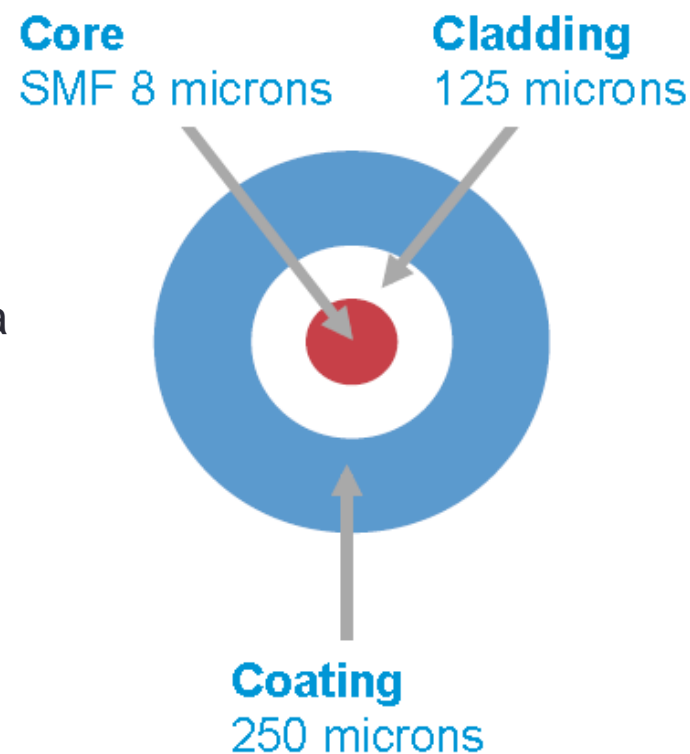
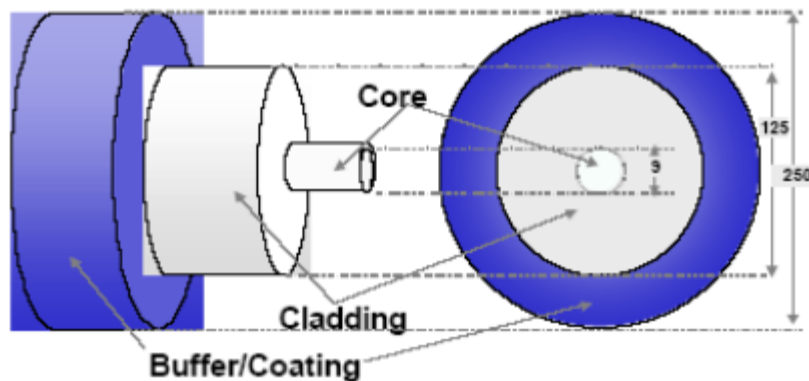
Fibra Óptica Multimodo, Índice Degrau.

Fibra Óptica Monomodo

Dimensões e geometria

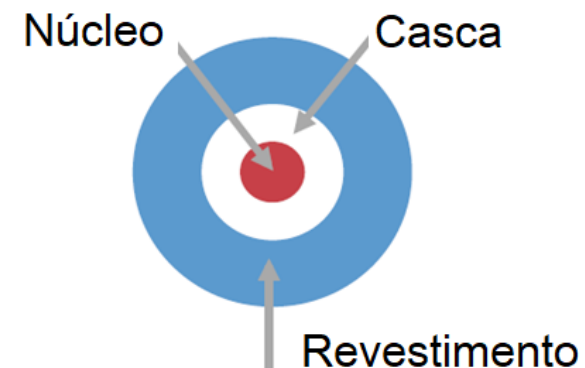
A fibra óptica monomodo é composta por 3 partes:

- O núcleo (Core) que é responsável pela transmissão da luz
- O índice de refração entre o núcleo e casca (cladding) que mantém a luz no interior da fibra
- A capa externa (coating) para a proteção da fibra



Fibras Ópticas

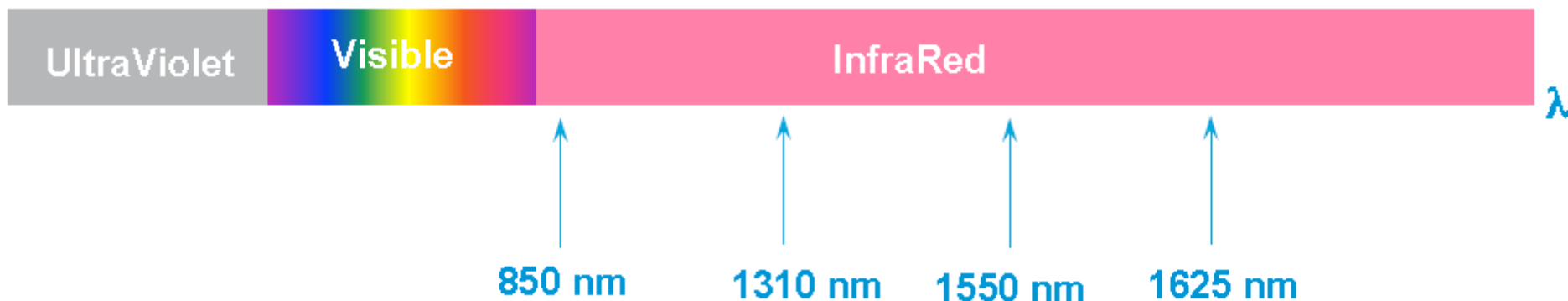
Dimensões e geometria



Diâmetros	Fibra Multimodo	Fibra Monomodo
Núcleo ou <i>core</i>	50 a 100 microns	8 microns
Casaca ou <i>cladding</i>	125 ou 140 microns	125 microns
Revestimento	250 microns	250 microns

FIBRAS ÓPTICAS

Região de operação → frequências de infravermelho



Regiões com **atenuação reduzida** em fibras ópticas comerciais

- 850 nm sobre fibra multimodo
- 1310 nm sobre fibra monomodo
- Banda-C: 1550 nm sobre fibra monomodo
- Banda-L: 1625 nm sobre fibra monomodo

