

FIBRAS ÓPTICAS

PSI3483 – Ondas Eletromagnéticas em meios guiados

Eng. Antonio Sandro Verri

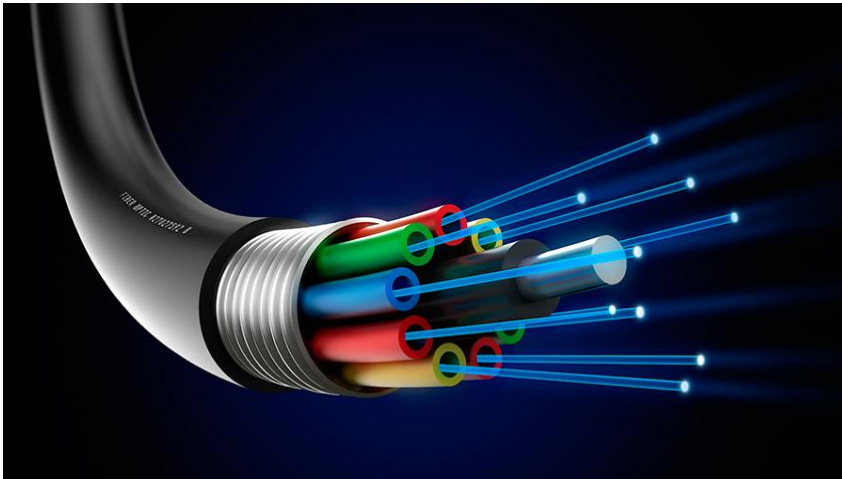
Profa. Fatima Salete Correra

Prof. José Kleber da Cunha Pinto

Fibras Ópticas

- Introdução (histórico e aplicações)
- Princípios básicos
- Propagação em fibras ópticas
 - Tipos de fibras
 - Modos propagantes
- Dispersão em fibras ópticas
- Atenuação – Tipos de perdas
- Cabos e conectores

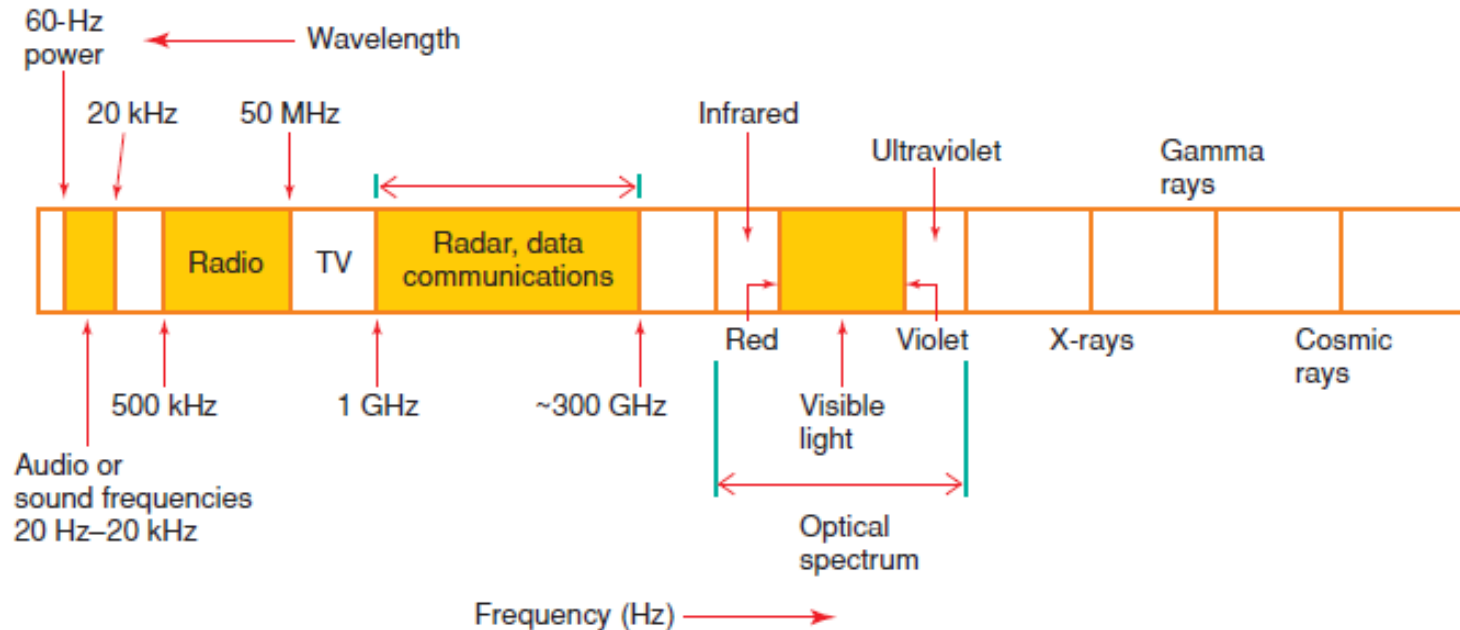
Fibras Ópticas



Uma definição: são guias de onda cilíndricos feitos de vidro ou plástico, utilizados como meio para a transmissão de luz.

- Elemento fundamental na comunicação óptica, que permitiu uma revolução nas telecomunicações mundial.
- Atualmente, as pessoas se conectam, acessam informação e controlam equipamentos remotamente utilizando redes de internet que operam em alta velocidade
- O mundo está conectado através de cabos ópticos submarinos e dutos subterrâneos

Espectro de Frequências de Ondas Eletromagnéticas



Faixa de comunicação óptica

185 THz (1625 nm) ↔ 375 THz (800 nm) *

* É muito comum citarmos a luz em termos de seu comprimento de onda em nm

Grande capacidade de transmitir informação

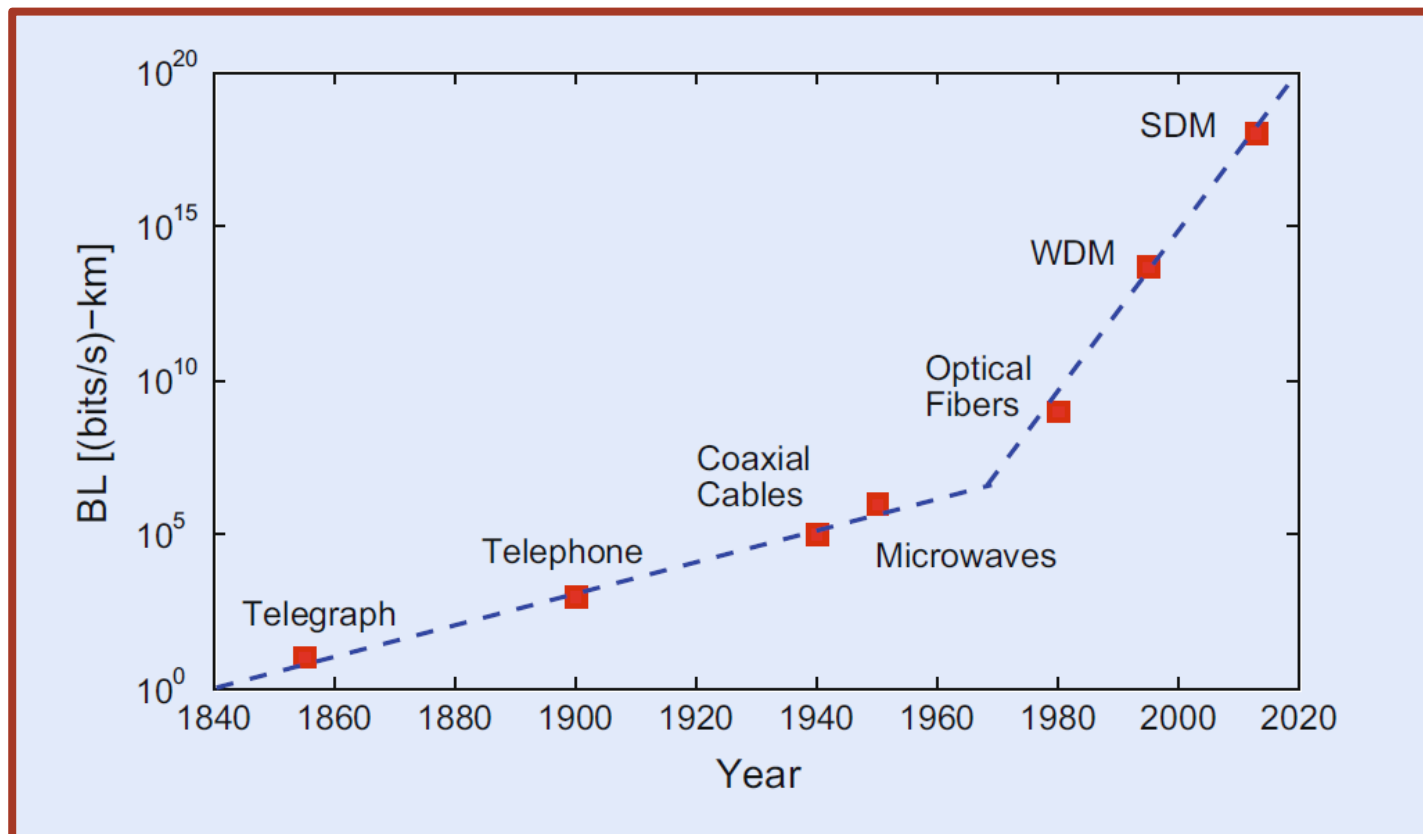
Qual o número de canais de TV, ocupando 6 MHz de banda, seria possível transmitir em 1% de banda de uma portadora de 3 GHz?

$$N = \frac{3 \times 10^9 \cdot 0,01}{6 \times 10^6} = 5 \text{ canais}$$

Repita o cálculo utilizando 1% de banda de uma portadora de 187 THz da faixa de comunicação óptica?

$$N = \frac{187 \times 10^{12} \cdot 0,01}{6 \times 10^6} = 311.666 \text{ canais}$$

Evolução da capacidade de transmitir informação

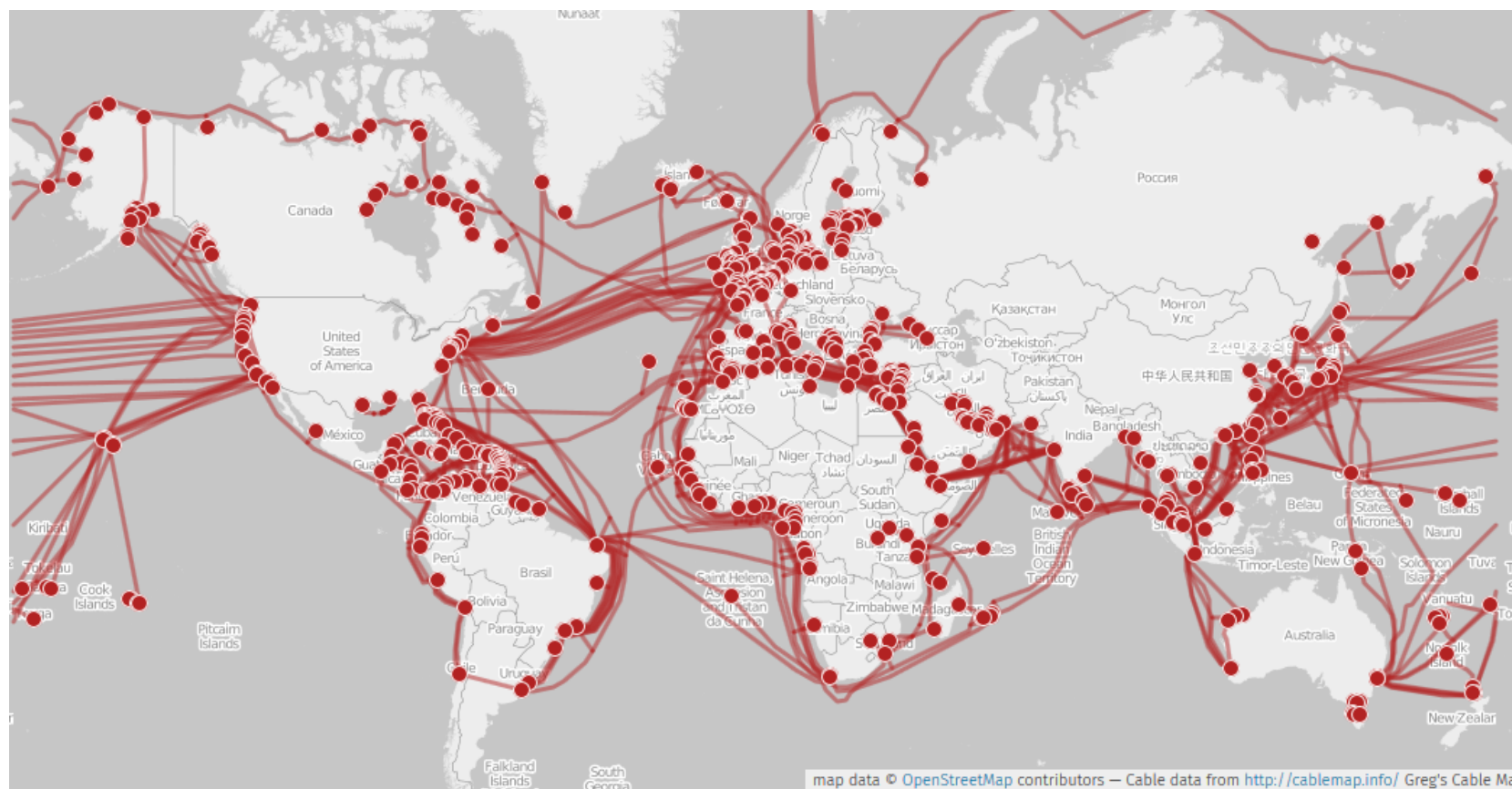


Onde: **B** é a taxa de bits

L é a distância entre repetidores em km

Distribuição de Cabos Ópticos pelo Mundo

- Comunicação por cabos submarinos de fibra óptica
(para detalhes acesse: <https://www.submarinecablemap.com/>)

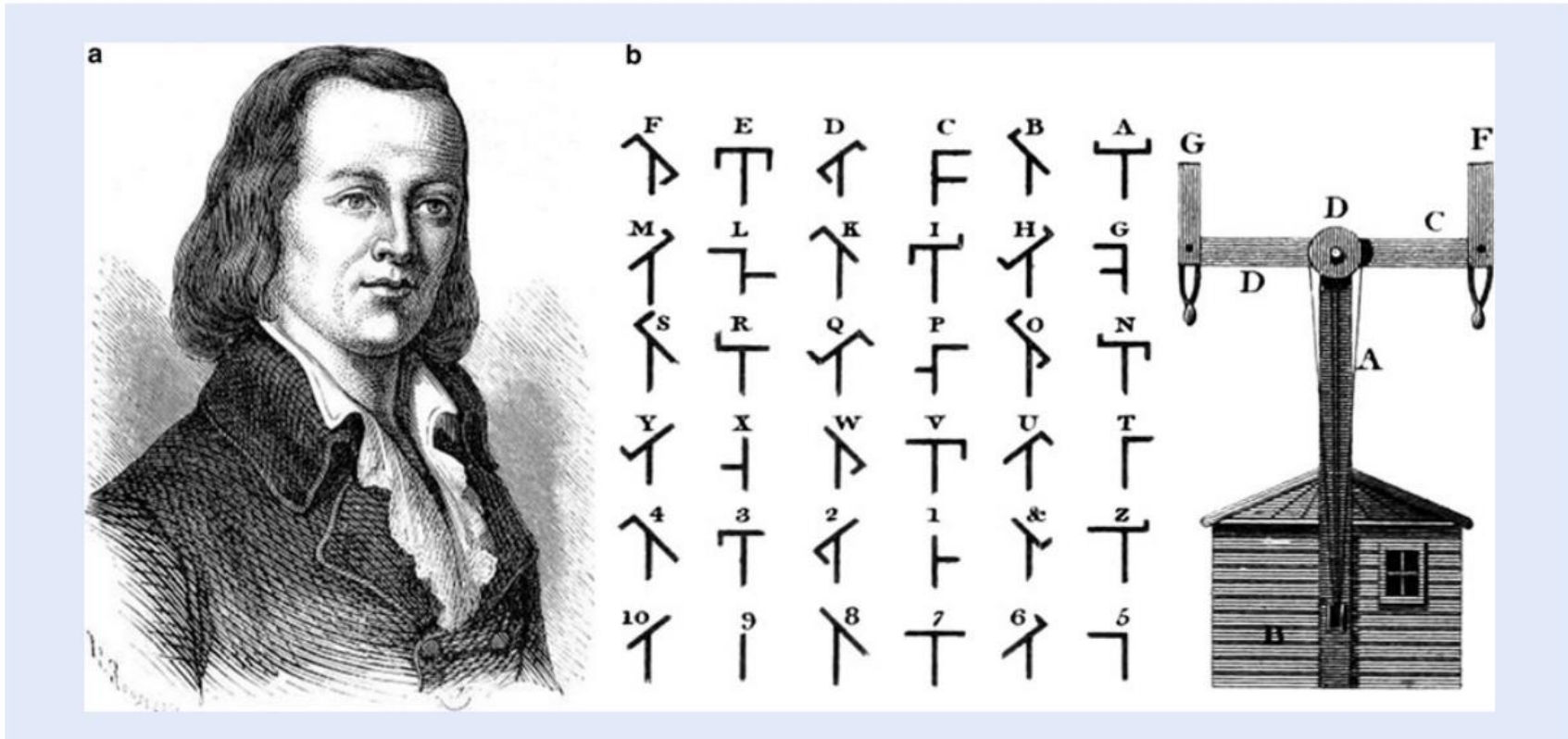


Aplicações de fibras ópticas

- Comunicações
 - Meio de transmissão (curtas e longas distâncias)
 - Construção de novos componentes (Acopladores e multiplexadores)
- Área médica
 - Iluminação
 - Cauterização e quebra de pedras nos rins (LASER)
- Sensores
 - Petróleo (Sensores de temperatura, pressão e vibração)
 - Aviação (Monitoramento da estrutura da aeronave)
 - Potência e Energia (Medida de altas tensões e correntes)

Um pouco de história.....

- 1791 – Claude Chappe inventou o telégrafo óptico



■ Fig. 8.1 Claude Chappe, his coding scheme, and the mechanical device used for making optical telegraphs (licensed under Public Domain via Wikimedia Commons)

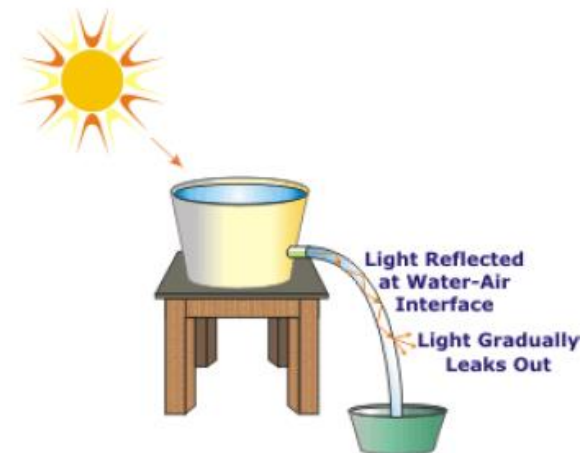
Um pouco de história.....

Foto de uma torre com telégrafo óptico de Chappe



<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=784410>

- 1841 – Tyndall-Colladon demonstraram que a luz do sol poderia ser transmitida por um fluxo curvilíneo de água



Veja o vídeo do link abaixo:

www.youtube.com/watch?v=ifbCsha7Syc

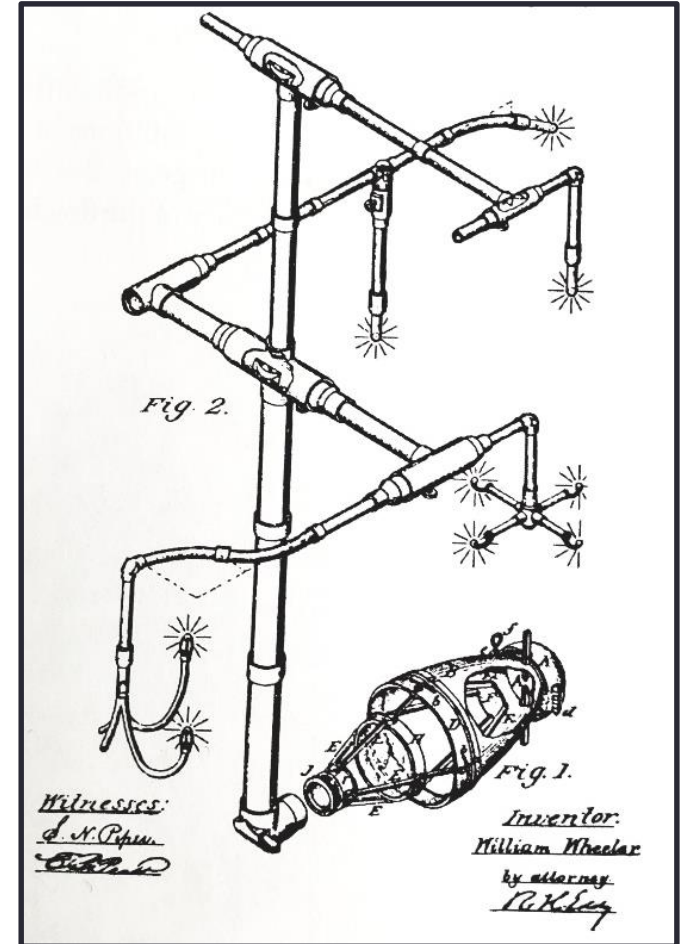
Um pouco de história.....

- 1853 – A idéia de Tyndall-Colladon foi utilizada pelo Paris Opera para criar efeitos especiais durante uma apresentação da ópera-ballet Fausto de Gounod
- Exemplo de propagação de luz por feixes de água



Um pouco de história.....