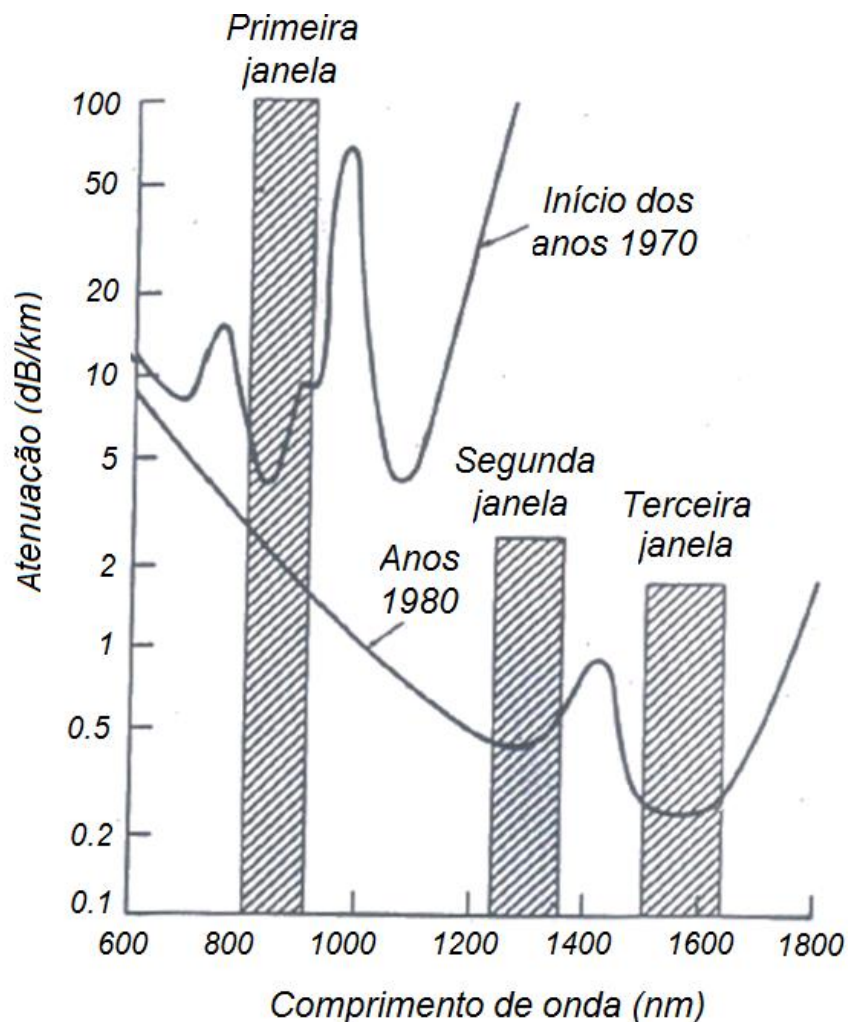
FIBRAS ÓPTICAS

Janelas - Bandas de utilização

Janela	Designação	Banda (nm)	Tipo de fibra	Aplicações
Primeira	—	820-900	Multimodal	LAN, Ethernet Ex: 1000 Base-Sx
Segunda	O	1260-1360	Monomodal (G.652)	Mono- λ PON, Ethernet
Terceira	C	1530-1565	Monomodal (G.655)	Mono- λ e WDM
Quarta	L	1565-1625	Monomodal (G.653)	WDM
Quinta	E	1350-1450	Monomodal (All Wave)	WDM
Sexta	S	1460-1530	Monomodal (G.652)	WDM, LAN PON

FIBRAS ÓPTICAS

Atenuação da fibra óptica em função do comprimento de onda

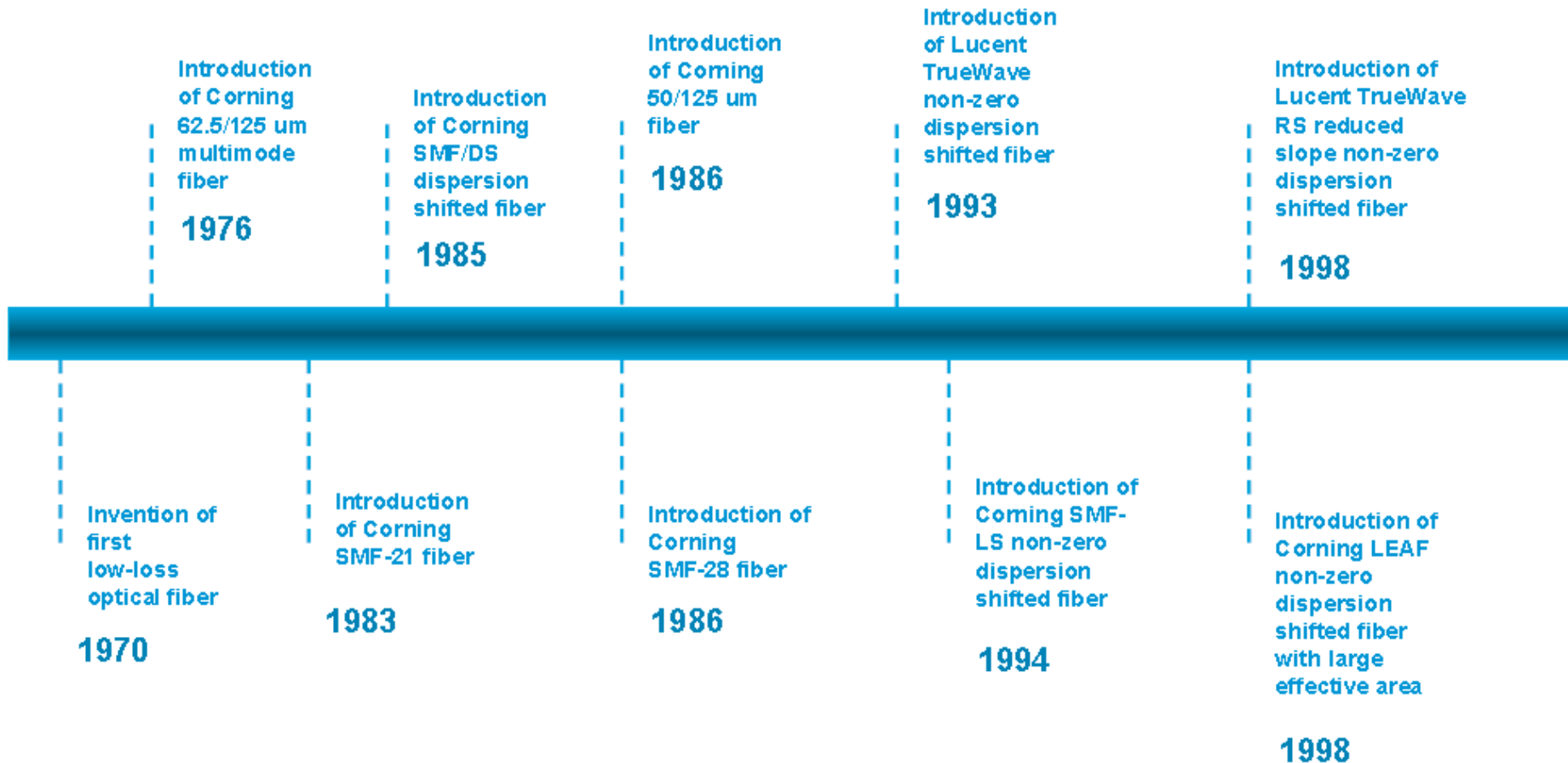


Janelas de utilização das fibras ópticas

- Faixas de comprimento de onda
 - Com baixa atenuação do sinal que se propaga na fibra óptica
- ← Exemplos da evolução da fibra óptica 1970 e 1980

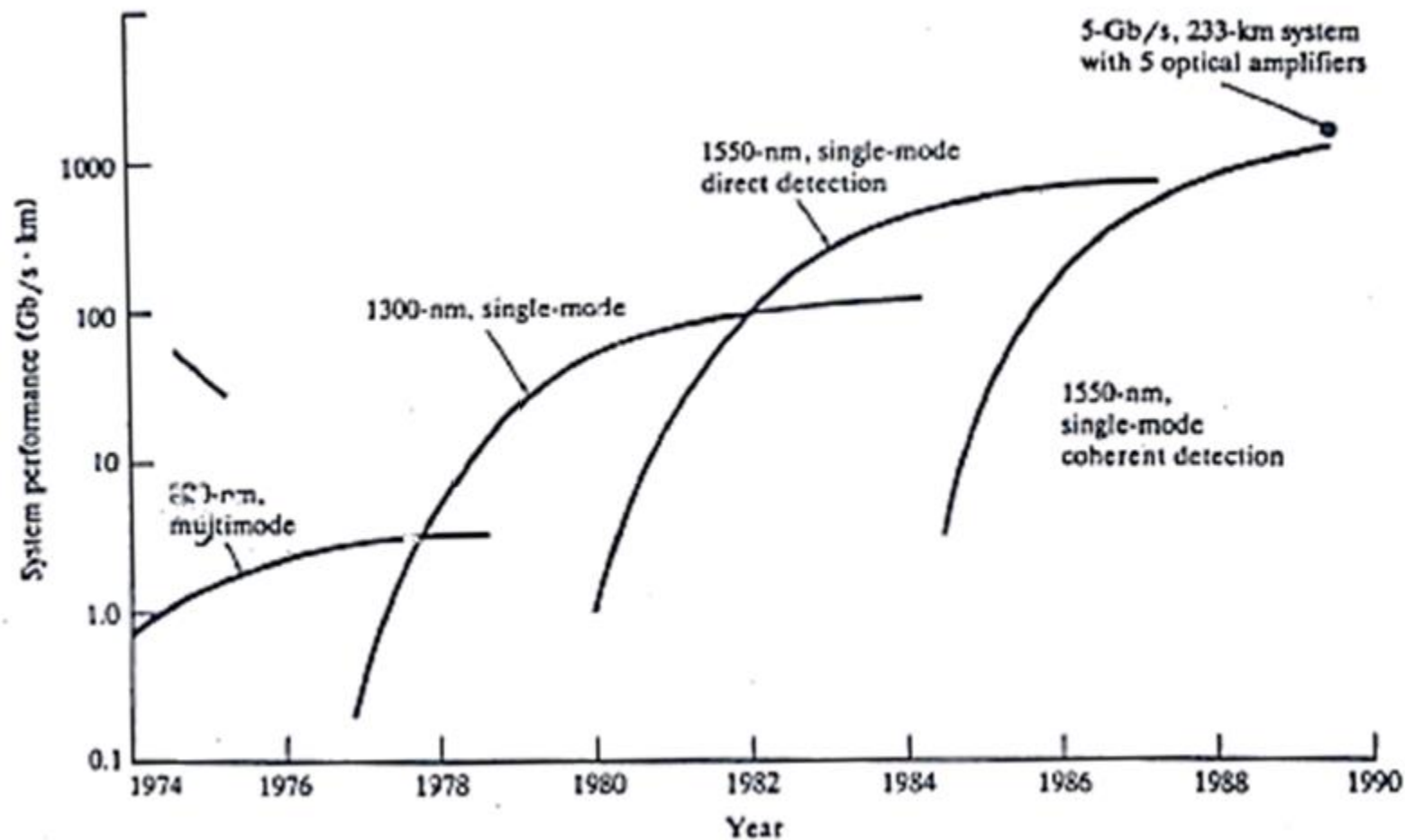
FIBRAS ÓPTICAS

Desenvolvimento das fibras ópticas



FIBRAS ÓPTICAS

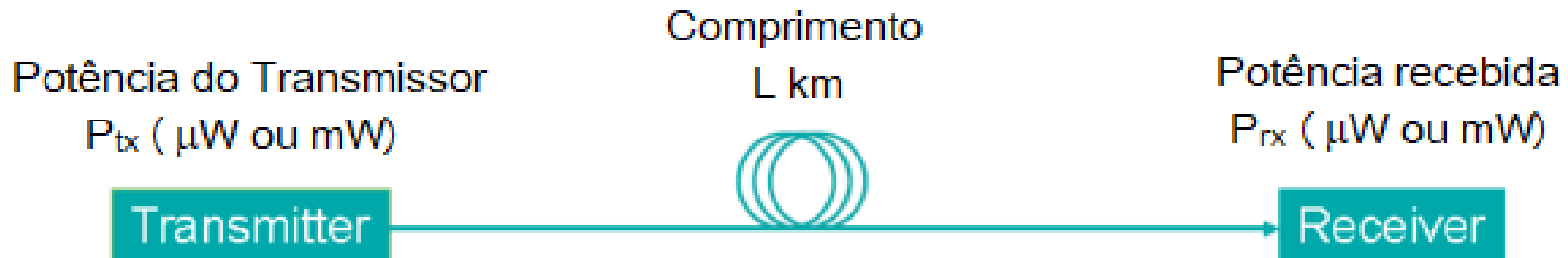
Evolução de quatro gerações de sistemas ópticos



FIBRAS ÓPTICAS

- Principais fenômenos que limitam o uso de fibras ópticas
 - Atenuação → reduz a amplitude dos pulsos de luz
 - limita a distância máxima de propagação
 - necessidade de maior número de repetidores
 - Dispersão → alarga os pulsos de luz
 - limita a taxa máxima de bits transmitidos
- Aperfeiçoamentos das fibras ópticas
 - Melhoria dos materiais → reduzir a atenuação
 - Perfil gradual de dopagem do núcleo → reduzir a dispersão

Atenuação da Fibra Óptica



- A atenuação da fibra óptica

$$\alpha(dB) = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{tx}}{P_{rx}} \right)$$

- Atenuação expressa em dB/km

$$\alpha(dB/km) = \frac{\alpha(dB)}{L(km)}$$

Atenuação da Fibra Óptica

Exemplo de cálculo de atenuação

- Fibra óptica com 10 km de comprimento
 - $P_{tx} = 10\mu W$
 - $P_{rx} = 6\mu W$

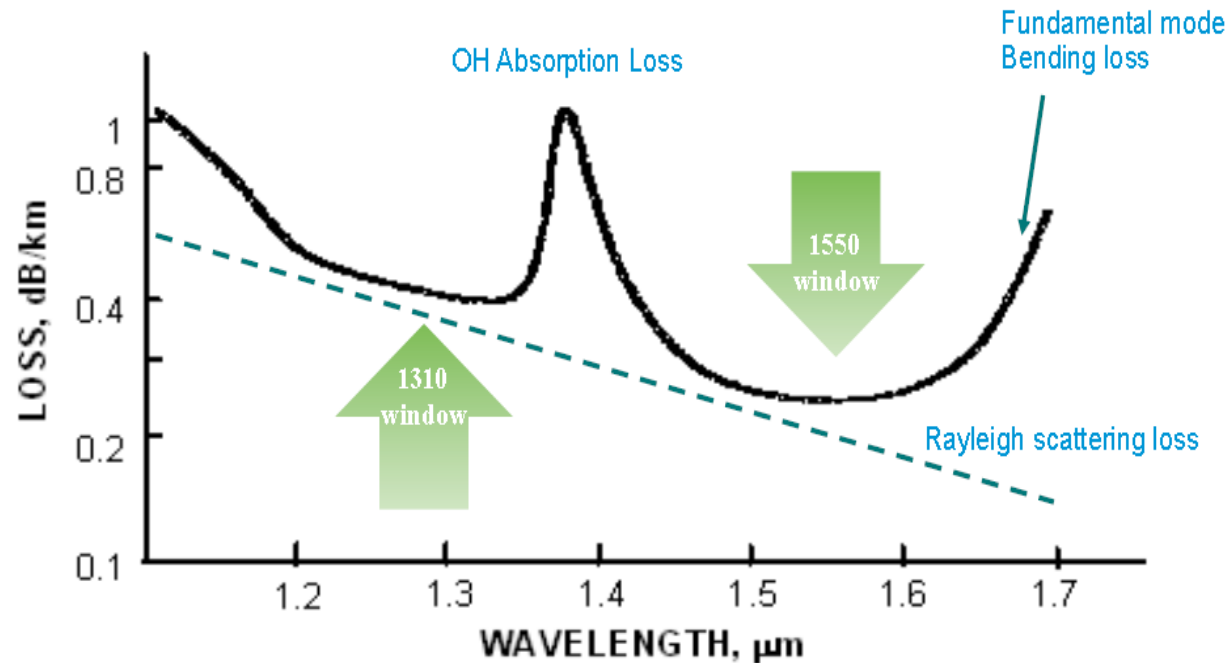
- Atenuação total da fibra óptica em 10 km