- 1881 – Willian Wheeler patenteou a idéia de que um ambiente interno poderia ser iluminado utilizando uma única fonte de luz e canos espelhados
- 1950 – Nishizawa inventou o fotodetector a diodo PIN
- 1959 – Gordon Gould inventou o diodo Laser

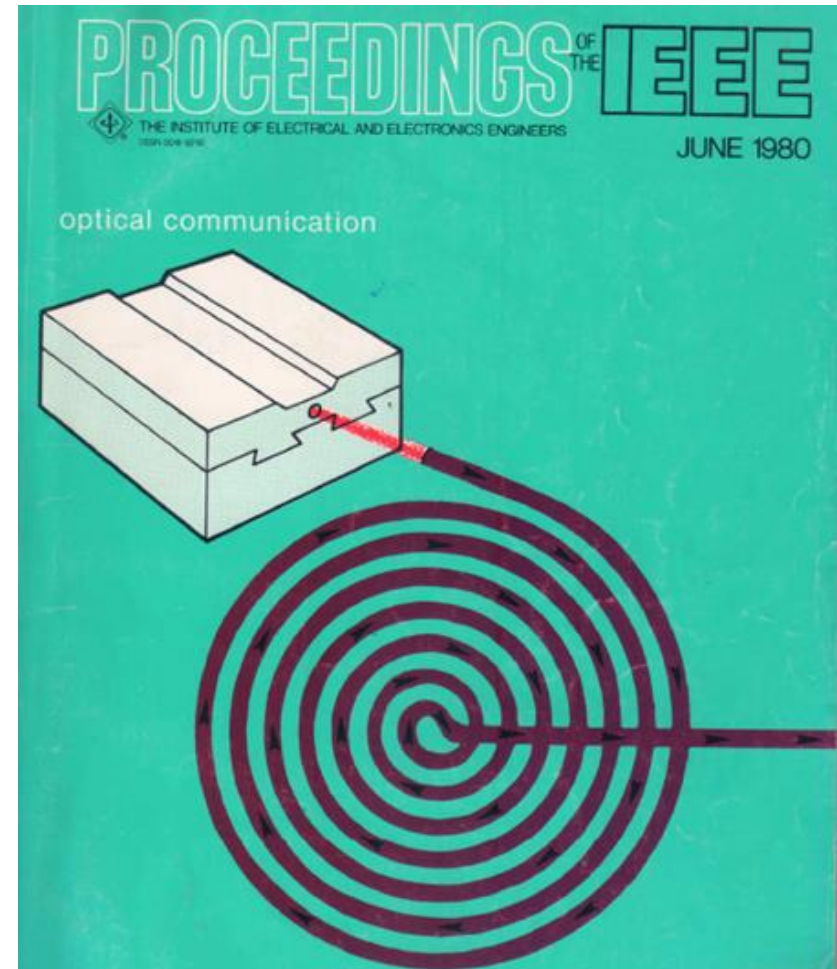


Um pouco de história.....

- 1966 – Apresentada a primeira proposta de fibra óptica para fins de comunicação óptica (perdas de 1000 dB/km)
- 1970 – A empresa Corning Glass Works fabrica a primeira fibra óptica com perdas abaixo de 20 dB/km.
- 1970 – Desenvolvimento de LASERs em GaAs (Arseneto de Gálio) adequados para transmissão de luz em grandes distâncias.
- 1975 – Lançado o primeiro sistema de comunicação óptico comercial operando em comprimento de onda de 800 nm, com Laser a semicondutor GaAs. Operavam com taxas de 45 Mbits/s com repetidores a cada 10 km.

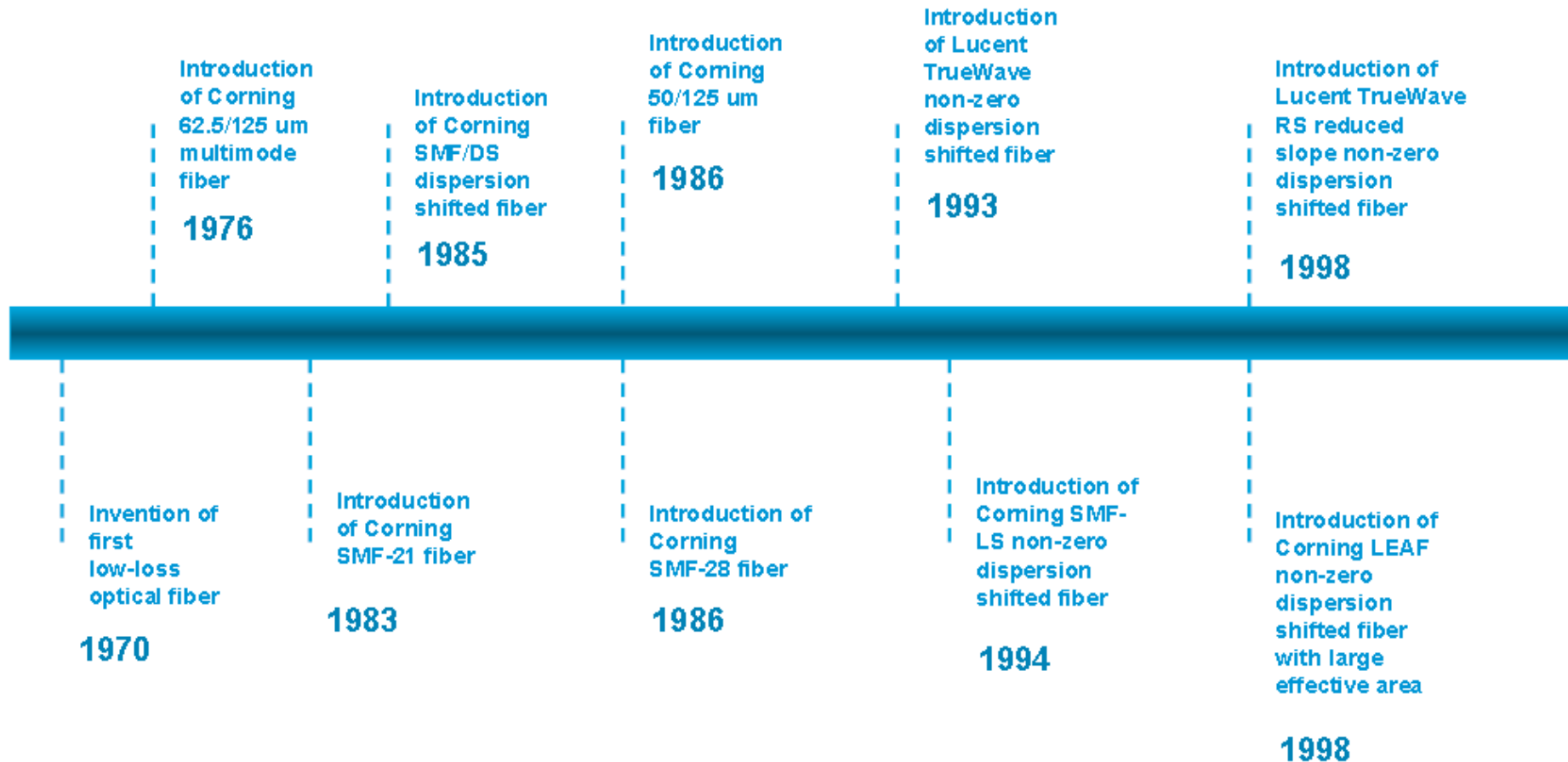
Um pouco de história.....

- 1980 – Revistas científicas dedicavam cada vez mais espaço à nova tecnologia
- 1987 – 2ª geração de sistema de comunicação óptico operando em 1300 nm com fibra monomodo. Taxas de 1,7 Gbits/s e repetidores a cada 50 km.
- 1988 – Primeiro cabo óptico transatlântico
- 1987 – 3ª geração de sistema de comunicação óptico ($\lambda=1550$ nm) com taxas de 2,5 Gbits/s. As perdas de 0,2 dB/km permitiram o uso de repetidores a cada 100 km.



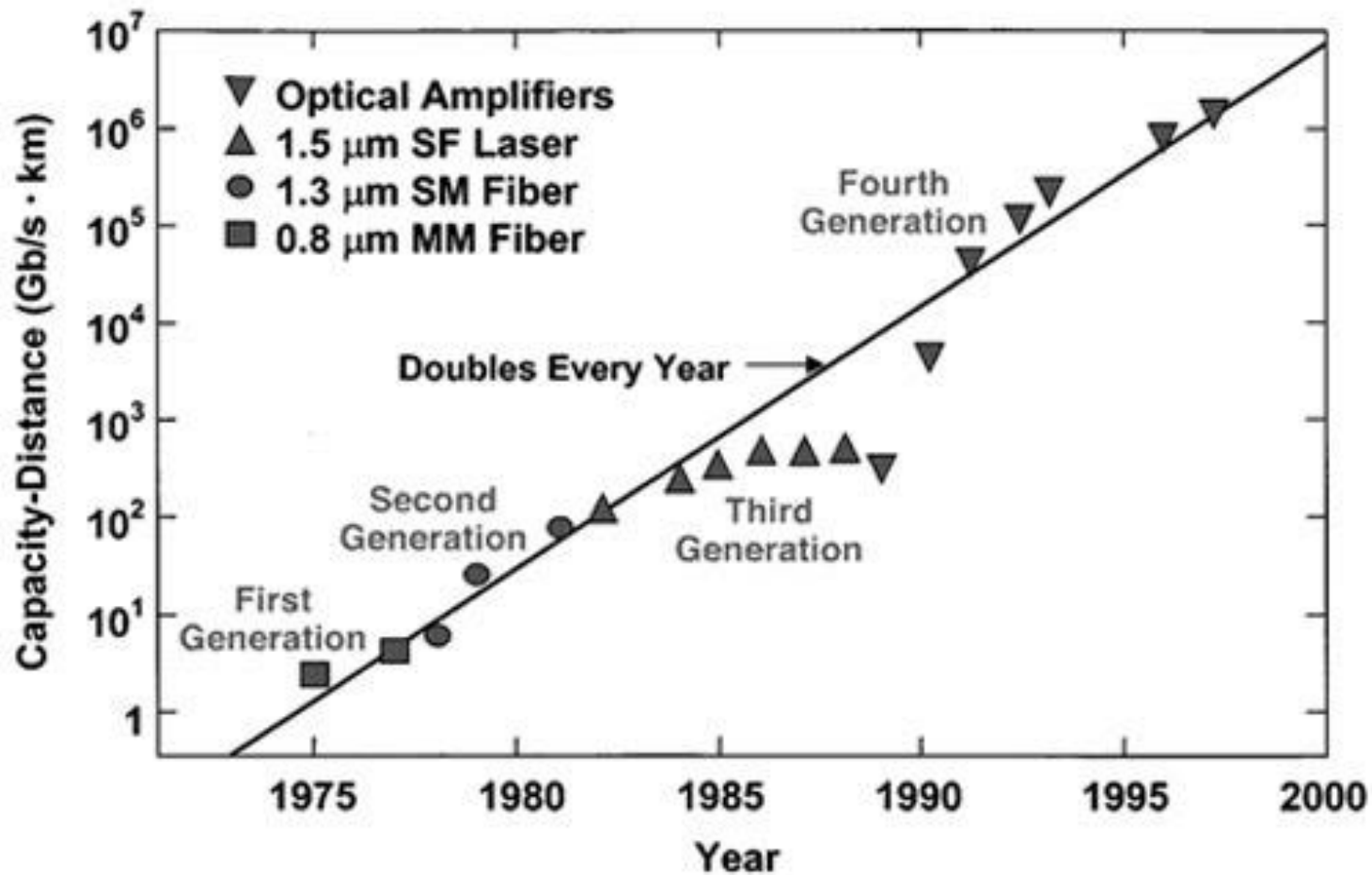
FIBRAS ÓPTICAS

Desenvolvimento das fibras ópticas comerciais



Sistemas com Fibras Ópticas

Evolução de quatro gerações de sistemas ópticos



Detalhes de 4 gerações de Sistemas Ópticos

Primeira Geração (Fibras de Índice-Gradual)

- Ano implementado: 1980
- Taxa de bits: 45 Mb/s
- Repeater spacing: 10 km
- λ de operação: 0.8 μ m
- Semiconductor: GaAs

Segunda Geração (Fibras Monomodos)

- Ano implementado: 1985
- Taxa de bits: 100 Mb/s to 1.7 Gb/s
- Repeater spacing: 50 km
- λ de operação: 1.3 μ m
- Semiconductor: In GaAsP

Terceira Geração (Lasers Monomodos)

- Ano implementado: 1990
- Taxa de bits: 10 Gb/s
- Repeater spacing: 100 km
- λ de operação: 1.55 μ m

Quarta Geração (Amplificadores Ópticos)

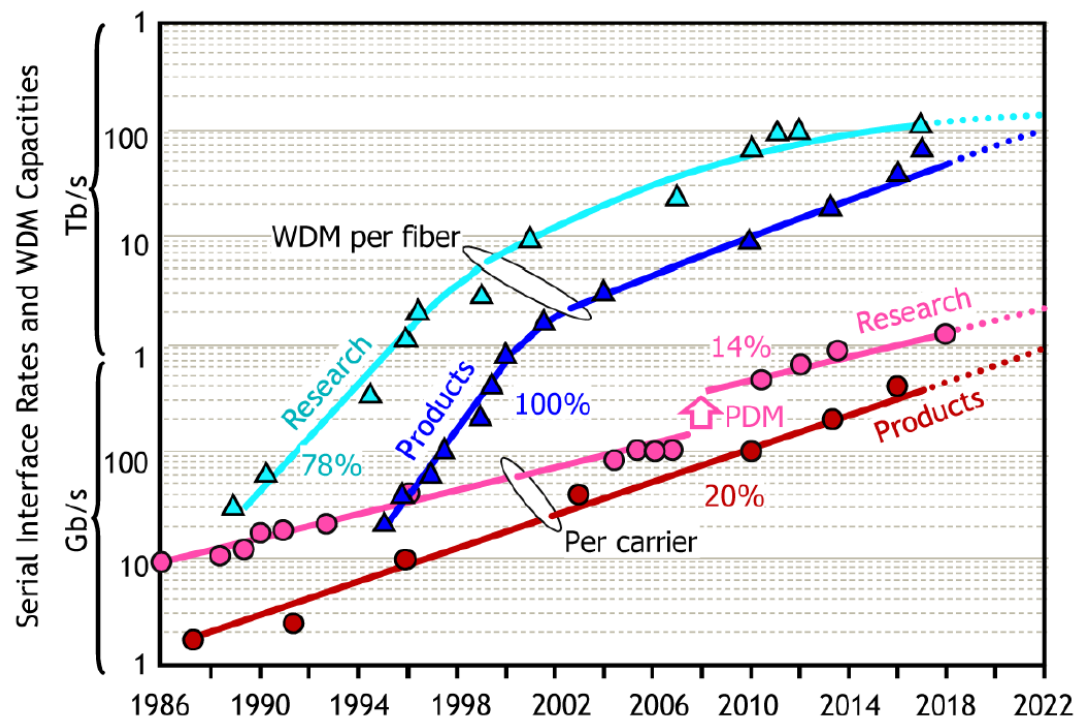
- Ano implementado: 1996
- Taxa de bits: 10 Tb/s
- Repeater spacing: > 400 km
- λ de operação: 1.45 μ m to 1.62 μ m

Sistemas de comunicação por fibras ópticas

Vantagens

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

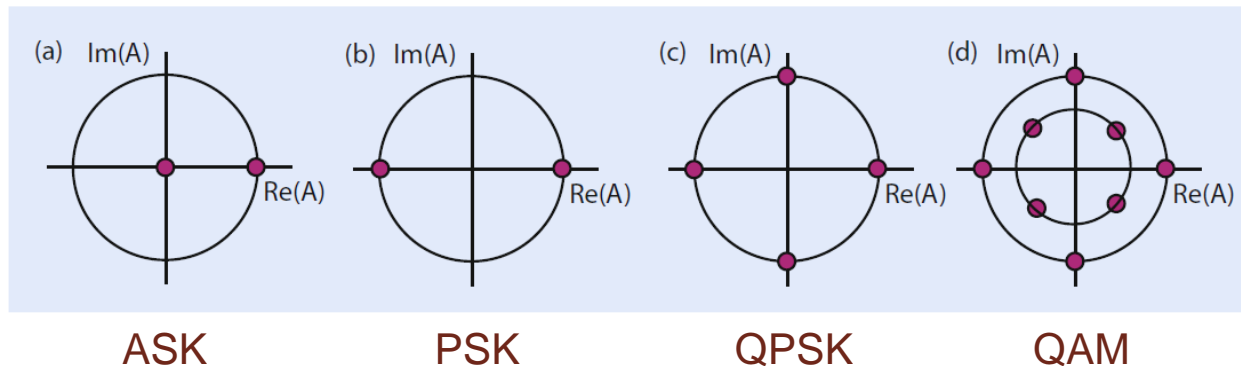
Evolução dos sistemas ópticos



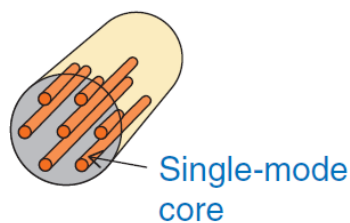
Capacidades de transmissão (bits/s) obtidas por produtos comerciais e em pesquisa, considerando resultados obtidos por portadora e em sistemas WDM.

• Quinta Geração de Sistemas Ópticos

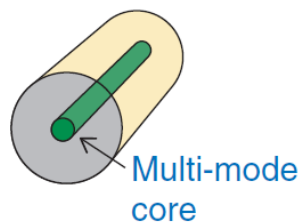
- Desenvolvimento de sistemas DWDM mais eficientes
- Utilização de sistemas de detecção coerente
- Aumento da eficiência espectral



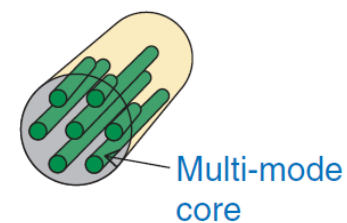
• SDM (Space Division Multiplexing)



(a) Multi-core fiber



(b) Multi-mode fiber



(c) Multi-mode multi-core fiber
Ex: 6 modos por núcleo

Evolução e Previsão dos Sistemas Ópticos Comerciais

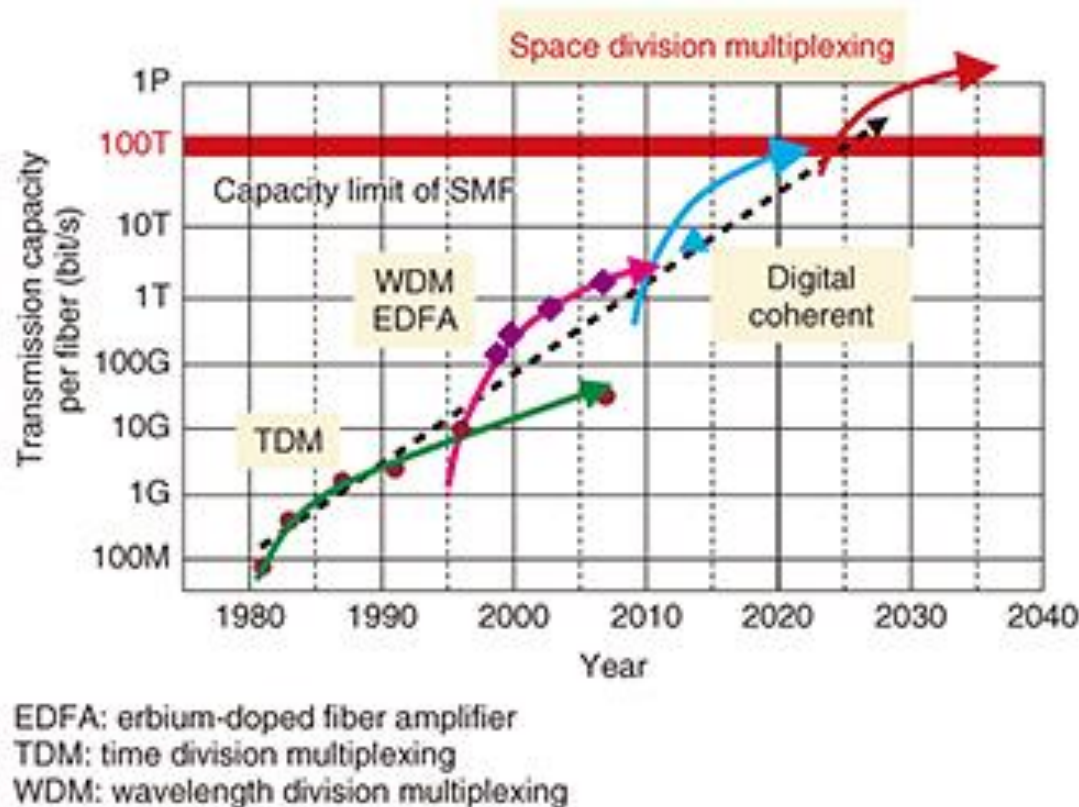
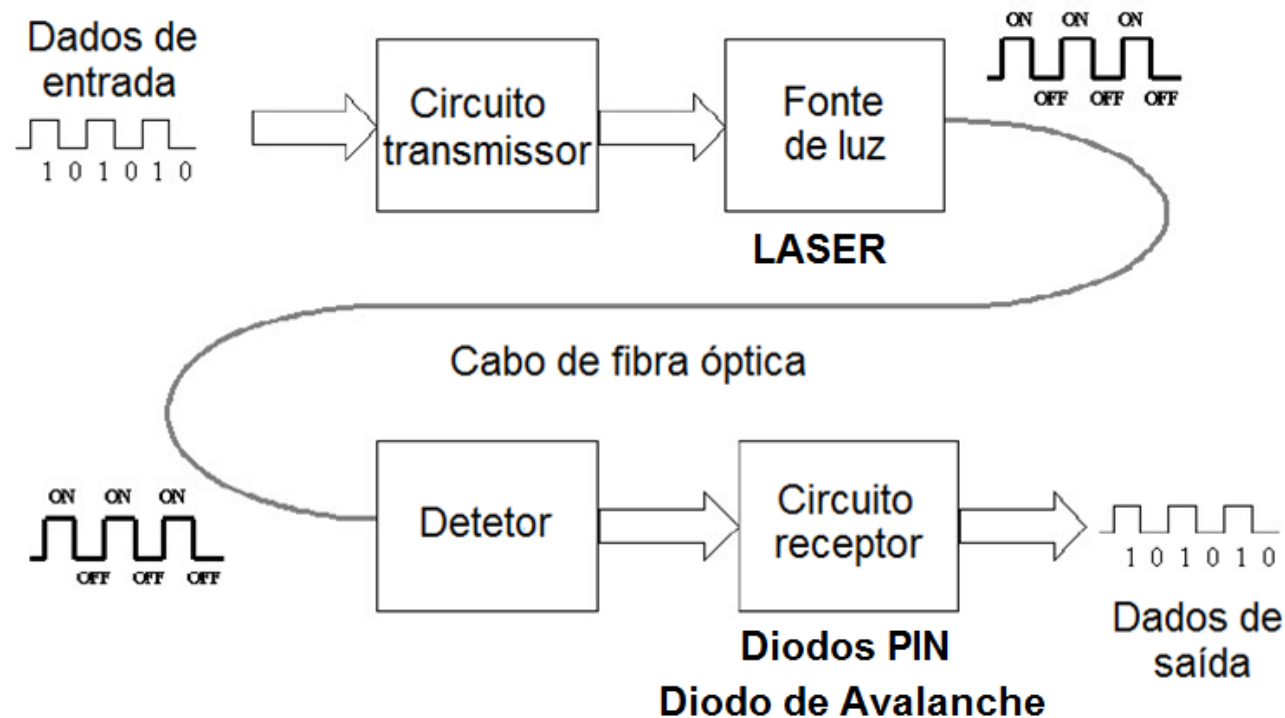


Figura do artigo “*World’s Highest Density Optical Fiber for Space Division Multiplexing with Deployable Reliability*” NTT Technical Review, Feb 2017.