$$\alpha(dB) = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{tx}}{P_{rx}} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{10}{6} \right) = 2,22 \text{ dB}$$

- Atenuação da fibra óptica por km

$$\alpha(dB/km) = \frac{\alpha(dB)}{L(km)} = \frac{2,22}{10} = 0,22 \text{ dB/km}$$

Curva de atenuação x comprimento de onda



Atenuação é especificada em dB/km

0.40 dB/km @ 1310 nm, 0.25 dB/km @ 1550 nm

- Perda por absorção de impurezas em 1400 nm - OH (-água) ions
- Rayleigh scattering loss (limite fundamental das perdas na fibra)

ATENUAÇÃO EM FIBRAS ÓPTICAS

- As atenuações em fibras ópticas são causadas, basicamente, por 4 razões:
 - **Absorção**
 - Como nenhum material é perfeitamente transparente, sempre ocorre uma absorção parcial de luz quando esta é forçada a atravessar um meio (absorção intrínseca). Numa fibra, além da absorção do material que compõe seu núcleo, pode haver variações de densidade, imperfeições na fabricação (absorção por defeitos estruturais), impurezas (absorção extrínseca) e outros fatores que aumentam ainda mais as perdas por absorção.
 - Diversas impurezas podem contaminar uma fibra. O principal motivo de atenuações em alguns tipos de fibra é a contaminação por íons metálicos, que pode gerar perdas superiores a 1 dB/km, mas que atualmente já é controlada através de tecnologias utilizadas na fabricação de semicondutores.

ATENUAÇÃO EM FIBRAS ÓPTICAS

- **Absorção intrínseca:**

Este tipo de absorção depende do material usado na composição da fibra e constitui-se no principal fator físico definindo a transparência de um material de numa região espectral especificada.

- **Absorção extrínseca:**

A absorção extrínseca resulta da contaminação de impurezas que o material da fibra experimenta durante seu processo de fabricação.

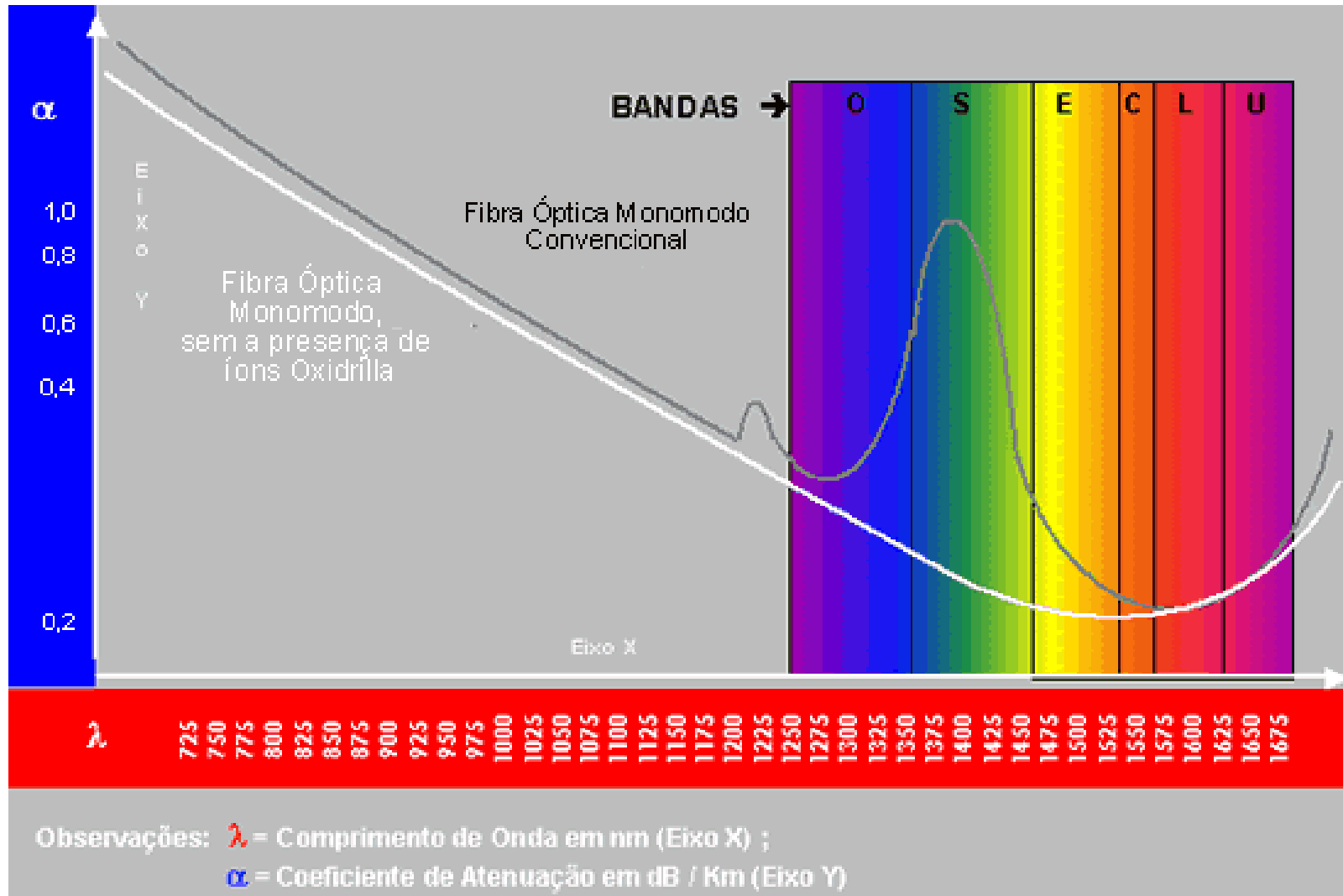
- **Absorção por efeitos estruturais:**

A absorção por defeitos estruturais resulta do fato de a composição do material da fibra estar sujeita a imperfeições, tais como, por exemplo, a falta de moléculas ou a existência de defeitos do oxigênio na estrutura do vidro.

ATENUAÇÃO EM FIBRAS ÓPTICAS

- Pode ser devido a contaminação por íons hidroxila (OH^-), causada por água dissolvida no vidro (também chamada de atenuação por pico de água, *Water Peak Attenuation*, WPA), que, por sua relevância nas tecnologias pioneiras de fibra óptica, definiram intervalos de frequências onde essa atenuação era mínima, as chamadas janelas ópticas ou janelas de transmissão. As janelas ópticas são as regiões onde não há picos de atenuação devido ao íon OH^- .
- As janelas ópticas continuam servindo como referência para os sistemas ópticos, sendo cada uma delas associada a um tipo de aplicação específico.

ATENUAÇÃO EM FIBRAS ÓPTICAS



ATENUAÇÃO EM FIBRAS ÓPTICAS

Espalhamento

É o mecanismo de atenuação que exprime o desvio de parte da energia luminosa guiada pelos vários modos de propagação e várias direções. Existem alguns tipos de espalhamento:

- **Espalhamento Rayleigh:**

Está sempre presente devido à existência de não homogeneidades microscópicas de dimensões menores do que o comprimento de onda, tais como flutuações de comprimento, flutuações térmicas, separação de fase, pressão e pequenas bolhas.

- **Espalhamento Mie:**

Este espalhamento é verificado quando as imperfeições que causam o espalhamento citado anteriormente forem de dimensões comparáveis com o comprimento de onda guiado e principalmente quando houver sinuosamente do eixo da fibra.

- **Espalhamento Raman e Brillouin Estimulados:**

Estes espalhamentos são efeitos não lineares, causados quando a intensidade de campo na fibra for muito alta.

ATENUAÇÃO EM FIBRAS ÓPTICAS

Curvaturas

- Quando a luz na fibra óptica encontra curvas, sejam elas macroscópicas (curva de uma fibra numa quina, por exemplo) ou microscópicas (pequenas ondulações na interface entre a casca e o núcleo), alguns raios de luz podem formar um ângulo inferior ao ângulo crítico e saírem da fibra, causando perda de potência.

ATENUAÇÃO EM FIBRAS ÓPTICAS

Curvatura

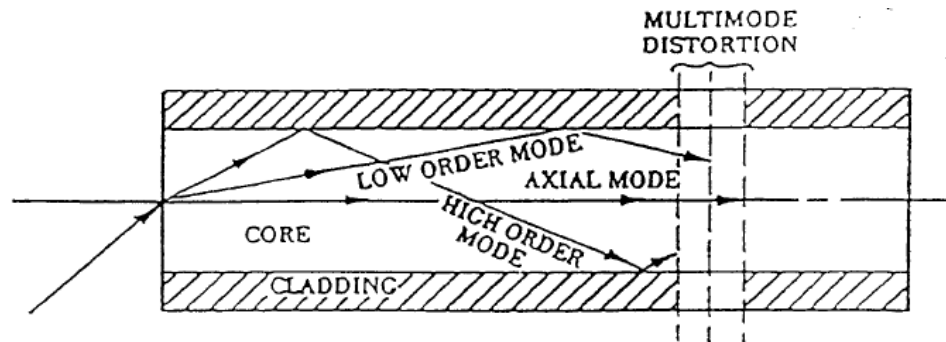
- As fibras ópticas estão sujeitas a perdas de transmissão quando submetidas a curvaturas que podem ser classificadas em dois tipos:
- Curvaturas cujos raios de curvatura são grandes comparados com o diâmetro da fibra (ocorrem por exemplo, quando um cabo óptico dobra um canto ou uma esquina).
- Curvaturas microscópicas aleatórias do eixo da fibra cujos raios de curvatura são próximos ao raio do núcleo da fibra (ocorrem quando as fibras são incorporadas em cabos ópticos).

$$R_c = \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}}$$

Fibra monomodo @ 1550 nm: $R_c \gg 15\text{mm}$

DISPERSÃO EM FIBRAS ÓPTICAS

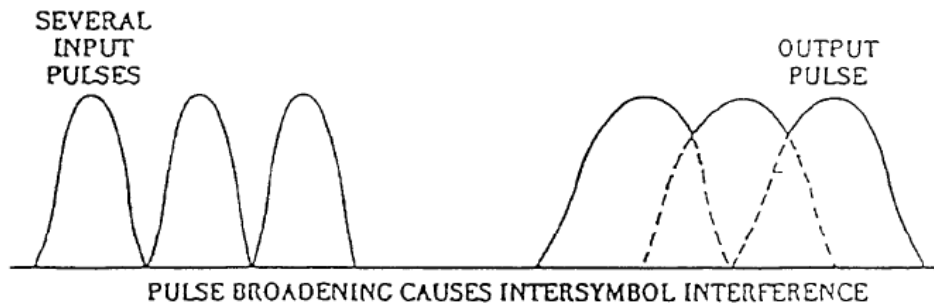
Efeito da dispersão em fibra multimodo com perfil de índice de refração em degrau



Alargamento do pulso

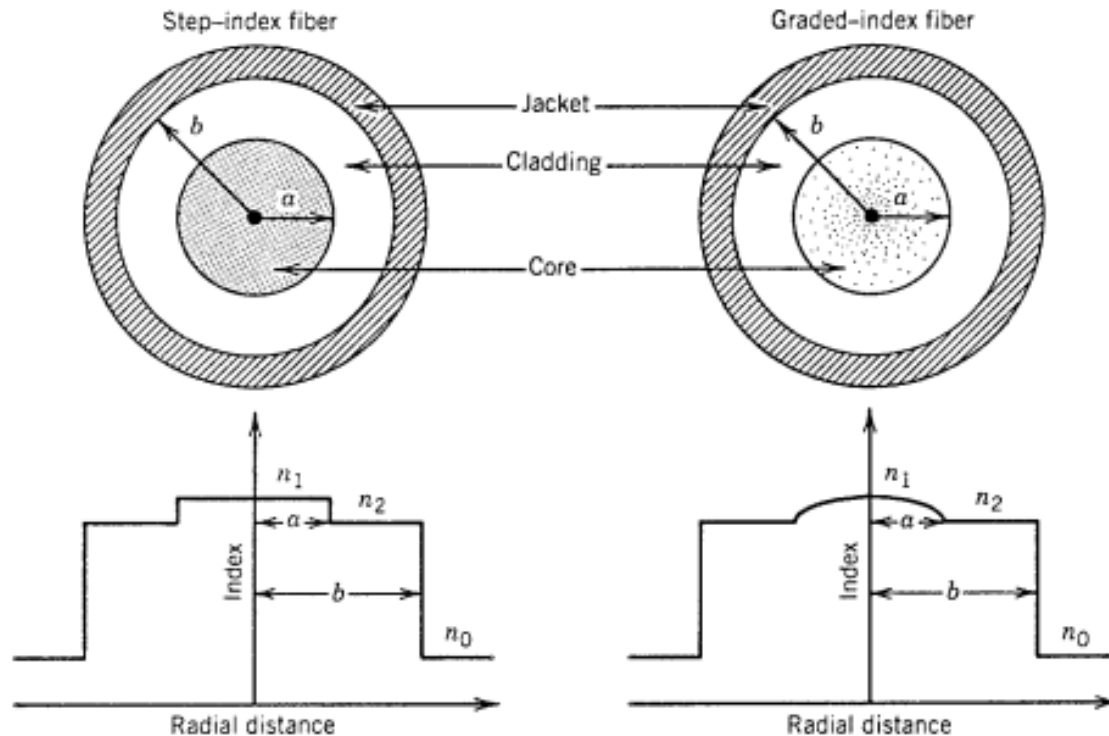


Sobreposição de bits
limitando taxa de dados



FIBRAS ÓPTICAS

Perfis de Fibras Multimodo

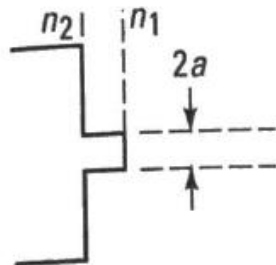


Perfil de índice de refração em degrau (step)