Detalhes sobre SDM – Space-Division Multiplexing

(ver artigo “*Space Division Multiplexing in Optical Fibres*” Nature Photonics, Apr 2013)

Exemplo de um sistema de comunicação por fibra óptica



- Fibra óptica → meio guiado
- Fibra óptica conduz o sinal luminoso, com amplitude modulada pela informação

Instalação de cabos submarinos de fibra óptica

- A instalação de cabos ópticos submarinos é feita por navios (cables ship) construídos exclusivamente para esta função.

Veja vídeo ilustrativo

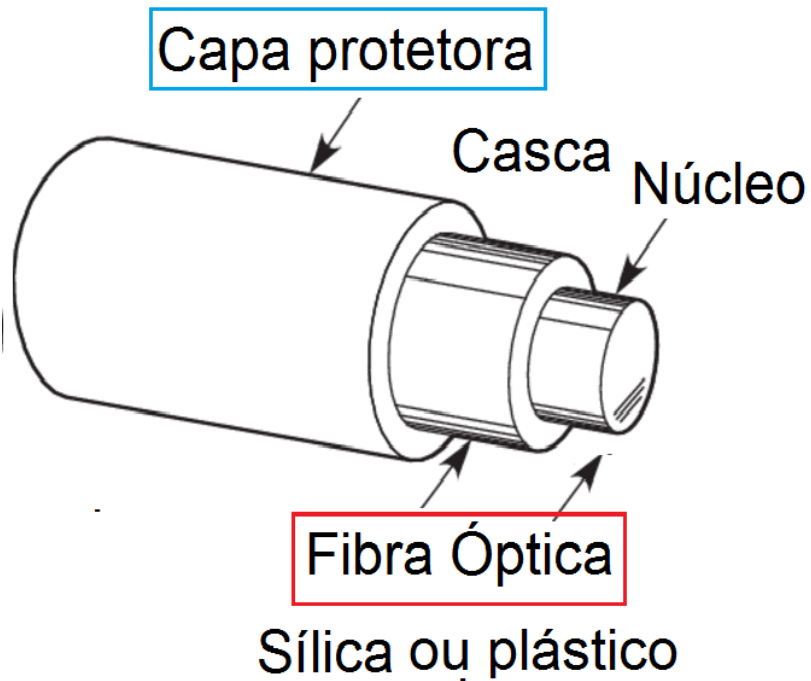
<https://youtu.be/T-wlLgB1zM>



Cables ship “Sir Erik Sharp”

FIBRAS ÓPTICAS

Estrutura e exemplos de fibras ópticas



Estrutura da fibra óptica



Fibras ópticas

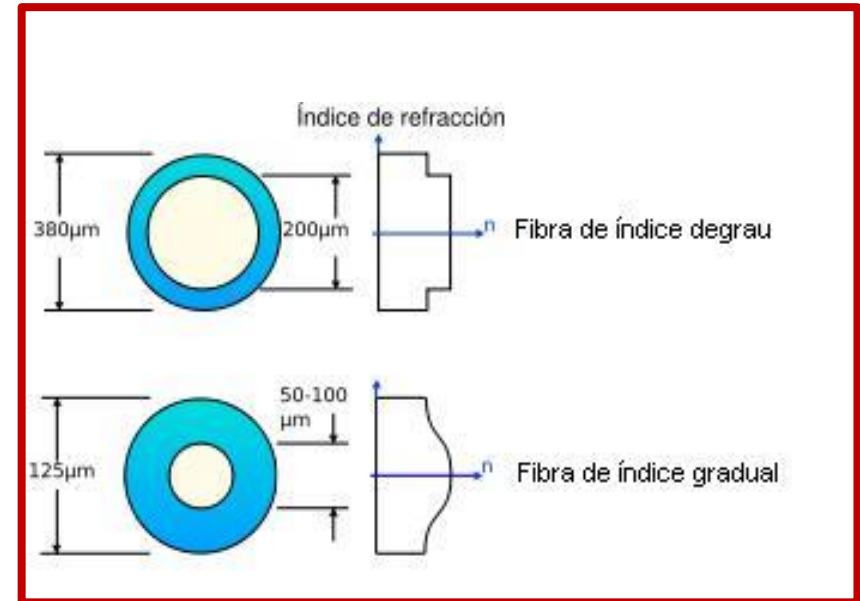
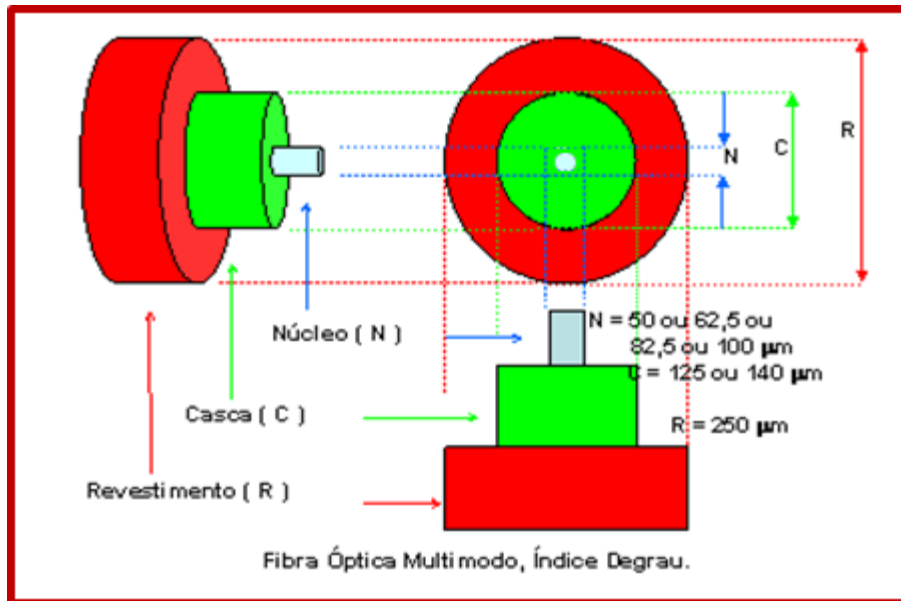


Cabo contendo inúmeras fibras ópticas

Tipos de 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 500 Mb/s (2020)
- **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 de Tb/s

Fibra Óptica Multimodo - Dimensões e geometria



- Diâmetro da Casca
Varia de 140 a 400 μm
- Diâmetro do núcleo
Varia de 50 a 200 μm

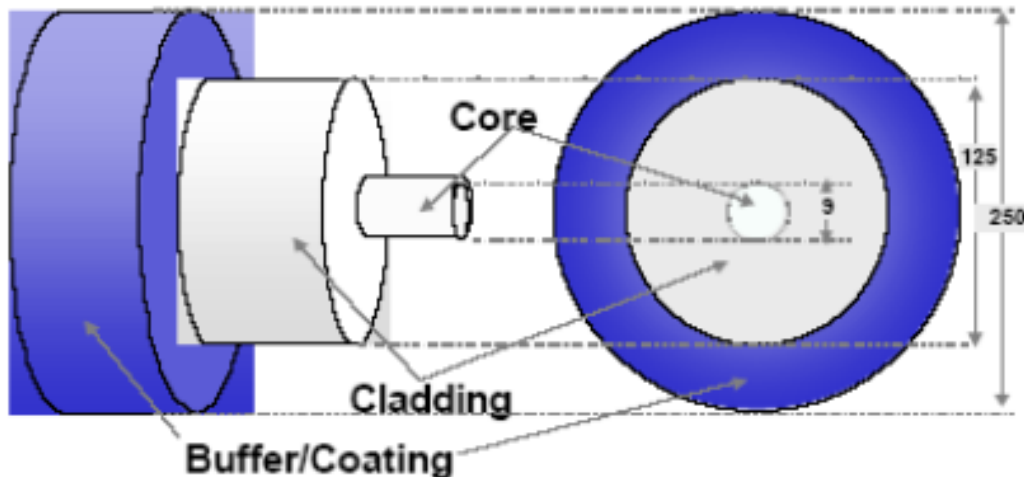
- Índice refração do núcleo
 - a) Índice-degrau
 - b) Índice-gradual

Fibra Óptica Monomodo

Dimensões e geometria

A fibra óptica monomodo é composta por 3 partes:

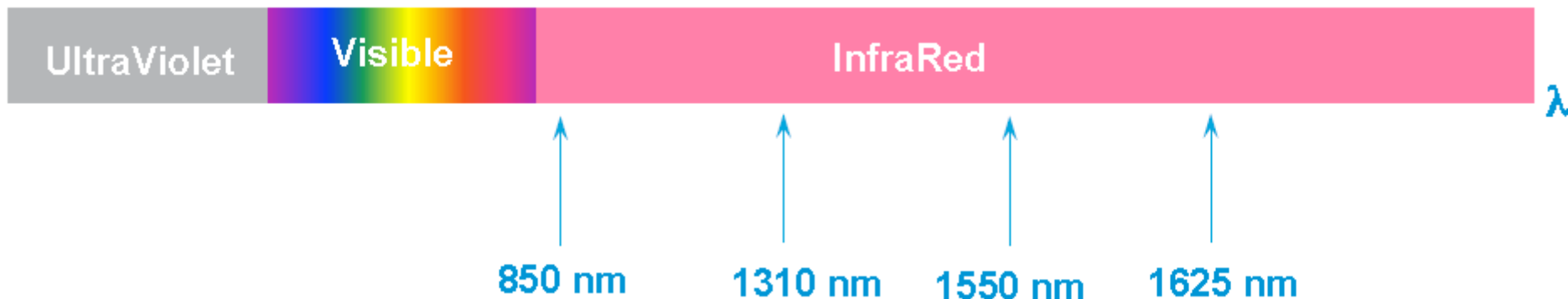
- O núcleo (Core) que é responsável pela transmissão da luz (diâmetro $\sim 9 \mu\text{m}$)
- O índice de refração entre o núcleo e casca (cladding) que mantém a luz no interior da fibra (diâmetro $\sim 125 \mu\text{m}$)



- A capa externa (coating) para a proteção da fibra (diâmetro $\sim 250 \mu\text{m}$)

FIBRAS ÓPTICAS

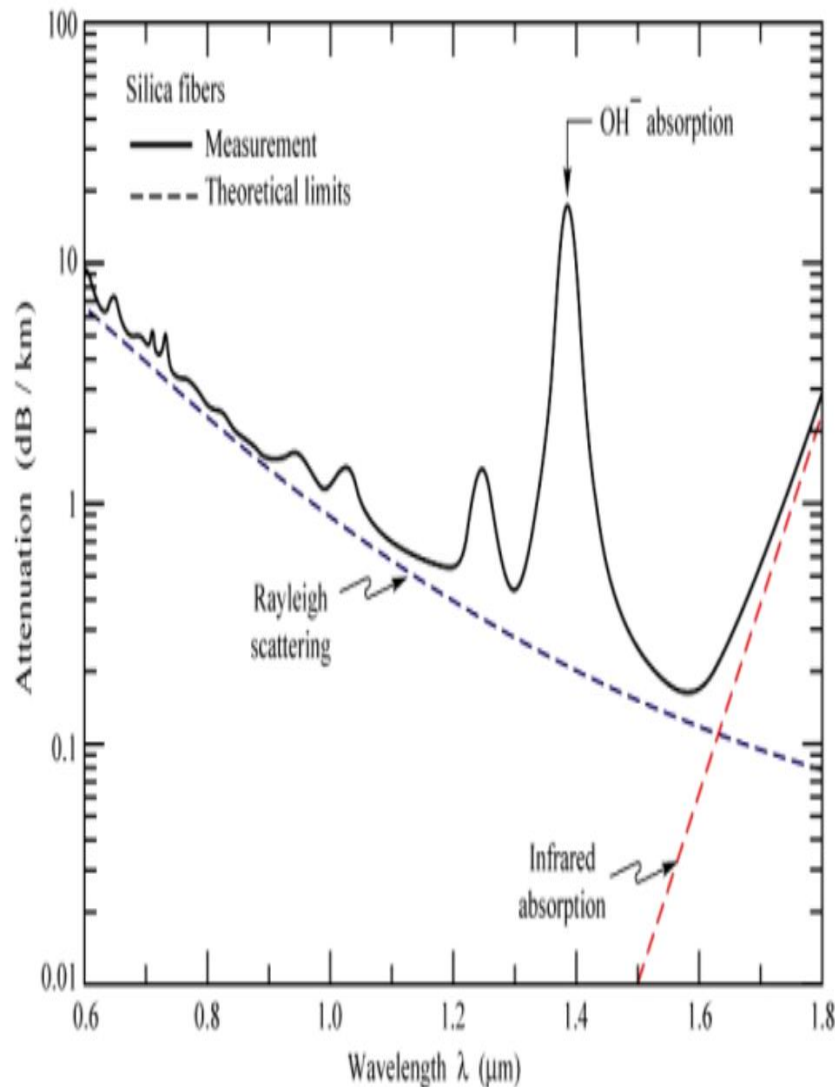
Região de operação → frequências de infravermelho



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

Regiões com atenuação reduzida em fibras ópticas comerciais

ATENUAÇÃO DAS FIBRAS ÓPTICAS



Principais mecanismos de atenuação em função do comprimento de onda:

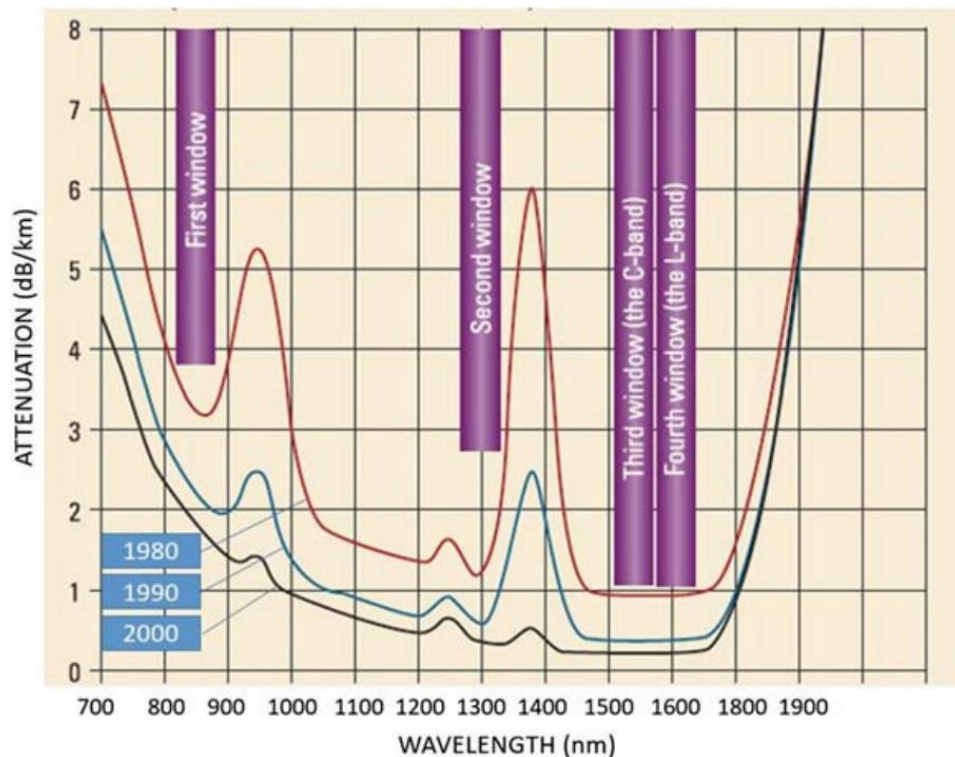
- **Absorção (α):** que depende do material e do comprimento de onda.
- **Espalhamento de Rayleigh (S):** A luz choca-se com partículas do material, que é desviada para outra direção. A perda por este efeito é dada por:

$$S = A_0 \cdot \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^4 \quad (\text{dB/km})$$

A_0 é uma constante que depende do material.

EVOLUÇÃO NA ATENUAÇÃO DAS FIBRAS ÓPTICAS

Atenuação da fibra óptica em função do comprimento de onda



Fiber optic attenuation spectrum
with the telecom windows

Year	Record Attenuation ⁺ (dB/km)	Attenuation of G.652 at 1550 nm (dB/km)
1970	20*	
1973	5**	
1976	0.47***	
1979	0.20	
1986	0.154	0.26
2001	0.152	0.20
2002	0.1495	0.20
2004		0.19
2007		0.18
2013	0.1480	0.17
2015	0.1460	

⁺In 1550nm-1600nm window unless wavelength is designated

* 632.8 nm, ** 850 nm *** 1200nm

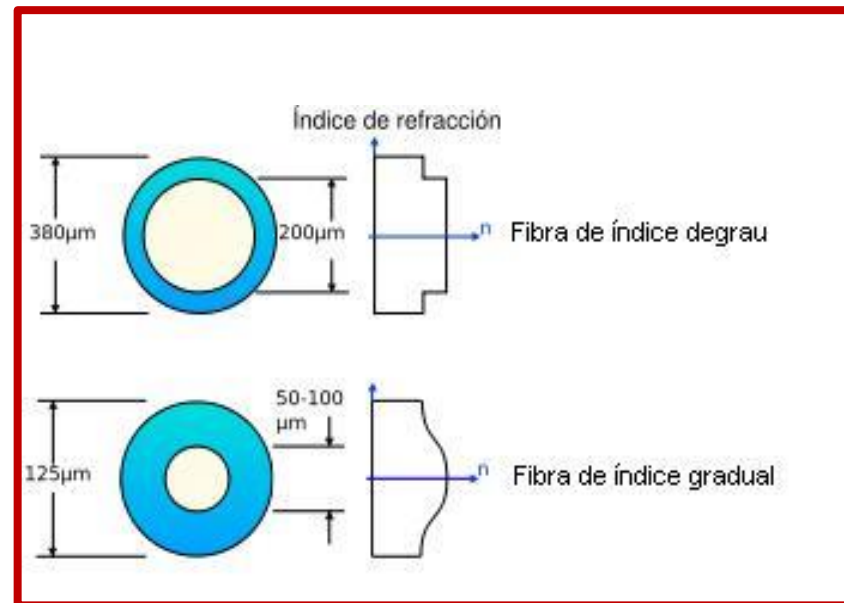
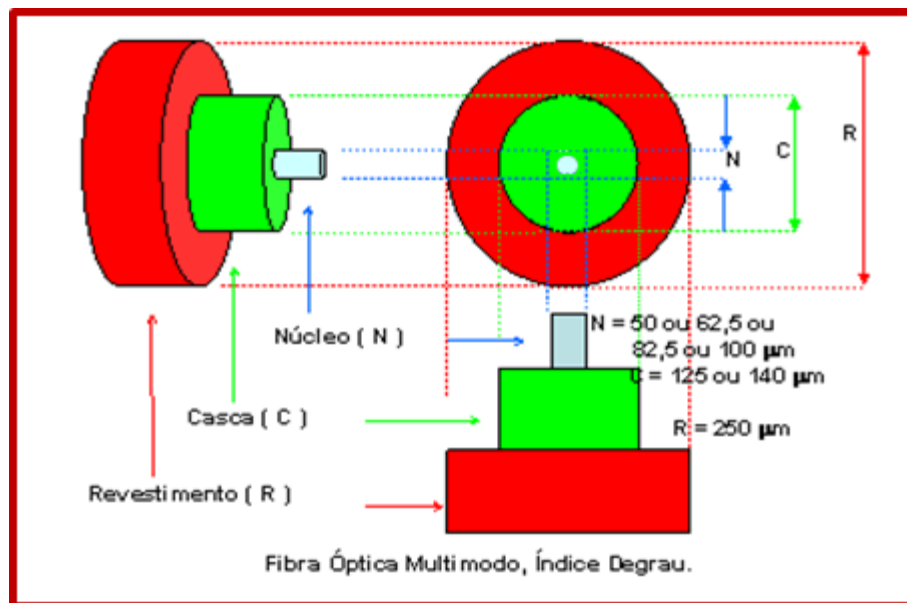
FIBRAS ÓPTICAS – Bandas de Utilização

Designação	Banda (nm)	Tipo de fibra	Aplicações
—	820-900	Multimodal	LAN, Ethernet Ex: 1000 Base-Sx
O	1260-1360	Monomodal	Mono $-\lambda$ PON, Ethernet
C	1530-1565	Monomodal	Mono $-\lambda$ e WDM
L	1565-1625	Monomodal	WDM
E	1350-1450	Monomodal	WDM
S	1460-1530	Monomodal	WDM, LAN PON
U	1625-1675	<u>Monomodal</u>	WDM

Tipos de 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 500 Mb/s (2020)
- **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 de Tb/s

Fibra Óptica Multimodo - Dimensões e geometria



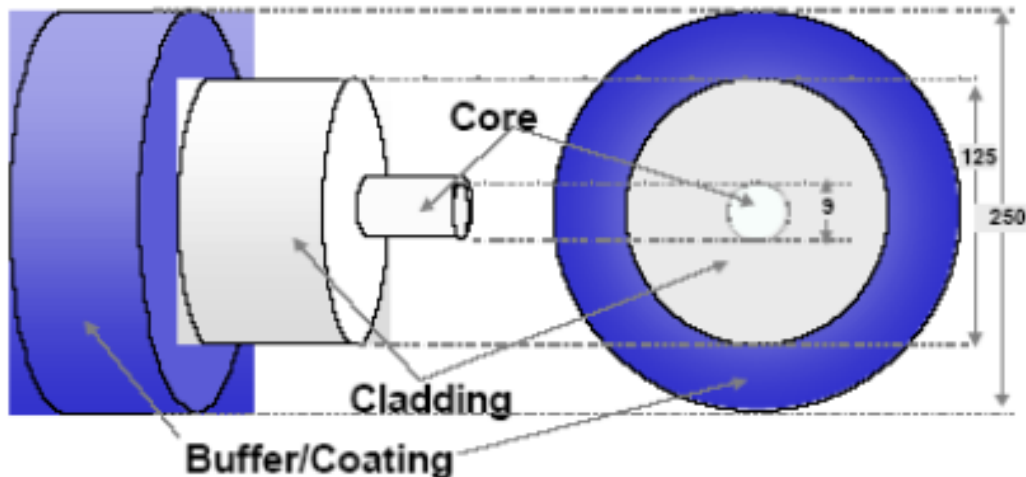
- Diâmetro da Casca
Varia de 140 a 400 μm
- Diâmetro do núcleo
Varia de 50 a 200 μm
- Índice refração do núcleo
 - a) Índice-degrau
 - b) Índice-gradual

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 (diâmetro $\sim 9 \mu\text{m}$)
- O índice de refração entre o núcleo e casca (cladding) que mantém a luz no interior da fibra (diâmetro $\sim 125 \mu\text{m}$)



- A capa externa (coating) para a proteção da fibra (diâmetro $\sim 250 \mu\text{m}$)

Algumas leis básicas da óptica

Índice de Refração

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\epsilon_r\mu_r}$$

c = speed of light in vacuum ($\approx 3 \times 10^8$ m/s)

v = speed of light in medium

Permeability in vacuum

$= 4\pi \times 10^{-7}$ N s²/C²

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$$

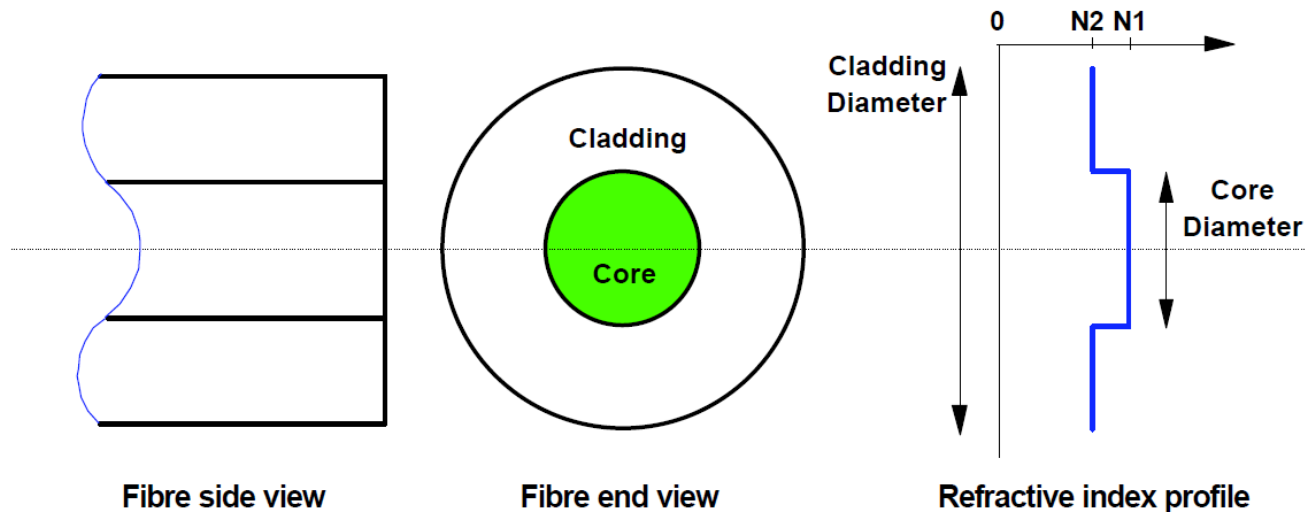
Permittivity in vacuum

$= 8.854 \times 10^{-12}$ C²/N m²

For most materials in the optical region: $\mu_r \approx 1 \Rightarrow n \approx \sqrt{\epsilon_r}$

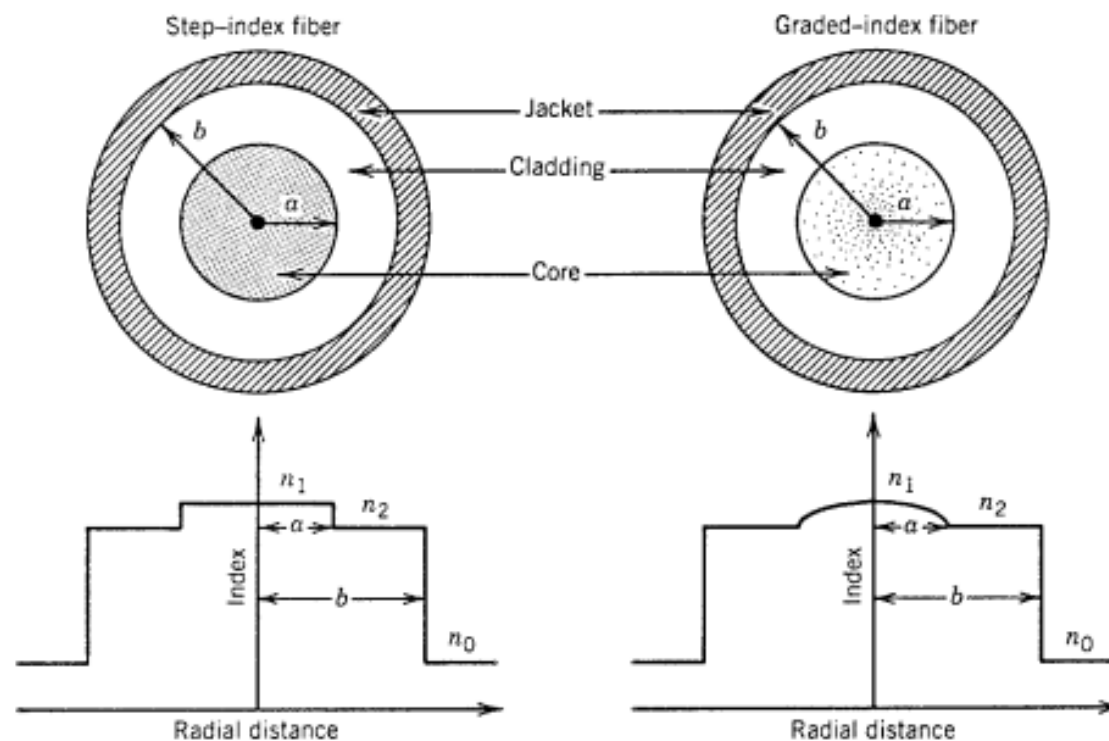
Meio material	Índice de refração (n)
ar	1,00
água	1,33
vidro	1,50
glicerina	1,90
álcool etílico	1,36
diamante	2,42
acrílico	1,49

Índice de refração no perfil da fibra óptica



- Fibra óptica com índice de refração em degrau
- O primeiro e mais simples perfil de fibra
- Índice de refração do núcleo é N_1 e da casca é N_2

Perfil da Fibra Óptica Multimodos



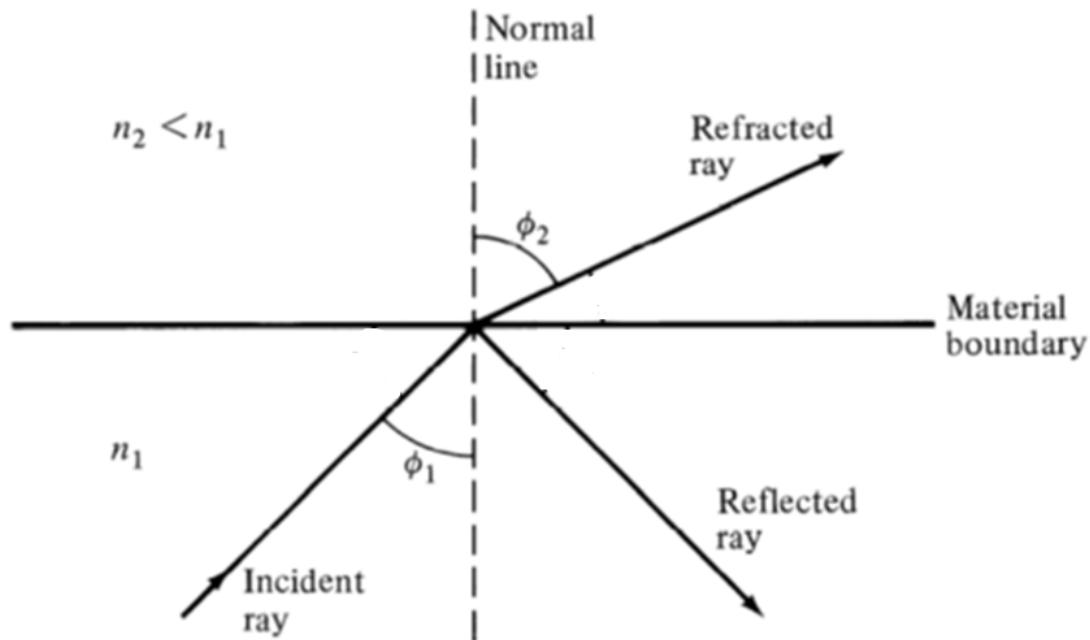
Perfil de índice de refração em degrau (step)

Perfil de índice de refração gradual para redução da dispersão

Algumas leis básicas da óptica

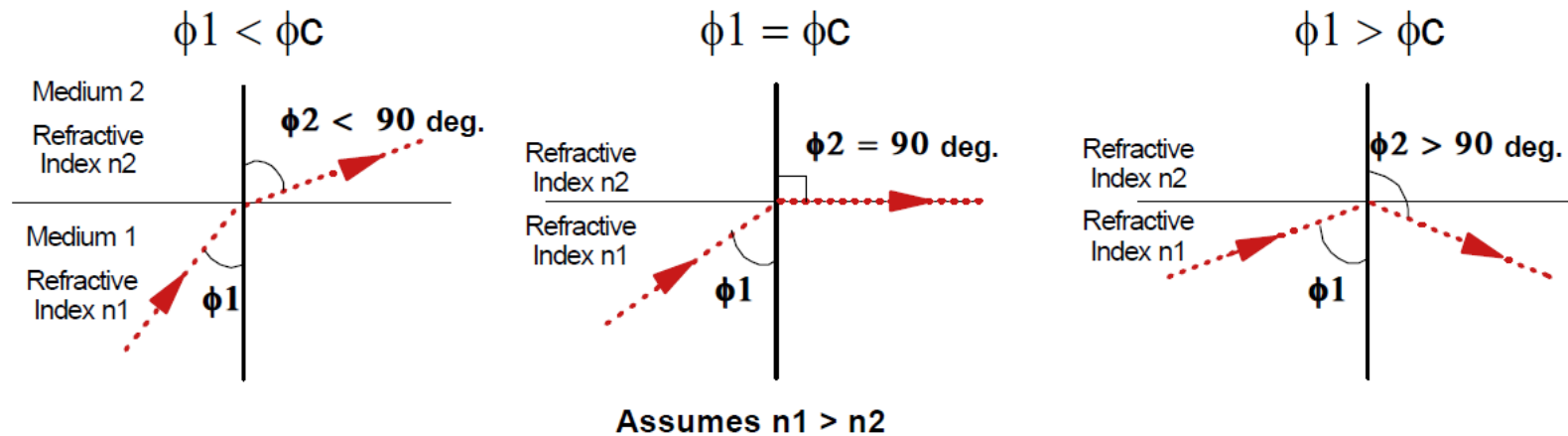
Lei de Snell-Descartes

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2$$



Algumas leis básicas da óptica

Reflexão Interna Total



Luz propagando-se numa fibra

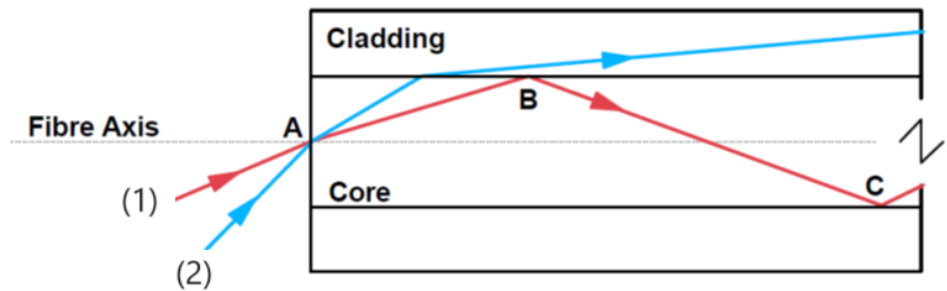
Ângulo Crítico

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

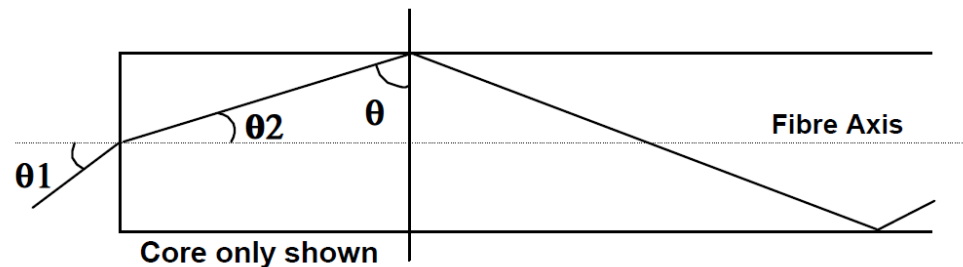


Propagação na fibra óptica - ângulo máximo

- Lembrar que o índice de refração do núcleo é maior que o da casca
- O raio (1) sofre reflexão total e o raio (2) não sofre.



- O ângulo θ precisa ser maior que o ângulo crítico para reflexão total.
- Apenas os raios de luz que entram na fibra com um ângulo θ_1 menor que o ângulo máximo irão se propagar pela fibra



Cálculo do ângulo máximo

Utilizando trigonometria

$$\theta_1 = \sin^{-1}(n_1 \sin(90^\circ - \theta_c))$$

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left[n_1 \sqrt{\cos^2 \theta_c}\right]$$

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left[n_1 \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}}\right]$$

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left[\sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right]$$

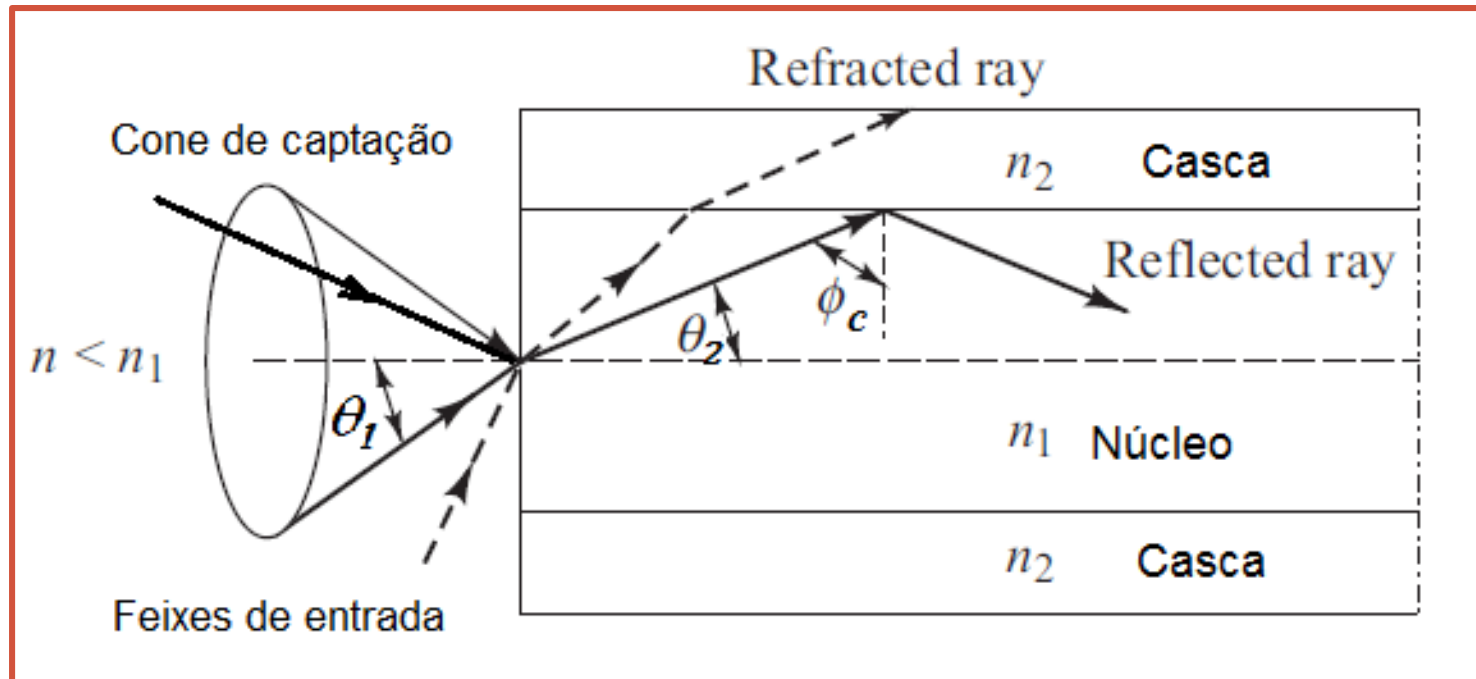
O seno deste ângulo θ_1 é conhecido como **Abertura Numérica** da fibra ou simplesmente **NA**.

Portanto:

$$\text{NA} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$

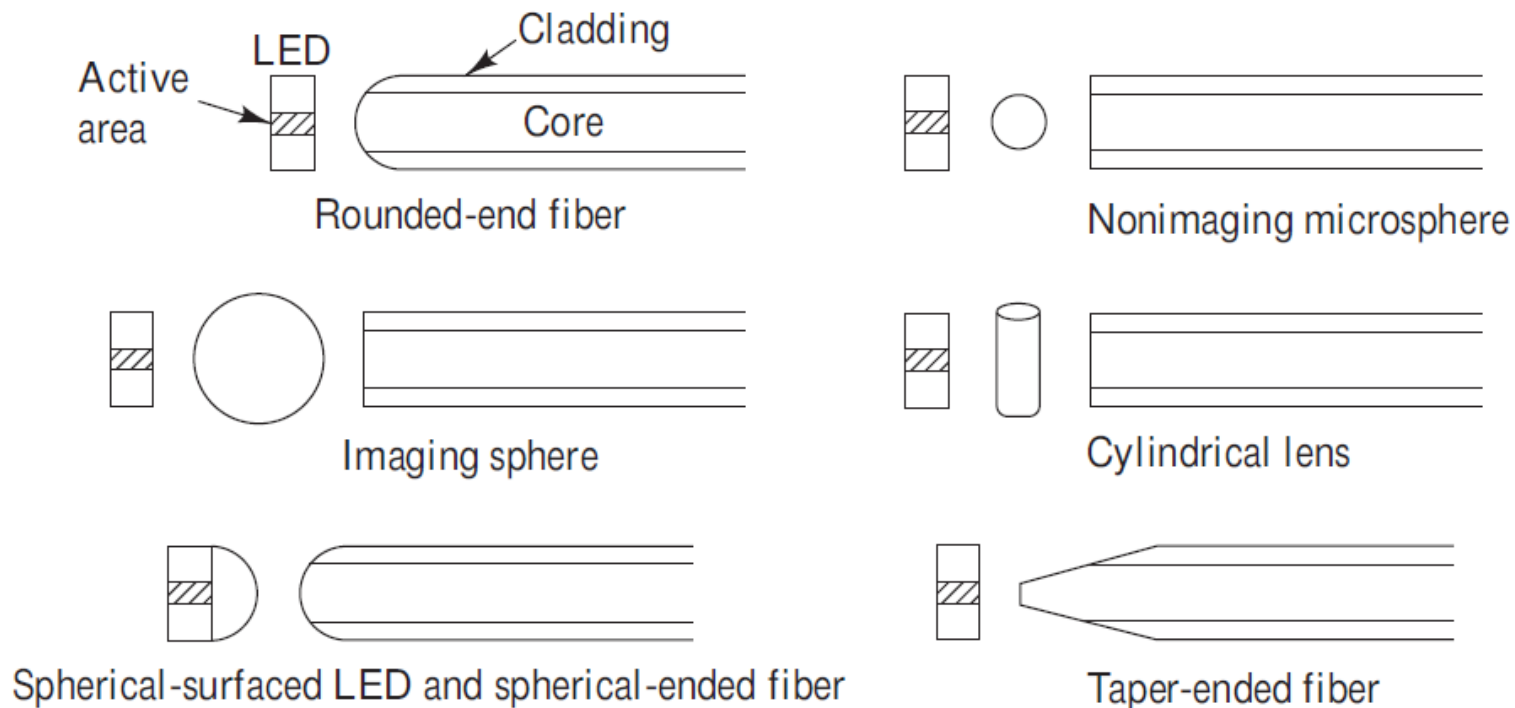
O ângulo θ_1 é conhecido como **Ângulo de Aceitação Máximo**

Propagação na Fibra Óptica - Ângulo Máximo



- Aceitável para propagação
- Não aceitável para propagação

Esquemas de Lentes para Melhoria de Acoplamento de Luz



Um dos métodos mais eficientes é a utilização de uma microesfera de imagem nula (Nonimaging microsphere)

Exercício

Dada uma fibra óptica com perfil de índice de refração em degrau, cujo núcleo apresenta valor de índice de refração de 1,50 e a casca de 1,48, calcule a abertura numérica e o máximo ângulo de aceitação desta fibra.