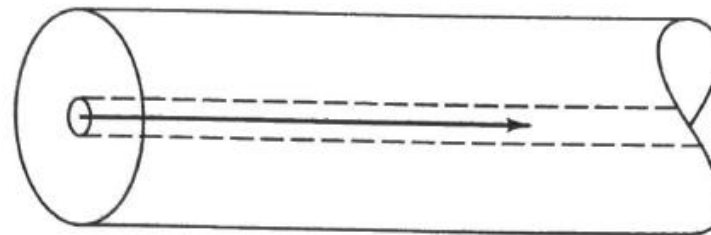
Perfil de índice de refração gradual para redução da dispersão

Fibras ópticas monomodo e fibras ópticas multimodo com perfil em degrau e perfil gradual

Perfil dos índices de refração



Secção reta das fibras e trajetória dos feixes

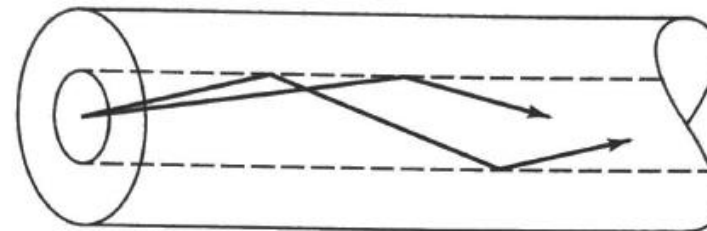
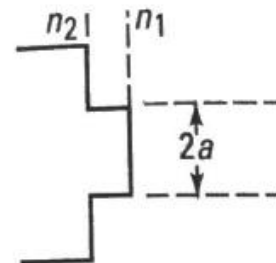


Fibra monomodo de índice-degrau

Dimensões típicas

125 μm
(casca)

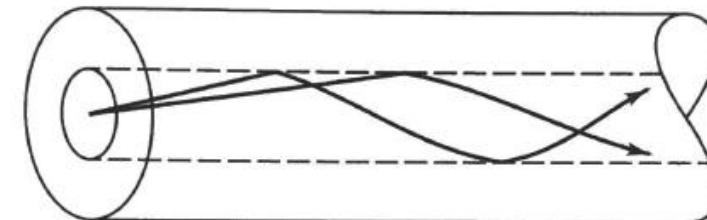
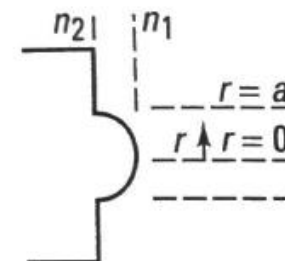
8-12 μm
(núcleo)



Fibra multimodo de índice-degrau

125-400 μm
(casca)

50-200 μm
(núcleo)



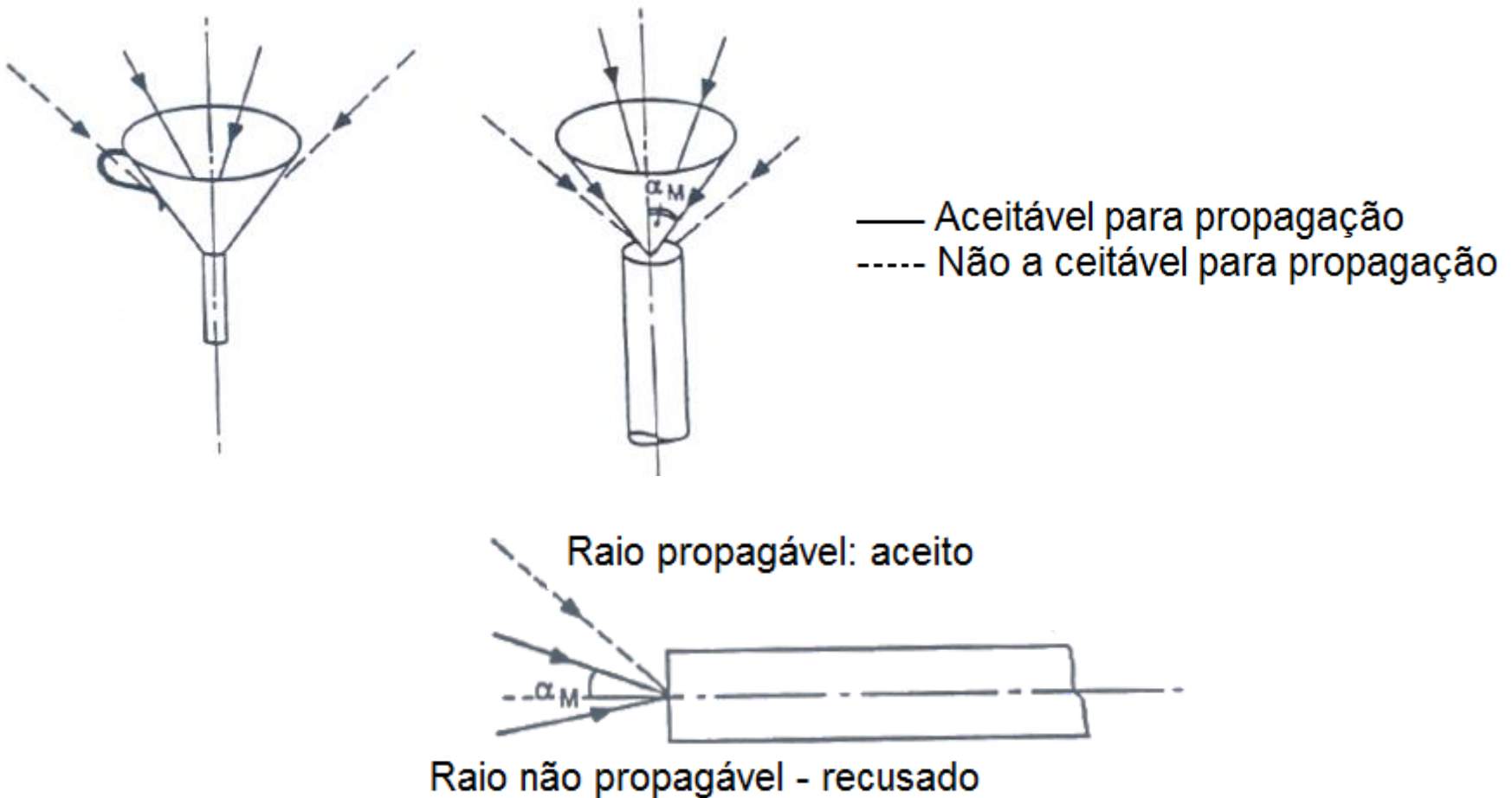
Fibra multimodo de índice-gradual

125-140 μm
(casca)

50-100 μm
(núcleo)

FIBRAS ÓPTICAS

Propagação na fibra óptica - ângulo máximo



FIBRAS ÓPTICAS

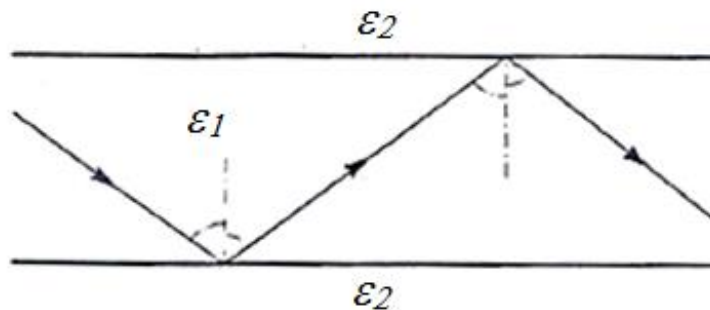
Propagação de ondas em guias dielétricos

Quando uma onda eletromagnética incide sobre um plano de separação entre dois dielétricos, para que haja propagação dessa onda podemos impor uma série de condições de modo a haver reflexão total em duas superfícies (superior e inferior)

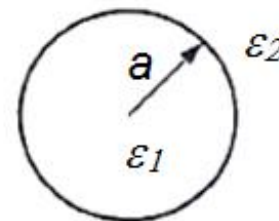
Guia dielétrico cilíndrico de raio a

Meio interior do guia: permissividade elétrica ϵ_1

Meio exterior do guia: permissividade elétrica ϵ_2



corte longitudinal



corte transversal

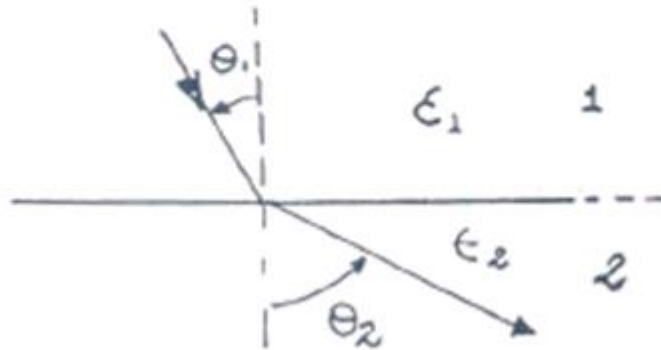
FIBRAS ÓPTICAS

Aplicaremos as Leis e condições vistas nos itens já apresentados.

Resumo para Reflexão Total

Supondo $n_1 > n_2 \therefore \sqrt{\epsilon_1} \cdot \text{sen} \theta_1 = \sqrt{\epsilon_2} \cdot \text{sen} \theta_2$

Teremos $\theta_2 > \theta_1$



A refração ocorre quando $\theta_1 < \theta_{1 \text{ critico}} = \theta_{lc}$

Limite para reflexão total $\theta_1 > \theta_{1L \text{ (critico)}} = \theta_c$

FIBRAS ÓPTICAS

$$\eta_1 \cdot \text{sen} \theta_{il} = \eta_2 \cdot 1 \quad \therefore \quad \eta_1 \cdot \text{sen} \theta_c = \eta_2$$

$$\text{sen} \theta_c = \frac{\eta_2}{\eta_1}$$

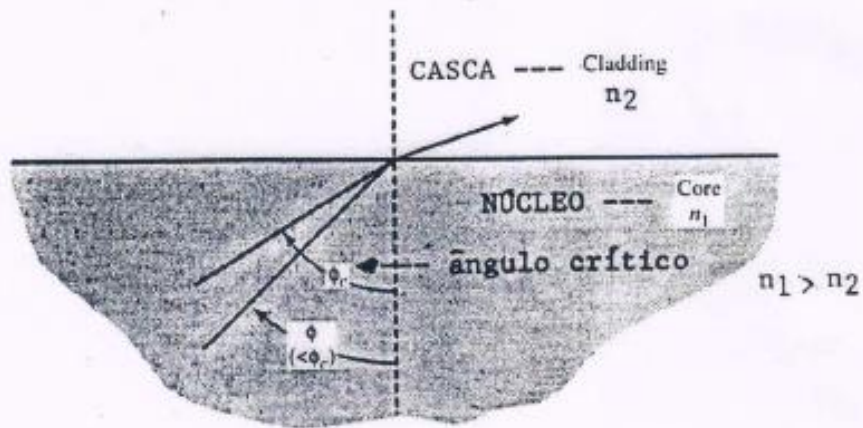
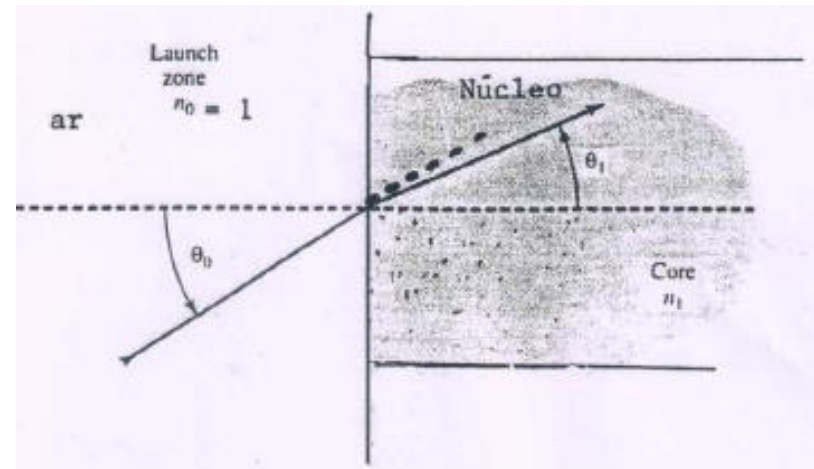
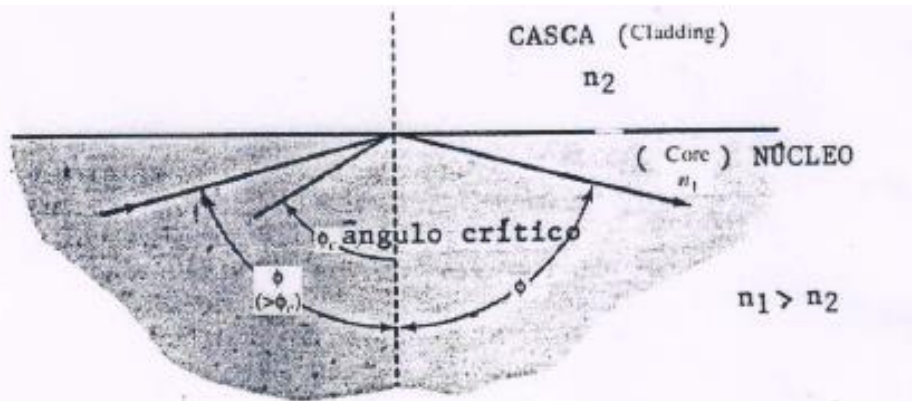
Mudemos a posição desta última figura, denominando:

meio 0 → AR ∴ índice de refração = η_0

meio 1 → NÚCLEO ∴ índice de refração = η_1

meio 2 → CASCA ∴ índice de refração = η_2

FIBRAS ÓPTICAS



(b)

FIBRAS ÓPTICAS

A refração ocorre quando o ângulo de incidência θ_1 é menor do que o crítico θ_{1c} .