Exercício

Dada uma fibra óptica com perfil de índice de refração em degrau, cujo núcleo apresenta valor de índice de refração de 1,50 e a casca de 1,48, calcule a abertura numérica e o máximo ângulo de aceitação desta fibra.

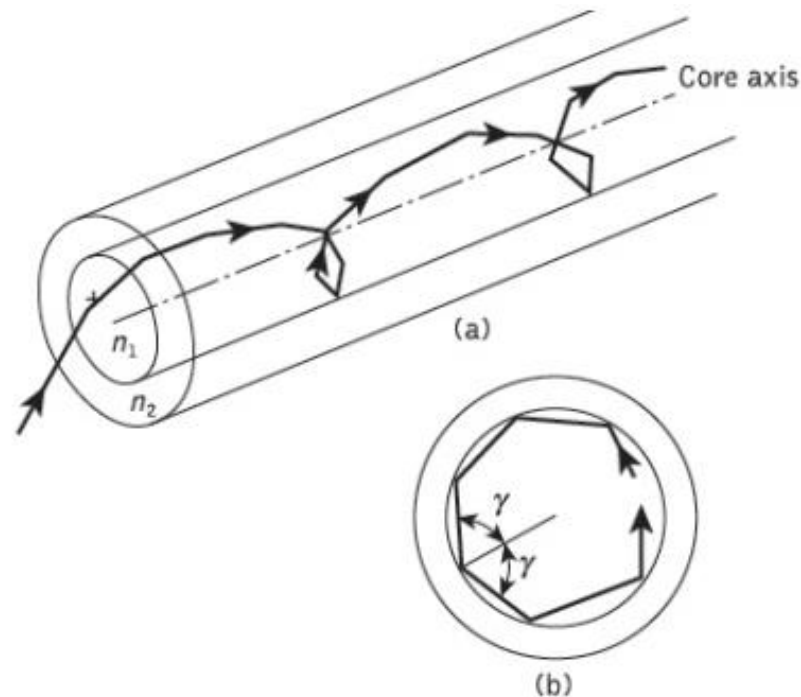
$$NA = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} = \sqrt{(1,50^2 - 1,48^2)}$$

$$NA = 0,244$$

$$\theta_1 = \text{sen}^{-1}(0,244) = 14,13^\circ$$

Propagação helicoidal na fibra (Skew Propagation)

- Os raios de luz não passam pelo eixo central da fibra
- A luz tem um comportamento helicoidal na propagação



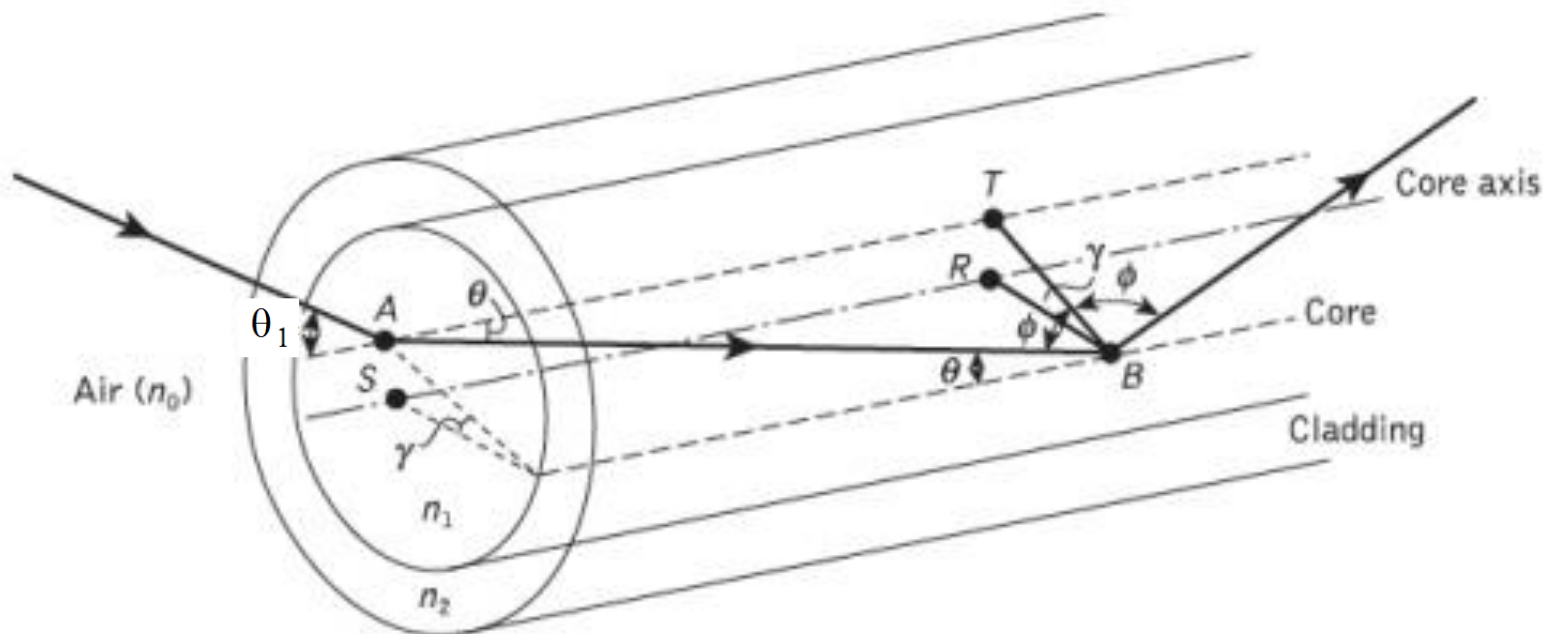
The helical path taken by a skew ray in an optical fiber: (a) skew ray path down the fiber; (b) cross-sectional view of the fiber

Propagação helicoidal na fibra (Skew Propagation)

- A análise para propagação helicoidal é um pouco mais complexa.

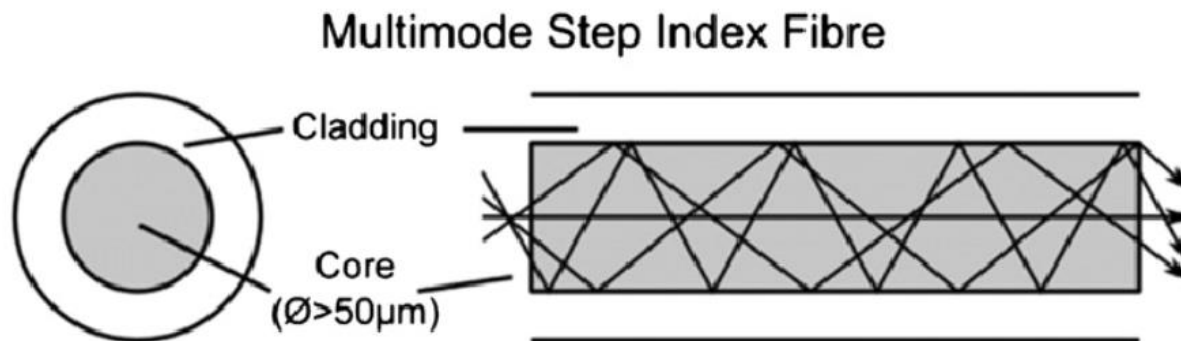
O máximo ângulo de aceitação será calculado a partir da expressão:

$$\theta_1 = \text{Sin}^{-1} \left[\frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{\text{Cos } \gamma} \right]$$



Modos de Propagação na Fibra Óptica

- Assim como em guias metálicos cilíndricos, as fibras ópticas podem apresentar um grande número de modos de propagação.



OBS: A solução das equações de Maxwell para guias ópticos envolve muita álgebra e trabalho. O desenvolvimento matemático pode ser visto na seguinte referência:

E. Snitzer, “*Cylindric dielectric waveguide modes*”, J. Opt. Soc. Am., 51, p. 491, 1961.

1) Fibra de Índice em Degrau

Frequência Normalizada para uma Fibra Óptica

- Trata-se de um parâmetro adimensional que combina várias variáveis da fibra.
- A frequência normalizada “V” é definida pela equação:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

onde “a” é o raio do núcleo da fibra e λ é o comprimento de onda de operação.

- Pode ser usada também a seguinte definição:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \cdot \text{NA}$$

Frequência Normalizada para uma Fibra Óptica

- Podemos calcular V em função parâmetro do Δ , conhecido como diferença relativa entre os índices de refração, dado pela equação

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

Se Δ for $\ll 1$, então Δ é dado por:

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

Intervalos de valores típicos para Δ :

- 1% a 3% para fibras multimodos
- 0,2% a 1% para fibras monomodo

Frequência Normalizada para uma Fibra Óptica

- Com isso a equação de V pode ser reescrita como:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \cdot n_1 \sqrt{2\Delta}$$

- O parâmetro V também é chamado de **número V** .

A dedução de “ V ” é apresentada no artigo . “Asymptotic Expressions for Eigenfunctions and Eigen Values of a Dielectric or Optical Waveguide” Dec, 1969. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques

Número de modos de uma Fibra Índice em Degrau

- O parâmetro V também é chamado de *número V* .
- O número de modos propagando-se por uma fibra com índice em degrau multimodo é dependente das dimensões da fibra, da relação Δ e do comprimento de onda da fonte de luz utilizada.
- Este número de modos M em função da frequência normalizada pode ser calculado pela expressão abaixo:

$$M \approx \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2) = \frac{V^2}{2}$$

Número de modos em função do diâmetro do núcleo e de λ

Exercício: Uma fibra índice em degrau com diâmetro do núcleo de $80 \mu\text{m}$ tem uma diferença relativa entre os índices de refração de 1,5% ($\Delta=0,015$), índice de refração do núcleo de 1,48 e opera com 850 nm. Calcule a Frequência Normalizada e o número de modos propagando-se pela fibra.

(Resposta: $V=75,8$ e $M=2873$)

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \cdot n_1 \sqrt{2\Delta}$$

$$V = \frac{2\pi}{850} \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 1,48 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,015} = 75,8$$

$$M \approx \frac{V^2}{2} \longrightarrow M = \frac{75,8^2}{2} = 2873$$

Número de modos em função do diâmetro do núcleo e de λ

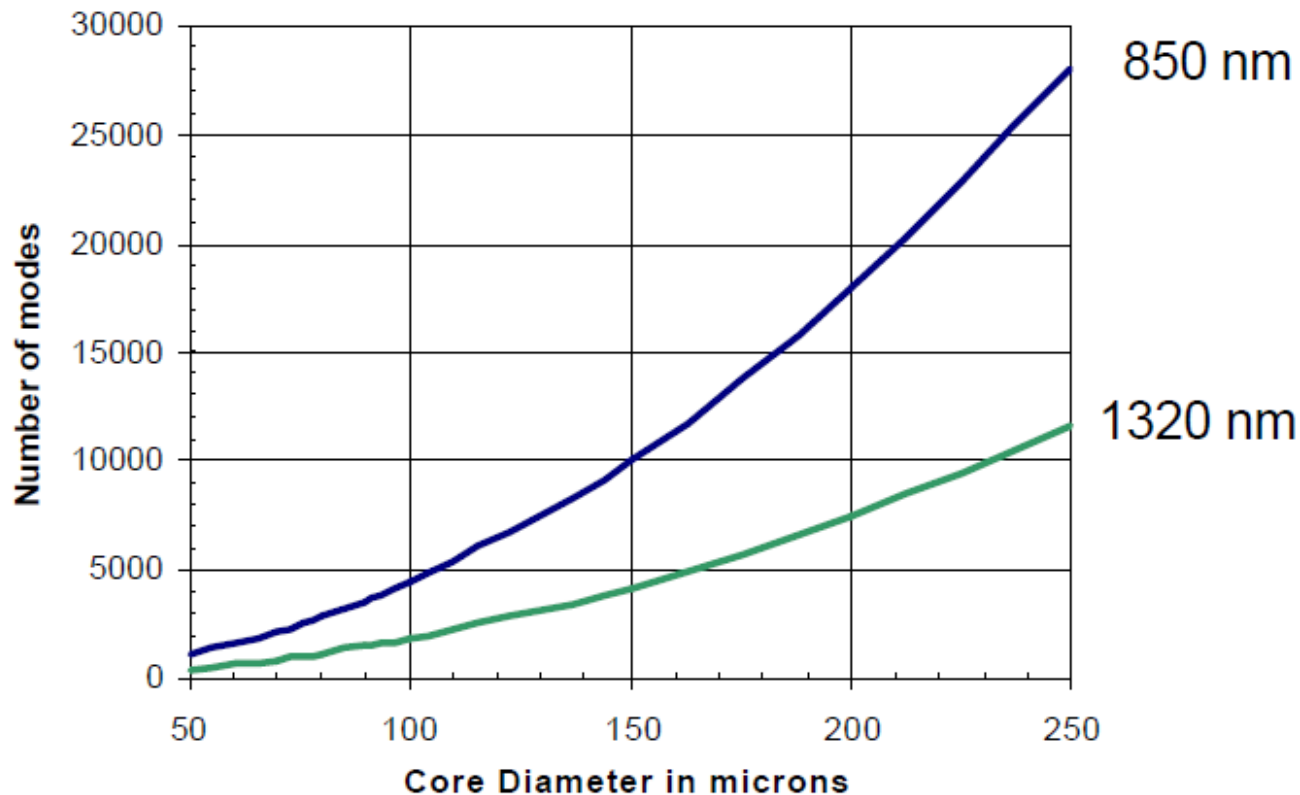


Gráfico mostra a variação do número de em função do diâmetro do núcleo da fibra óptica para fontes de luz com comprimentos de onda de 820 nm e 1320 nm

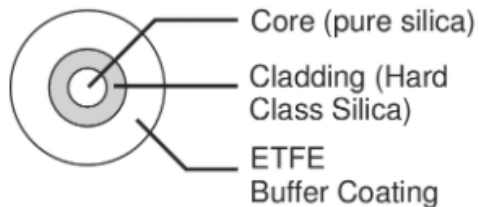


Multimode Fiber, Step Index, 500-1100 nm, 0.37 NA, 200 μm Core

MODEL: F-MBB

Technical Specs

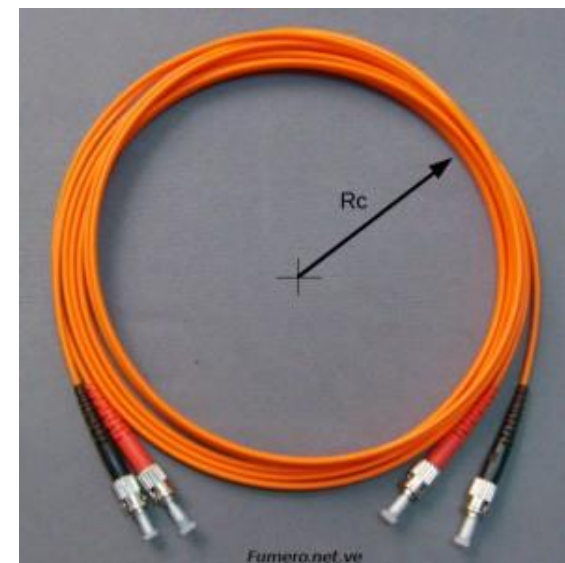
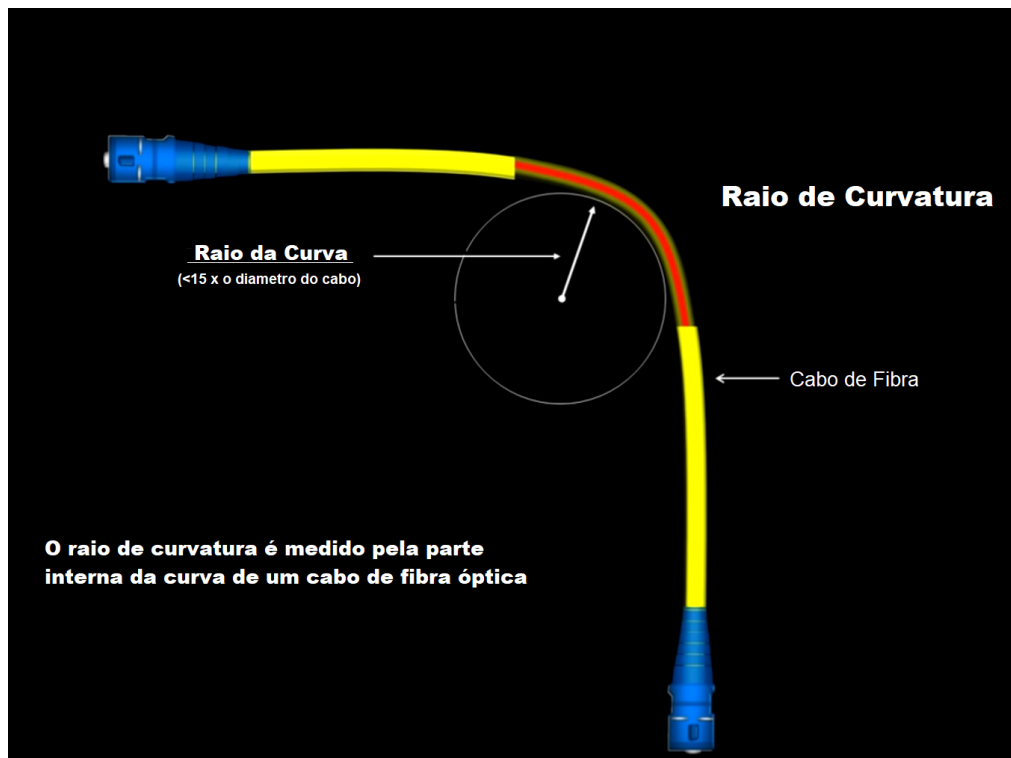
Index Profile	Step	Buffer Coating Material	Dual Acrylate
Fiber Type	Multimode	Bandwidth	20 MHz/km
Core Diameter	200 \pm 4 μm	Bend Radius 60 min./20 yrs.	10/16 mm
Cladding Diameter	230 +0/-10 μm	Numerical Aperture	0.37
Coating Diameter	500 \pm 30 μm	Proof Test	100 kpsi
Operating Wavelength	500-1100 nm		



Fibra comercializada pela Newport Corporation

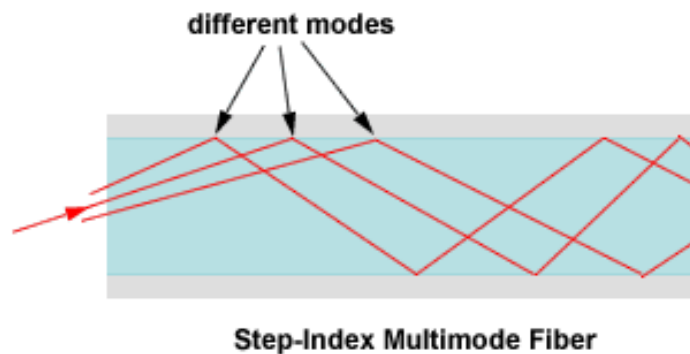
Raio Mínimo de Curvatura de uma Fibra Óptica

As fibras ópticas podem ser dobradas, mas existe um **Raio Mínimo de Curvatura** que deve ser respeitado para que não haja vazamento de luz e/ou a fibra não seja danificada.

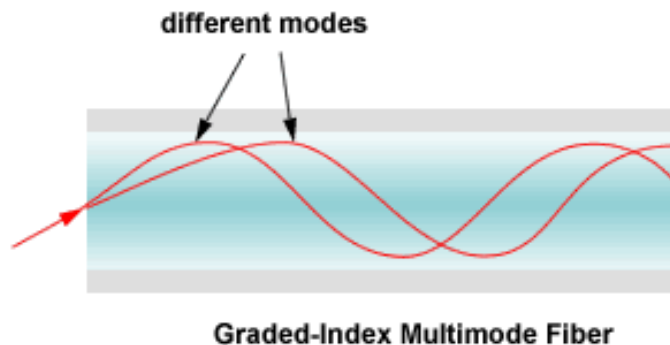


Frequência Normalizada para uma Fibra Óptica

2) Fibra de Índice Gradual



- Diâmetro do núcleo varia de 50 a 120 μm
- Os raios de luz seguem caminhos curvos dentro da fibra



Principais vantagens

- Reduz o número de modos
- Capacidade de transmissão de dados é maior

Frequência Normalizada para uma Fibra Óptica

2) Fibra de Índice Gradual

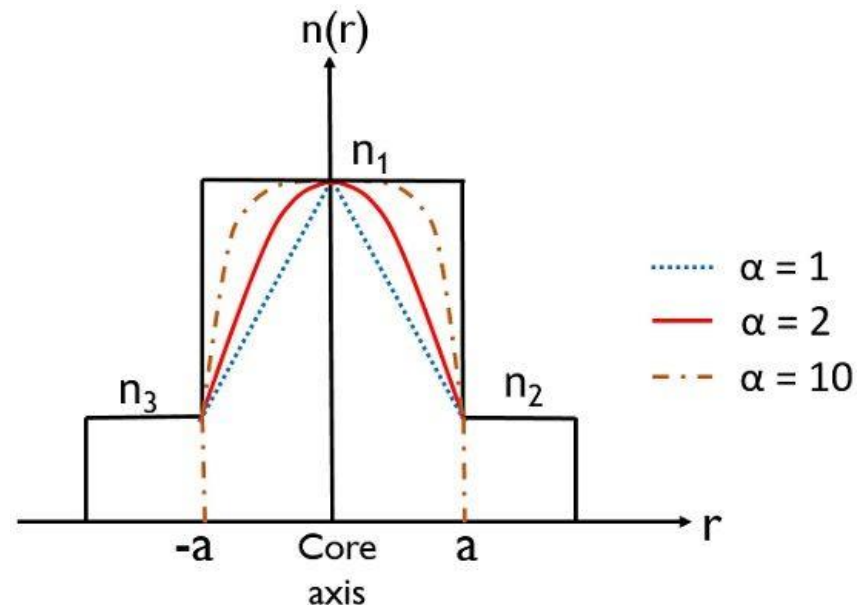
A variação do índice de refração $n(r)$ pode ser representado pela expressão abaixo:

$$n(r) = n_1 \sqrt{(1 - 2\Delta (r/a)^\alpha)}$$

for $r < a$ (core)

$$n(r) = n_1 \sqrt{(1 - 2\Delta)} = n_2$$

for $r > a$ (cladding)



O valor parâmetro de perfil mais comum é $\alpha=2$, conhecido como perfil parabólico.