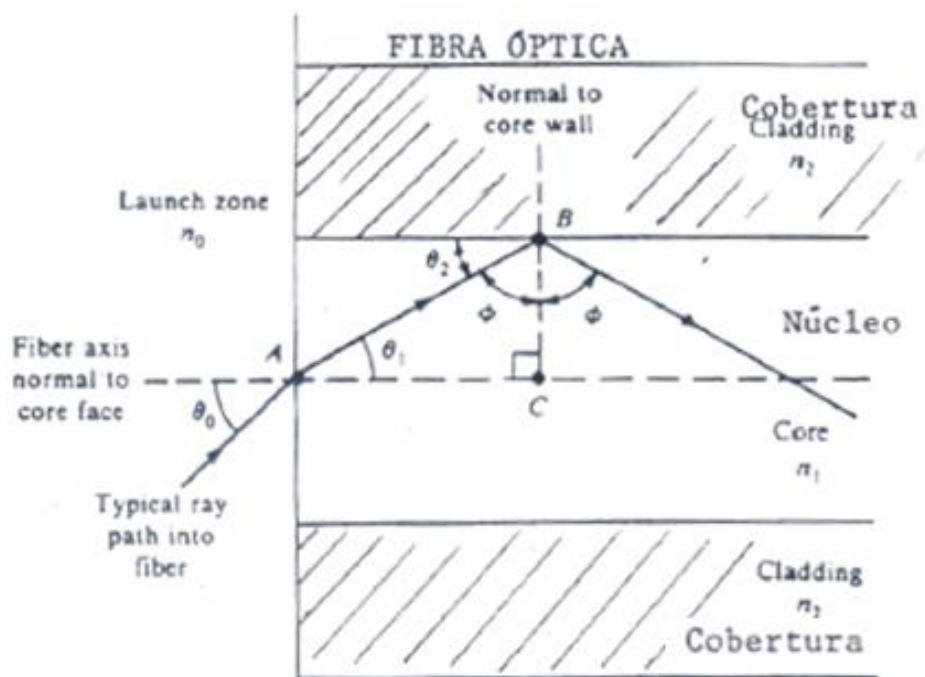
Na última parte da figura anterior, temos um sinal incidente (proveniente do ar - η_0) incidindo no núcleo (η_1).

Como $\eta_0 = 1$ e $\eta_1 > 1$

$$\eta_0 \cdot \text{sen} \theta_0 = \eta_1 \cdot \text{sen} \theta_1 \therefore \theta_1 < \theta_0$$

FIBRAS ÓPTICAS

Na próxima figura abaixo temos uma visão completa do percurso do raio incidente no ponto A. Haverá uma refração no meio 1 (núcleo). A seguir esse sinal percorre o meio 1 e incide na casca (meio 2) no ponto B, segundo um ângulo de incidência ϕ .



Nesse triângulo ABC as seguintes relações são válidas

$$\theta_1 = 90^\circ - \phi$$

$$n_0 \cdot \text{sen} \theta_0 = n_1 \cdot \text{sen} \theta_1$$

$$\text{sen} \theta_0 = n_1 \cdot \text{sen} \theta_1 = n_1 \cdot \text{sen}(90 - \phi)$$

$$\text{sen} \theta_0 = n_1 \cdot \text{cos} \phi \quad \therefore \quad \phi > \phi_c \quad (\text{critico})$$

FIBRAS ÓPTICAS

Quando ϕ for crítico (para reflexão total) teremos:

$$\eta_1 \cdot \text{sen} \theta_1 = \eta_2 \cdot \text{sen} \theta_2 \quad \therefore \quad \theta_2 = \frac{\pi}{2} \quad \text{e} \quad \theta_1 = \theta_{1c}$$

$$\text{NA} = \text{sen} \theta_{o(\text{máximo})} = \frac{\sqrt{\eta_1^2 - \eta_2^2}}{\eta_o}$$

se a fibra estiver no ar $\eta_o = 1$

$$\text{NA} = \text{sen} \theta_{o(\text{máximo})} = \sqrt{\eta_1^2 - \eta_2^2}$$

Muitas vezes é utilizada a diferença relativa entre os índices de refração Δ

$$\Delta = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1}$$

FIBRAS ÓPTICAS

Na maior parte das fibras os índices de refração do núcleo (η_1) e da casca (η_2) são próximos

p. exemplo: fibra:vidro/vidro $\rightarrow \eta_1 = 1,55$ e $\eta_2 = 1,51$

$$\eta_1^2 - \eta_2^2 = (\eta_1 - \eta_2)(\eta_1 + \eta_2) \cong (\eta_1 - \eta_2)2\eta_1$$

$$\eta_1^2 - \eta_2^2 = 2\eta_1^2 \frac{(\eta_1 - \eta_2)}{\eta_1} = 2\eta_1^2 \Delta$$

$$\text{logo } NA = \text{sen } \theta_{o(\text{máximo})} = \frac{\eta_1 \cdot \sqrt{2\Delta}}{\eta_o}$$

$$\text{No nosso exemplo } \Delta = \frac{1,55 - 1,51}{1,55} = 0,0258$$

$$NA = 0,352 \quad \therefore \text{sen}^{-1} NA = \text{sen}^{-1} 0,352 \quad \therefore$$

$$\text{Finalmente } \theta_{o(\text{max})} = 20,6^\circ$$

FIBRAS ÓPTICAS

FIBRAS ÓPTICAS - MONOMODO

Diferença com a fibra multimodo = alta capacidade de transmissão
- dimensões menores

Devido as suas dimensões (núcleo) exigem técnicas de alta precisão para realização de conexões com emissores de luz e detectores. As fibras mono modo podem ser obtidas por:

- redução da diferença dos índices de refração
 $\Delta = n_1 - n_2$ ($\approx 0,3\%$)
 $\Delta = 0,003$

- redução do diâmetro do núcleo $D = 2a$

FIBRAS ÓPTICAS

$$V = \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right) n_1 \sqrt{2\Delta} = \frac{D \cdot \pi}{\lambda} \cdot n_1 \sqrt{2\Delta}$$

Exemplo - $\lambda = 1,30 \mu\text{m}$

$$n_1 = 1,46$$

$$\Delta = 0,003$$

$$V < 2,405$$

$$\frac{D \cdot \pi}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} < 2,405$$

$$D < \frac{2,4 \times 1,30}{\pi \cdot 1,46 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,003}} = 8 \mu\text{m}$$

FIBRAS ÓPTICAS

- aumento do comprimento de onda (λ) da luz no guia. Este número é escolhido $\lambda = 1,30 \mu\text{m}$ - $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

- 11 -

- Redução da diferença dos índices de refração
 - muito limitada no processo de fabricação
 - reduz a capacidade de captura de luz (pequena abertura numérica)
- redução do diâmetro do núcleo
 - variável para maior grau de liberdade
 - entretanto difícil a conexão óptica
- aumento do comprimento de onda λ