Frequência Normalizada para uma Fibra Óptica

2) Fibra de Índice Gradual

O número de modos em uma fibra de índice gradual pode ser obtido de forma aproximada pela expressão abaixo:

$$M = \left(\frac{\alpha}{\alpha + 2} \right) \frac{V^2}{2}$$

Utilizando o valor de parâmetro de perfil $\alpha=2$, verifica-se o número de modos que se propagam na fibra de índice gradual será a metade dos modos na fibra de índice em degrau.

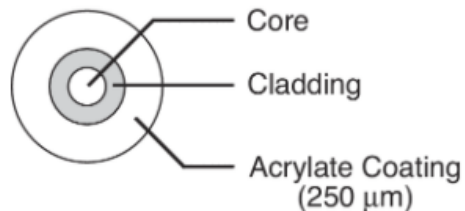


Multimode Fiber, Graded Index, 850/1300 nm, 0.275 NA, 62.5 μm Core

MODEL: F-MFD

Technical Specs

Index Profile	Graded	Buffer Coating Material	Dual Acrylate
Fiber Type	Multimode	Maximum Attenuation	2.9/0.6 dB/km @850/1300 nm
Core Diameter	62.5 \pm 2.5 μm	Bandwidth	200/500 MHz-km @850/1300 nm
Cladding Diameter	125 \pm 1 μm	Numerical Aperture	0.275
Coating Diameter	245 \pm 10 μm	Proof Test	100 kpsi
Operating Wavelength	850/1300 nm		



Fibra comercializada pela Newport Corporation

Modos de Propagação na Fibra Óptica

- 1) Modos TE (Transverse Electric)
- 2) Modos TM (Transverse Magnetic)
- 3) Modo TEM (Transverse ElectroMagnetic)
- 4) Modos HE e EH (Helical or Skew)

Neste caso, há componentes de campo elétrico e magnético na direção de propagação. São chamados de HE ou EH dependendo da maior componente de campo na direção de propagação.

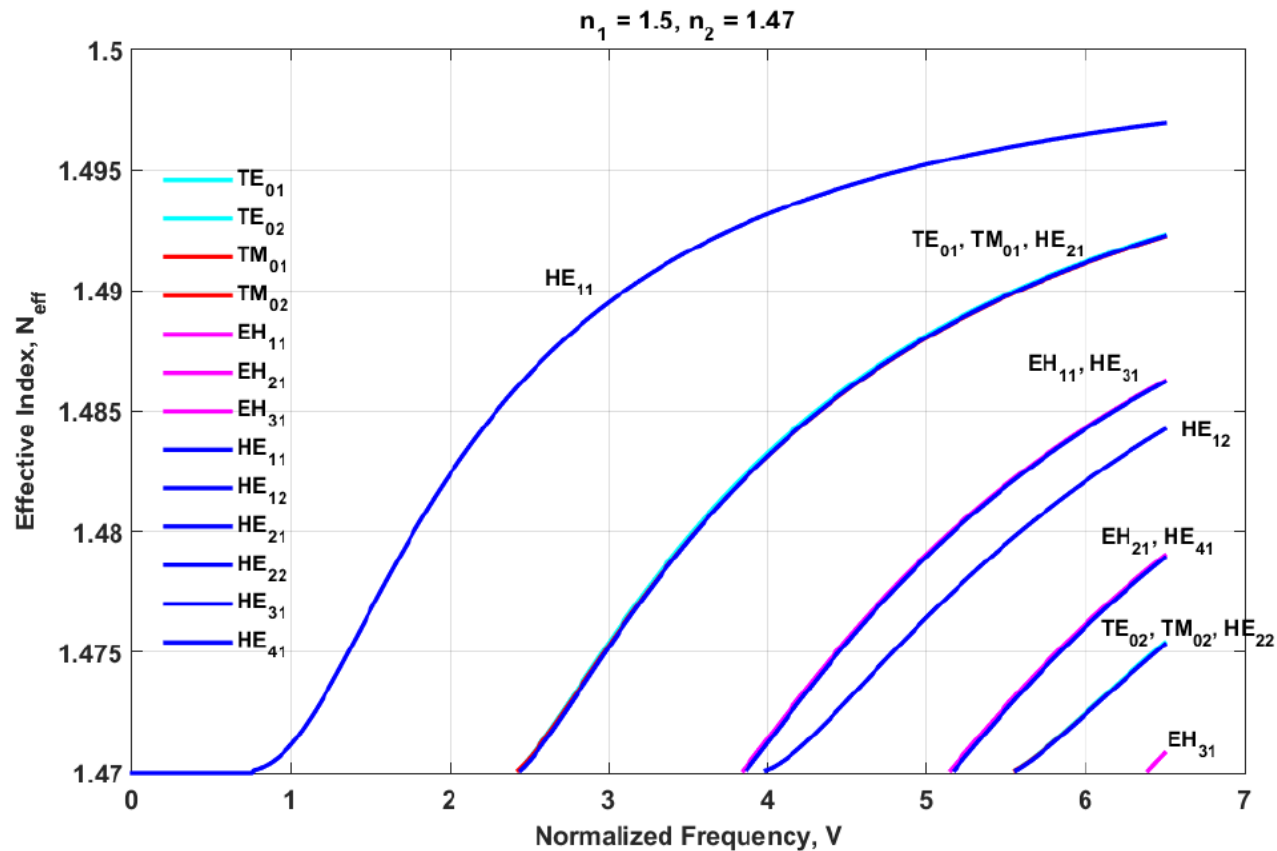
- 5) Modos LP (Linearly Polarised)

A superposição de modos TE, TM, HE e EH com mesma constante de propagação corresponde a um modo LP independentemente da configuração de campos de cada modo.

Modos de Propagação na Fibra Óptica

Mode Effective Index vs Normalized Frequency

Small $\Delta n = n_1 - n_2 = 0.03$



Denominação dos Modos de Propagação

- **TE e TM**

(Transverse Electric e Magnetic)

- **TEM**

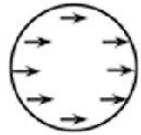



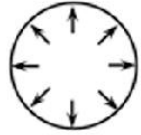



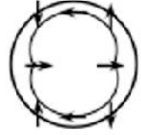

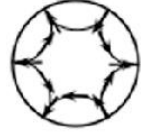

(Transverse ElectroMagnetic)

- **HE ou EH**

(Helical “Skew”)

- **LP**

(Linearly Polarised)

Linearly polarized mode	Hybrid modes	Field distribution	Intensity distribution of E_x
LP_{01}	HE_{11}		
LP_{11}	TE_{01}		
	TM_{01}		
	HE_{21}		
LP_{21}	EH_{11}		
	HE_{31}		

Formação dos Modos LP₁₁

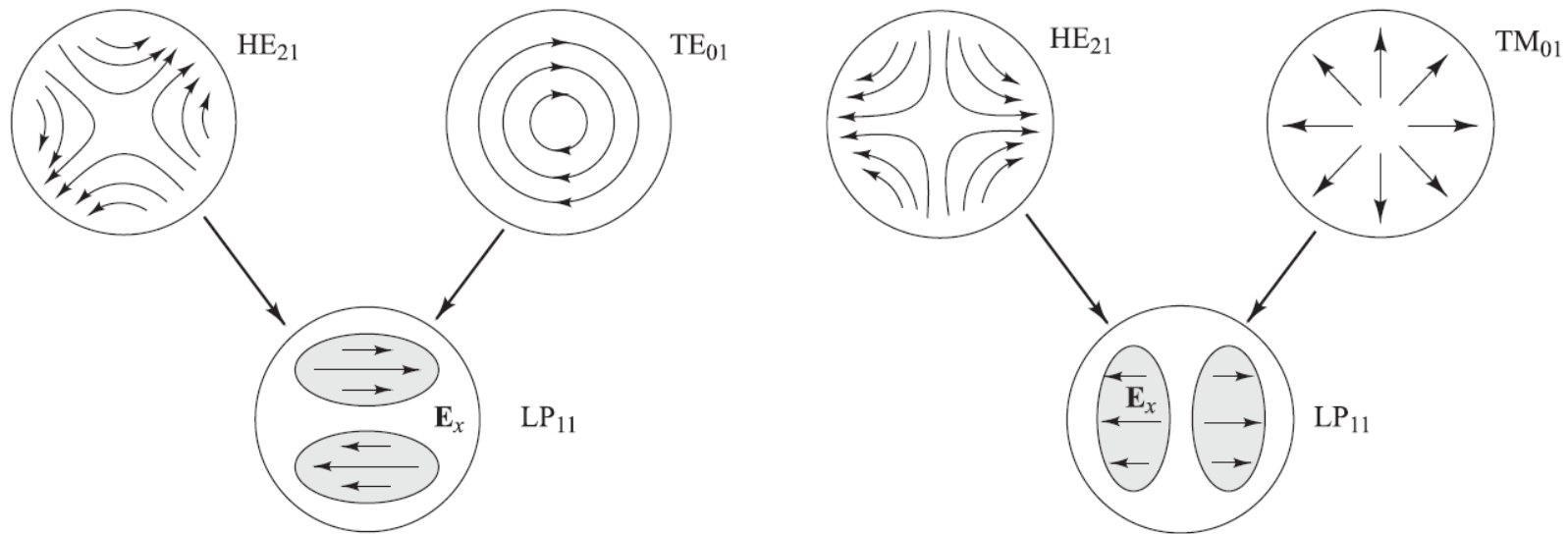
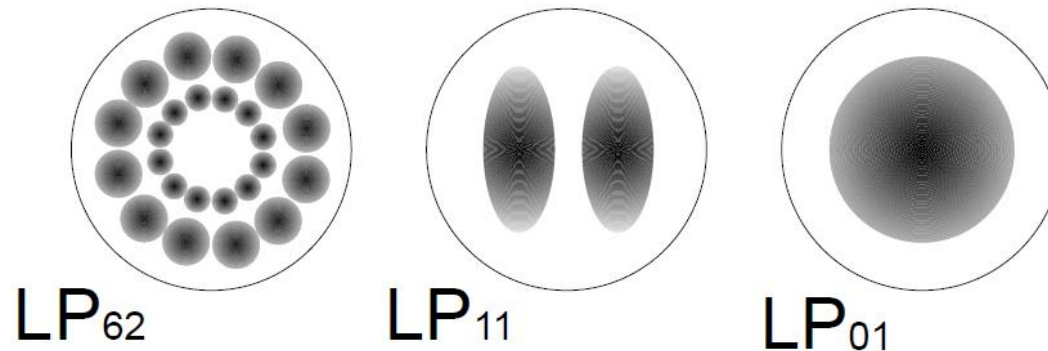


Imagem publicada no livro "Comunicações por Fibras Ópticas", Gerd Keiser, 4a edição. 2014

Composição dos dois modos LP₁₁ a partir dos modos TE₀₁, TM₀₁ e HE₂₁

Os modos TE₀₁, TM₀₁ e HE₂₁ possuem constante de propagação muito próximas na condição de $n_1 - n_2 < 0,02$

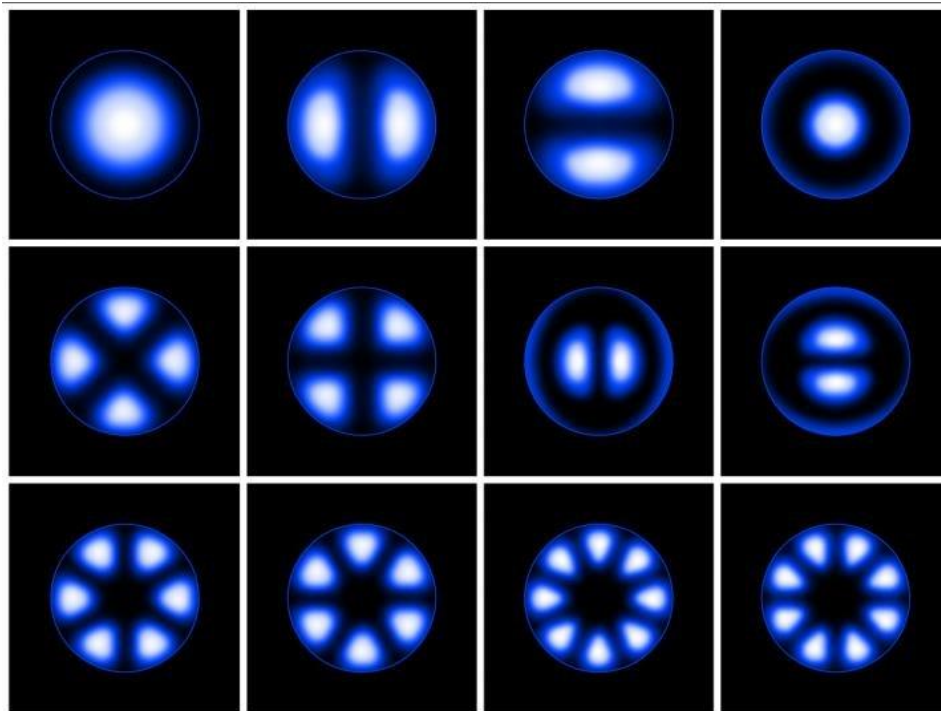
Distribuição de energia de alguns modos LP



- Os modos LP são chamados de LP_{lm} onde “m” é o número de máximos de energia ao longo do raio da fibra. “l” é a metade do número de máximos de energia ao longo da circunferência do núcleo.
- Na prática, TE e TM são utilizados quando trabalhamos com guias planares e LASERs. LP são usados quando estamos tratando de propagação em fibras multimodos.

Modos de Propagação na Fibra Óptica

- Exemplos de distribuição de radiação luminosa no feixe de saída de uma fibra multimodos.

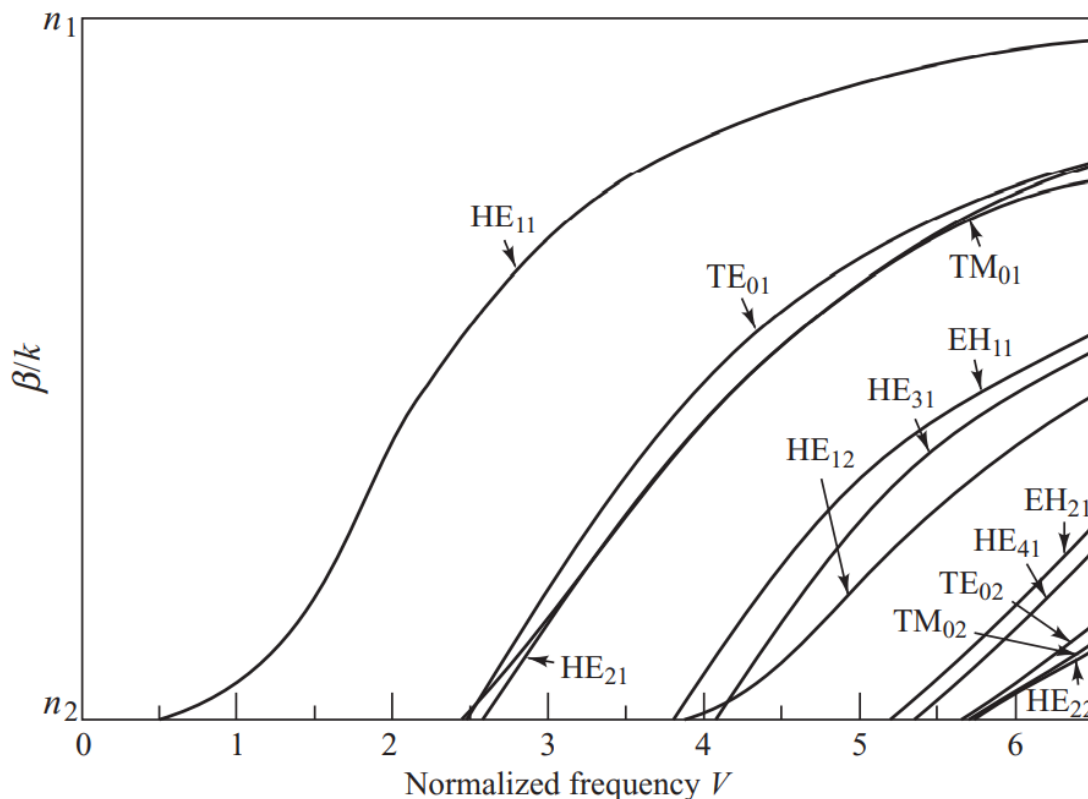


*Imagem publicada no site photonics. “Large-Mode-Area Optical Fibers Maintain Polarization”
Oct, 2017. Courtesy of MIPT (Moscow Institute of Physics and Technology) Press Office.*

Frequência Normalizada para uma Fibra Óptica

3) Fibra Monomodo

A propagação de modos pode ser analisada pelo gráfico abaixo.



A operação em monomodo ocorrerá quando $V_c = 2,405$

Constante de propagação normalizada b

$$b = \frac{(\beta/k)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}$$

Quando $\beta/k < n_2$ não haverá propagação de onda

Exercício: Um engenheiro de produção deseja construir uma fibra óptica com núcleo de índice de 1,480 e uma casca com índice de 1,478. Qual deve ser o raio do núcleo para uma operação monomodo em 1550 nm?

Considerando que a condição $V \leq 2,405$ deve ser satisfeita para uma operação monomodo, temos a seguinte solução:

$$\Rightarrow V = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$a = \frac{V\lambda}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$$

$$\leq \frac{2.405 \times 1.55\mu\text{m}}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(1.480)^2 - (1.478)^2}} = 7.7\mu\text{m}$$

Comprimento de Onda de Corte

A operação em monomodo ocorrerá quando a fibra for excitada com comprimentos de onda abaixo do λ_c teórico, ou seja, para $V < V_c = 2,405$.

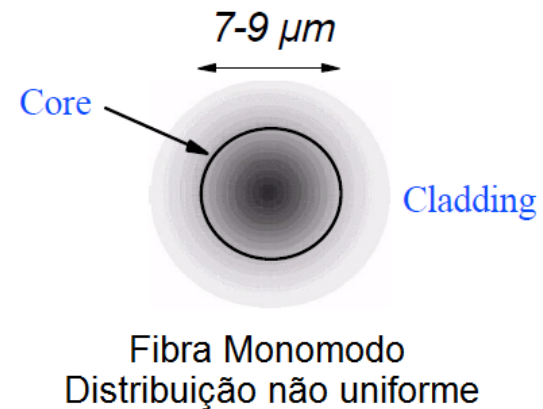
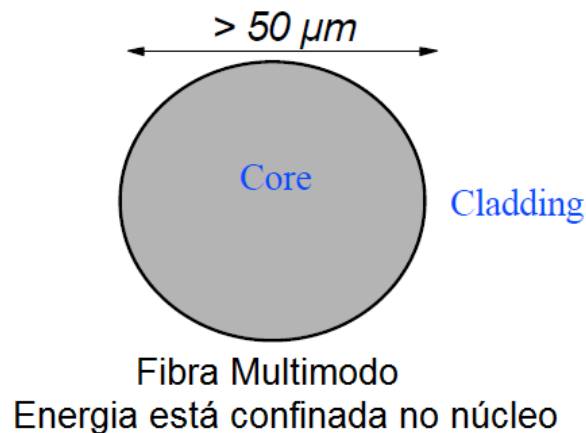
$$\lambda_c = \frac{2\pi}{V_c} a NA$$

Exercício: Uma fibra monomodo tem um núcleo com índice de refração de 1,465 e índice de refração da casca de 1,46.

- Qual é o máximo diâmetro do núcleo se a fibra for utilizada com comprimento de onda de 1300 nm?
- Se o comprimento de onda utilizado for alterado para 1550 nm, qual o novo “V” da fibra?

Distribuição de energia em uma fibra monomodo

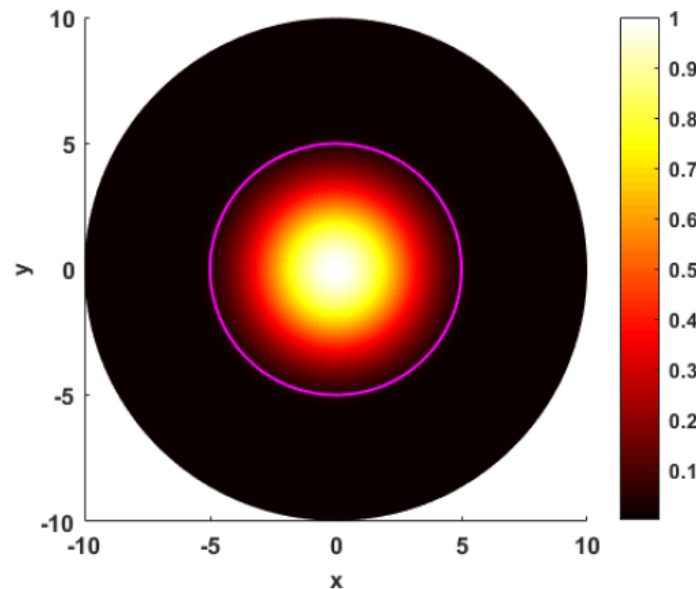
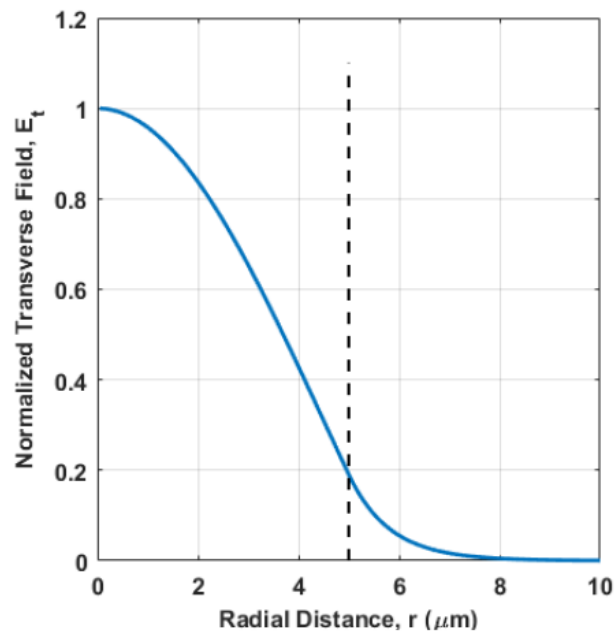
- Na fibra multimodos a energia fica concentrada dentro do núcleo (>99 %)
- Na fibra monomodo parte da energia propaga-se pela casca, o modelo de raio de luz já não funciona mais.



Distribuição de energia do modo HE_{11} - Fibra Monomodo

Parameters: $n_1 = 1.50$, $n_2 = 1.47$, $a = 5\mu\text{m}$, $\lambda_0 = 1.55\mu\text{m}$

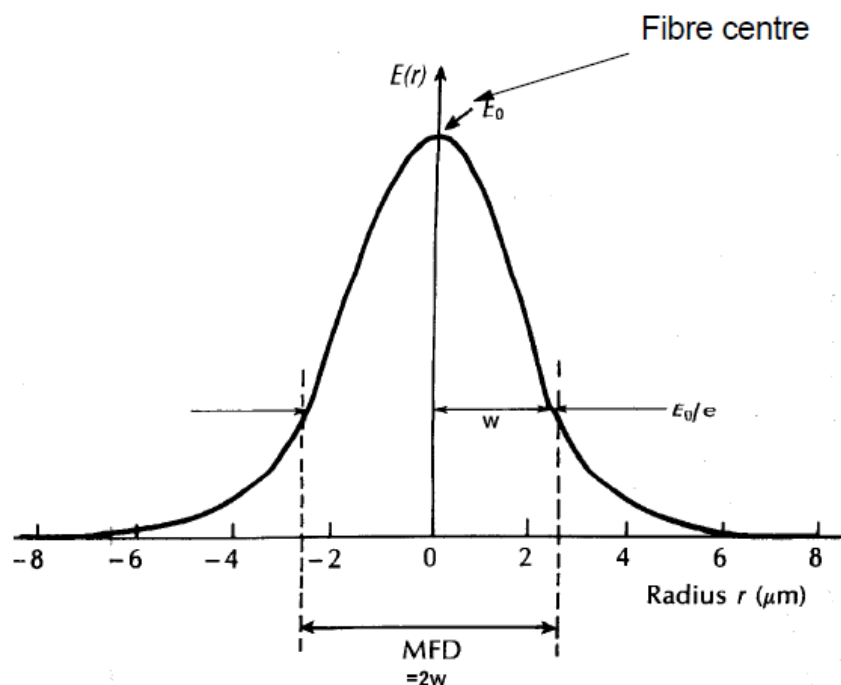
LP_{01} , $N_{\text{eff}} = 1.49656109$, $n_1 = 1.5$, $n_2 = 1.47$, $\lambda_0 = 1.55\mu\text{m}$, $a = 5\mu\text{m}$



- Pureza da casca deve ser alta para manter propagação com baixas perdas.

Diâmetro de Campo Modal – Modo HE₁₁

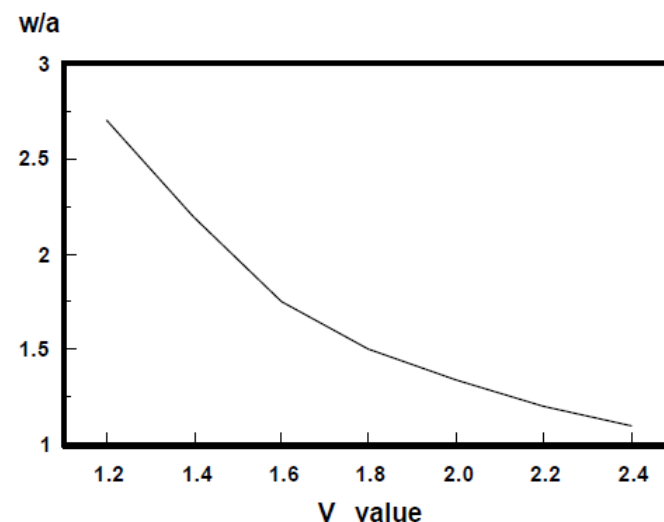
Diâmetro de Campo Modal (MFD) é definido como a largura do feixe de energia do modo HE₁₁



MFD relativo ao raio da fibra

$$\frac{w}{a} = 0.65 + 1.619V^{-3/2} + 2.879V^{-6}$$

O valor de “V” deve ser entre 2,0 e 2,4, senão o MFD é muito maior que o núcleo da fibra.

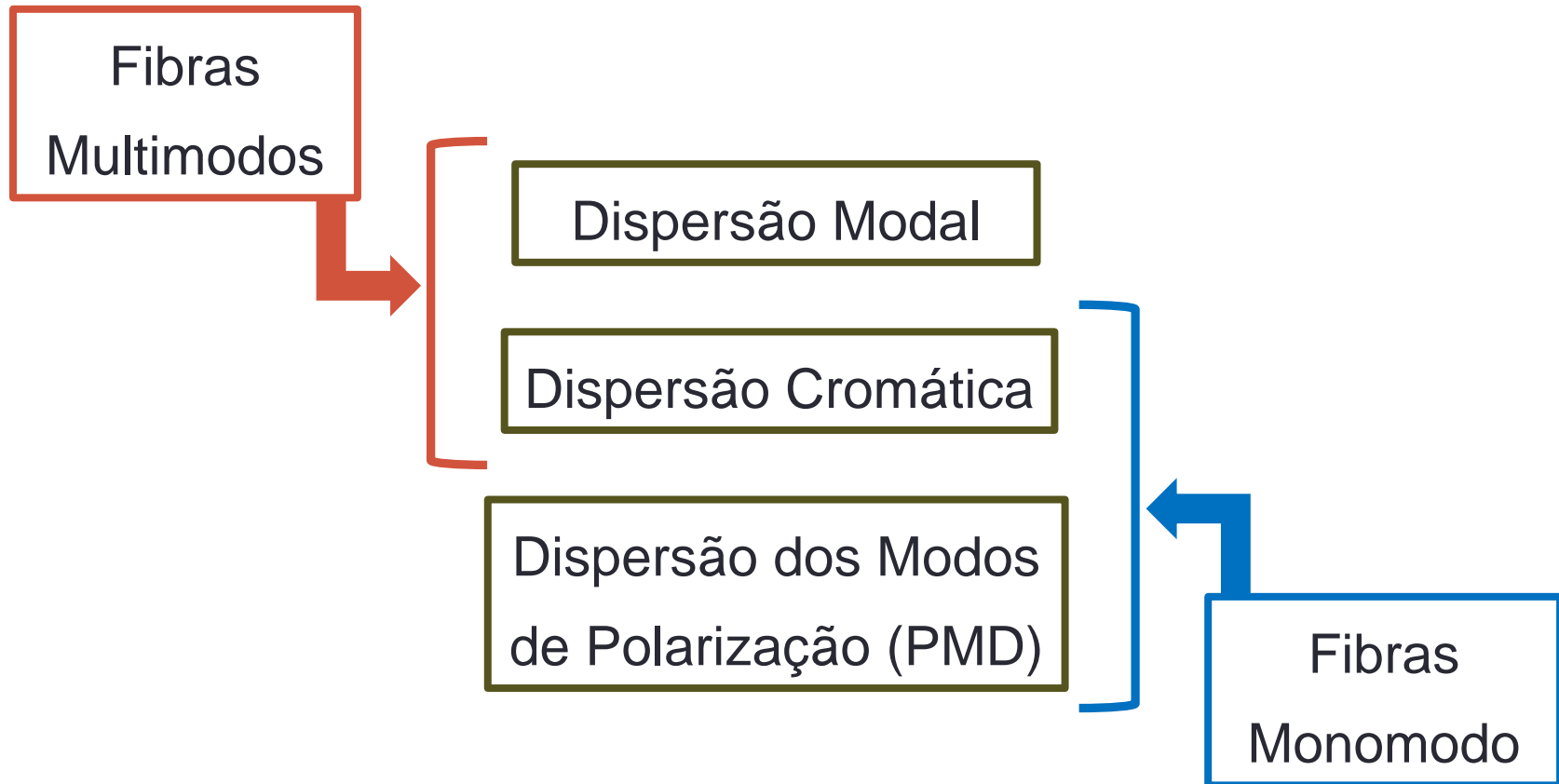


Dispersão e Atenuação

São dois mecanismos importantes de distorção de sinais de luz que se propagam ao longo de uma fibra óptica.

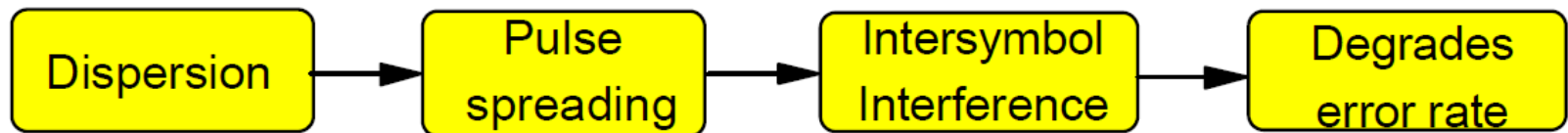
- Dispersão → alarga os pulsos de luz na propagação
→ limita a taxa máxima de bits transmitidos
- Atenuação → reduz a amplitude dos pulsos de luz
→ limita a distância máxima de propagação
→ necessidade de maior número de repetidores

Dispersão em Fibras Ópticas

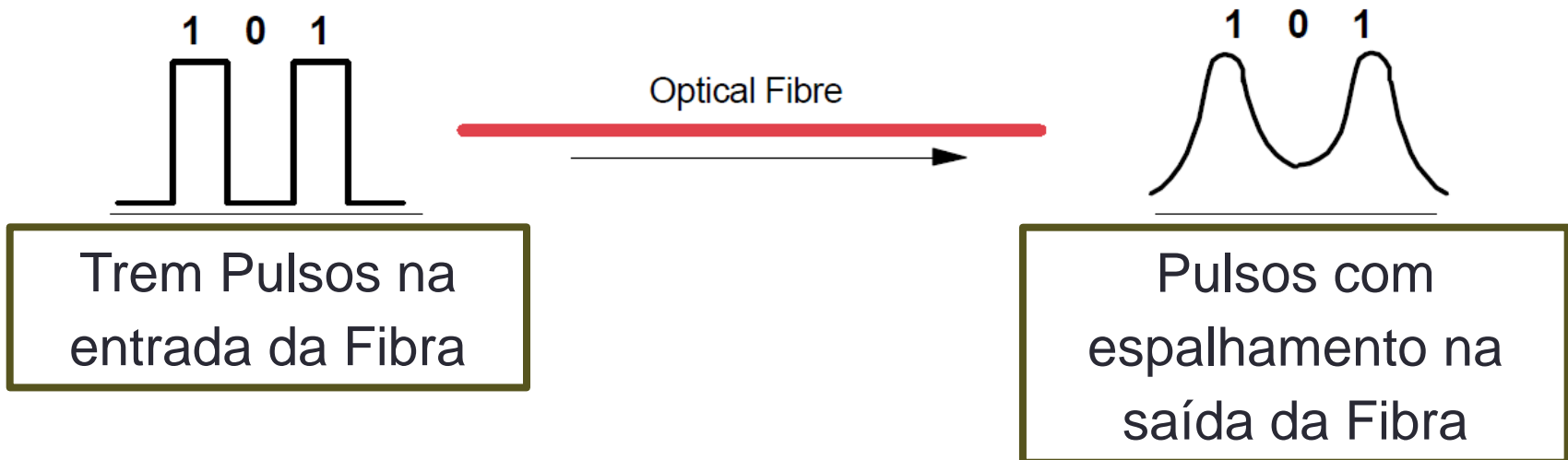


Dispersão em Fibras Ópticas

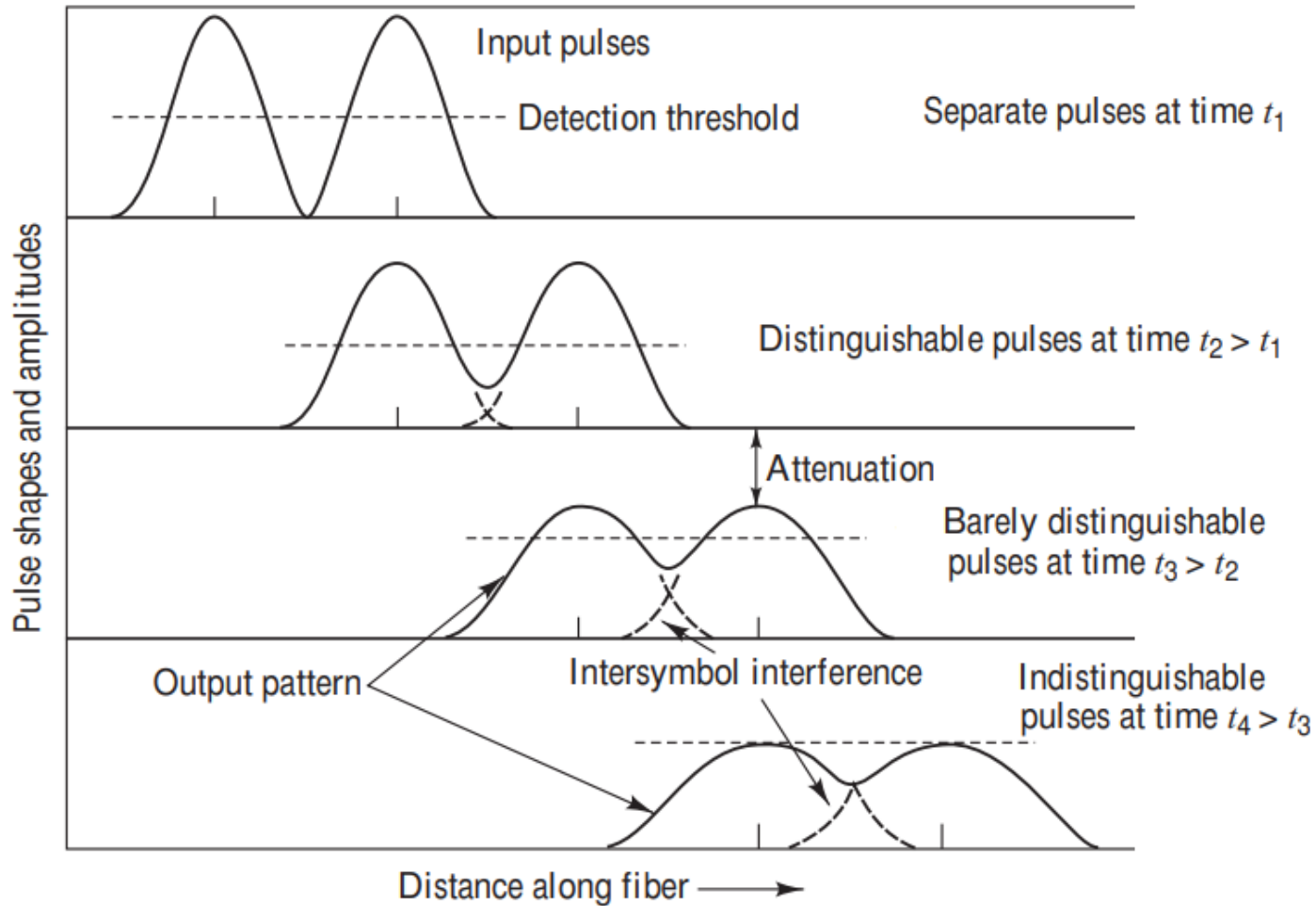
Dispersão pode causar interferência intersimbólica



Example



Dispersão em Fibras Ópticas

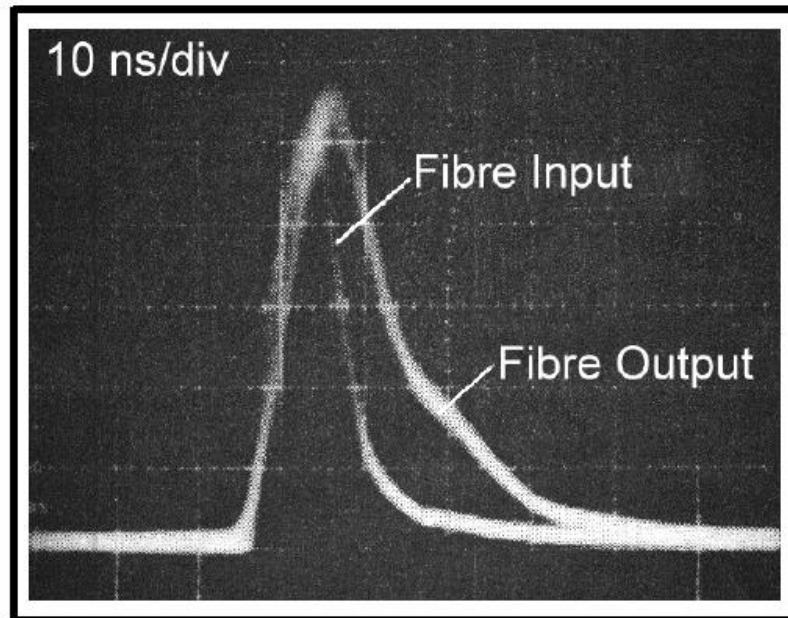


Dispersão ao longo da fibra óptica

Dispersão em Fibras Ópticas

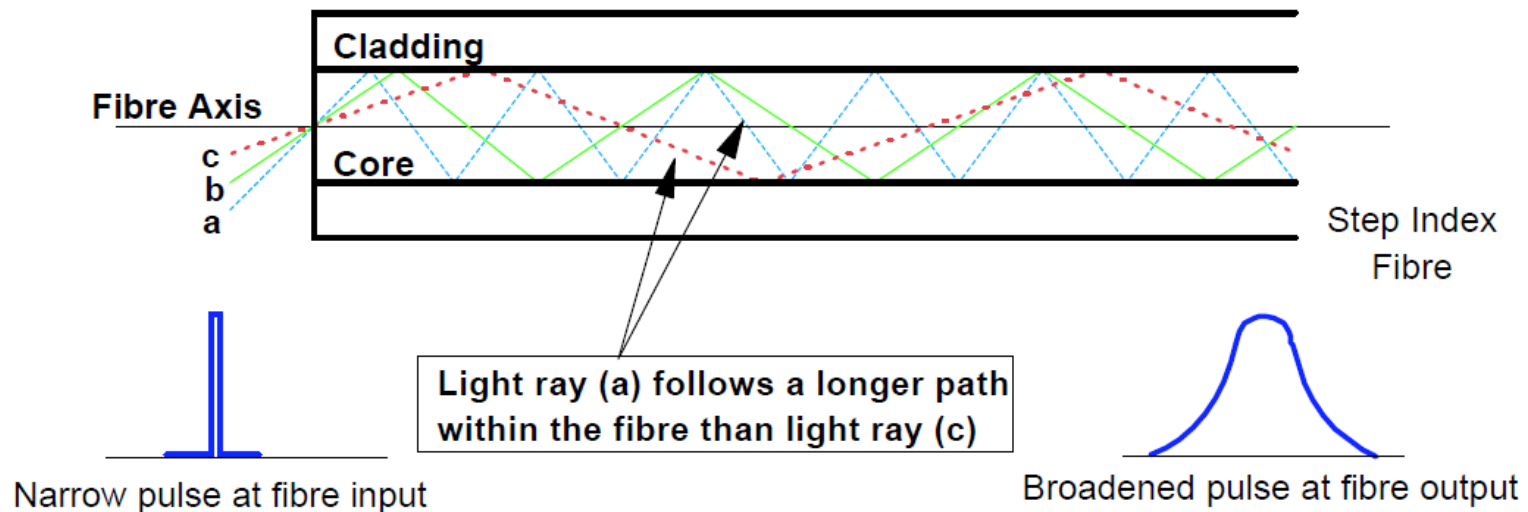
Importante: Quanto maior a dispersão menor será a taxa de bits trafegando na fibra

Foto de pulsos na entrada e na saída de uma fibra de vidro com 200 μm de diâmetro de núcleo



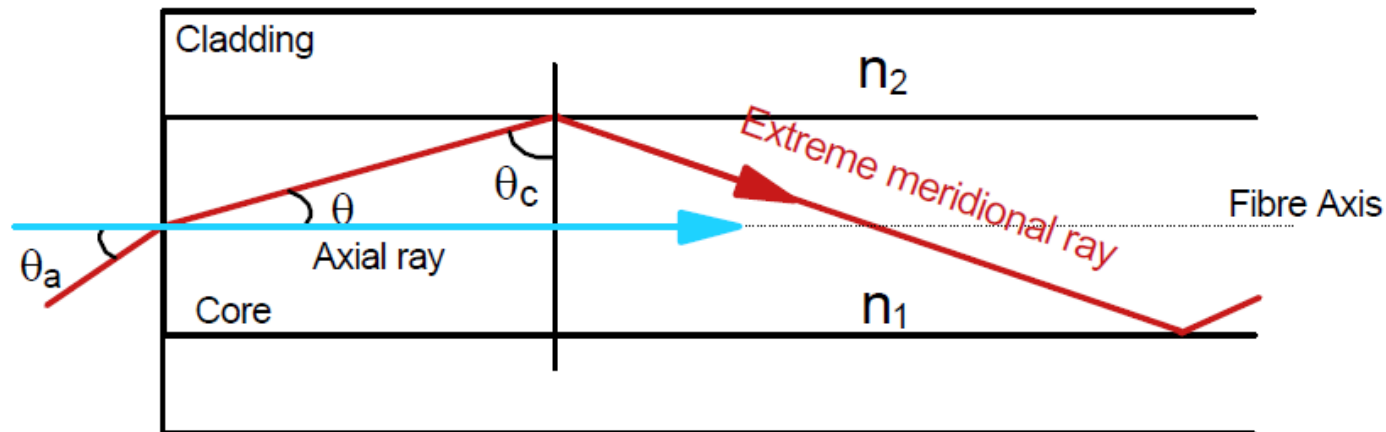
Dispersão Modal

- Na fibra multimodos os diferentes modos propagam-se em diferentes velocidades
- Dispersão modal é maior em fibras multimodos com índice em degrau
- Fibras monomodo não apresentam dispersão modal



Dispersão Modal na Fibra Índice Degrau

- Na fibra multimodos com índice em degrau um impulso é aplicado na entrada da fibra.
- A energia é igualmente distribuída entre dois modos diferentes. O primeiro segue um caminho axial e o outro segue um caminho no ângulo crítico de incidência.
- Determina-se o atraso de um modo em relação ao outro.



Dispersão Modal na Fibra Índice Degrau

Define-se como:

- L , o comprimento total usado na transmissão
- T_{MAX} , o tempo de propagação do modo em θ_c
- T_{MIN} , o tempo de propagação no modo axial
- δ_t , a diferença de tempo de propagação entre os modos

$$\delta t = T_{max} - T_{min}$$

Sabe-se que:

$$T_{min} = \frac{L}{(c/n_1)}$$

$$T_{max} = \frac{Ln_1}{c \cos \theta}$$

Usando a lei da refração de Snell-Descartes e trigonometria, temos:

$$\text{sen} \theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \cos \theta$$

Com isso,
$$T_{max} = \frac{Ln_1^2}{cn_2}$$

Dispersão Modal na Fibra Índice Degrau

Como: $\delta t = T_{\max} - T_{\min}$ Temos que: $\delta t = \frac{Ln_1^2}{cn_2} - \frac{Ln_1}{c}$

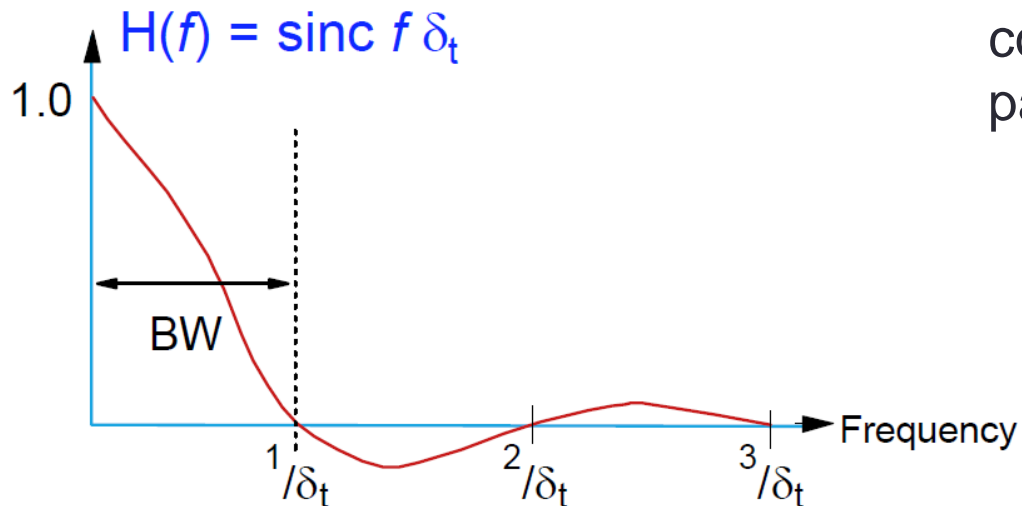
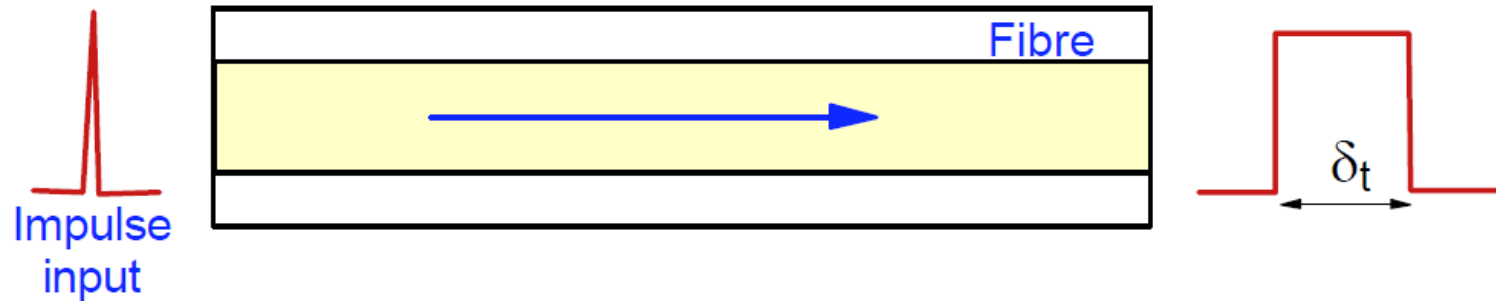
$$\delta t = \frac{Ln_1^2}{cn_2} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{Ln_1^2 \cdot \Delta}{cn_2}$$

$$\delta t = \frac{Ln_1}{c} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_2}$$

Para $\Delta \ll 1$: $\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_2} \rightarrow \delta t = \frac{Ln_1 \cdot \Delta}{c}$

Lembrando que: $\Delta = \frac{NA^2}{2n_1^2} \rightarrow \delta t = \frac{L(NA)^2}{2cn_1}$

Resposta Impulsiva da Fibra Índice Degrau



O 1º zero de $H(f)$ é definido como a Largura de Banda (BW) para o sistema. Com isso:

$$BW = \frac{2 c n_1}{L(NA)^2}$$

Como reduzir a Dispersão Modal?

- Dispersão Modal da Fibra Índice Gradual

$$\delta t_{GI} = \frac{L \Delta^2 n_1}{c.8}$$

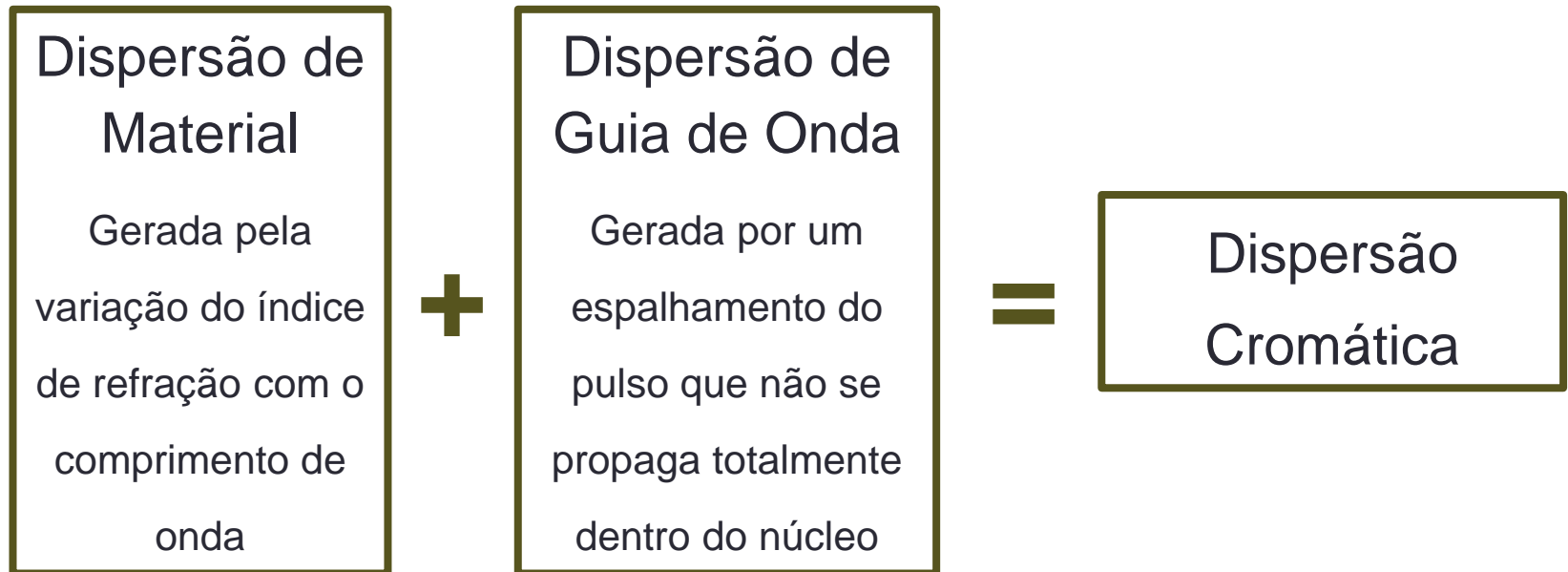
- Dispersão Modal da Fibra Índice Degrau

$$\delta t_{SI} = \frac{L \Delta n_1^2}{c n_2}$$

A dispersão da Fibra Índice Gradual é proporcional ao termo Δ^2 , o que causa uma dispersão muito menor em relação a Fibra Índice Degrau

Dispersão Cromática

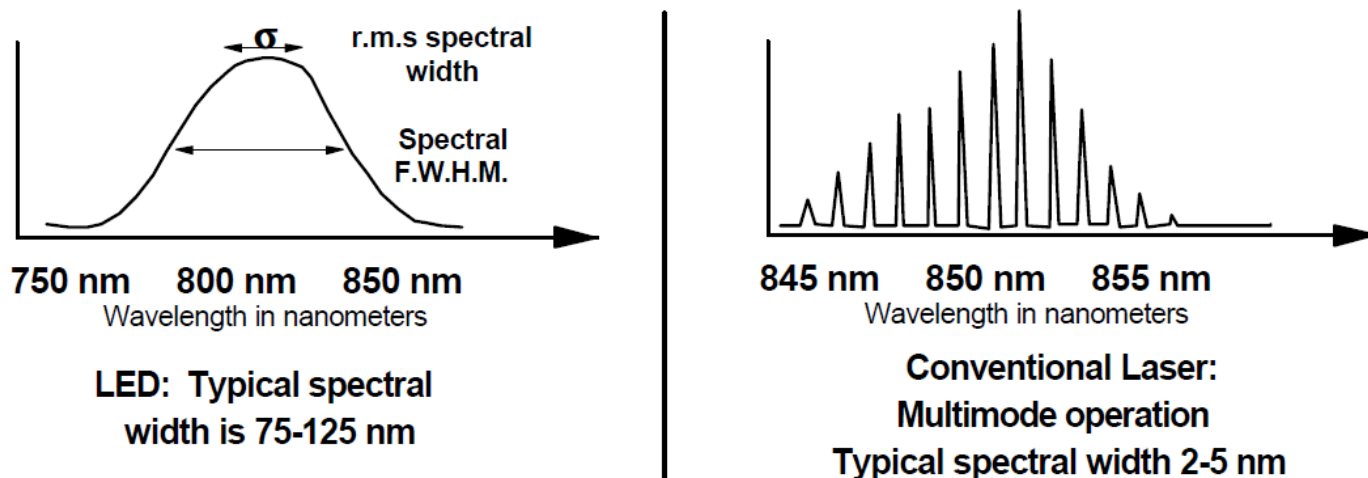
- A dispersão cromática é a soma de 2 formas de dispersão:



Dispersão de Material

- Também chamada de dispersão intramodal
- Resulta de diferentes velocidades de grupo de várias componentes espectrais que são aplicadas na fibra

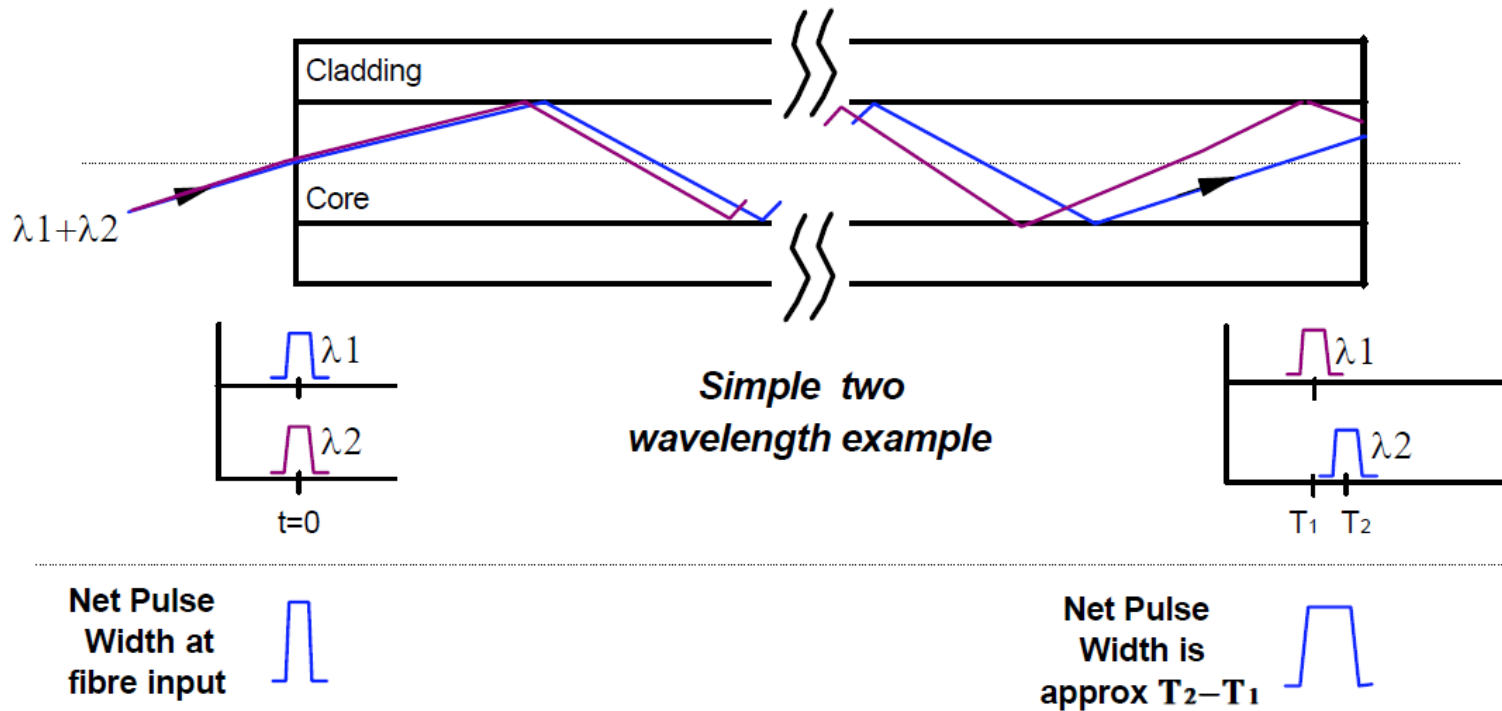
Fontes Ópticas tipicamente utilizadas



FWHM: Full Width at Half Maximum

Dispersão de Material

- Em uma fibra óptica a velocidade de propagação varia em função do comprimento de onda da luz.



Dispersão de Material

O espalhamento do pulso σ_{mat} é dado pela expressão:

$$\sigma_{\text{mat}} \approx \left| \frac{d\tau_{\text{mat}}}{d\lambda} \right| \sigma_{\lambda} = \frac{\sigma_{\lambda} L}{c} \left| \lambda \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \right| = \sigma_{\lambda} L | D_{\text{mat}}(\lambda) | \quad *$$

- $D_{\text{mat}}(\lambda)$ é o coeficiente de dispersão material, fornecidos pelos fabricantes de fibra e dados pela respectivas expressão:

$$D_{\text{mat}} = \frac{-\lambda}{c} \left[\frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \right] \quad \text{Unidade ps/(km.nm)}$$

- σ_{λ} é a largura espectral da fonte de luz
- L é o comprimento total da fibra

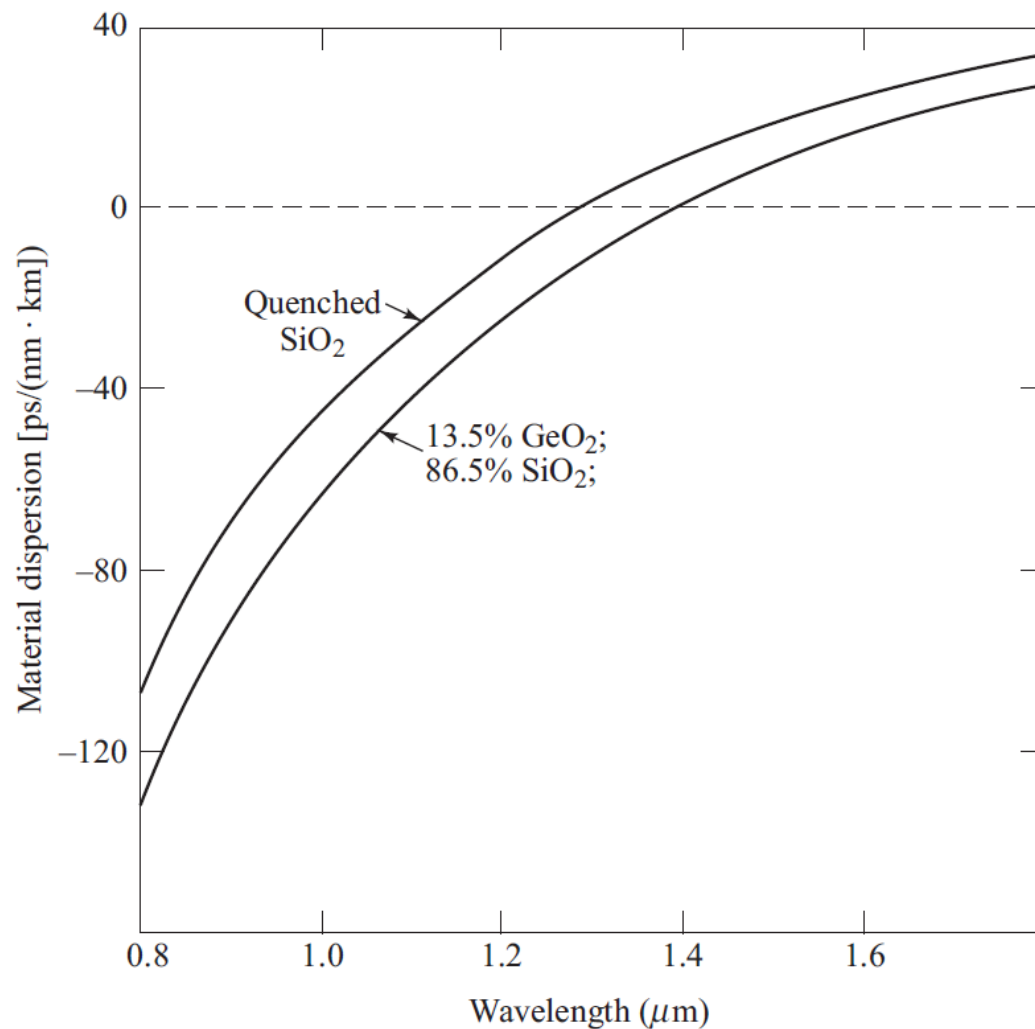
* A dedução da equação de σ_{mat} é apresentada no artigo:



D. Gloge, E.A.J. Marcatili, D. Marcuse, and S. D. Personick, "Dispersion properties of fibers," in *Optical Fiber Telecommunications*, S. E. Miller and A. G. Chynoweth, eds., Academic, New York, 1979.

Dispersão de Material

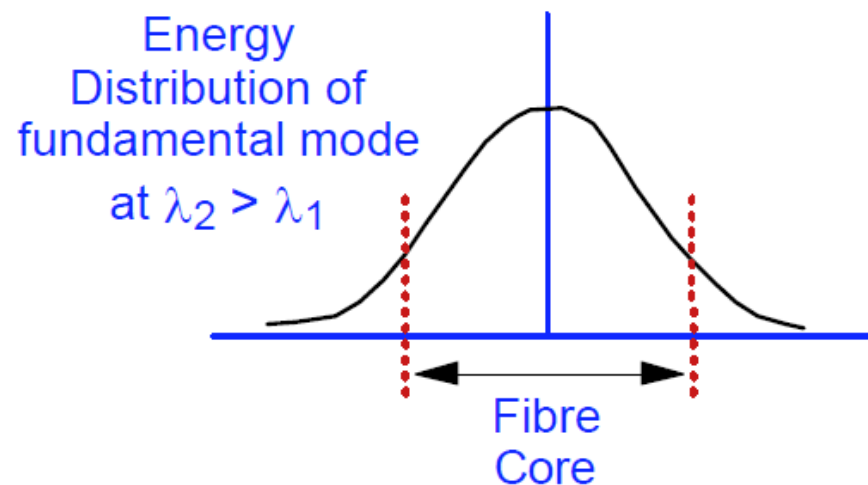
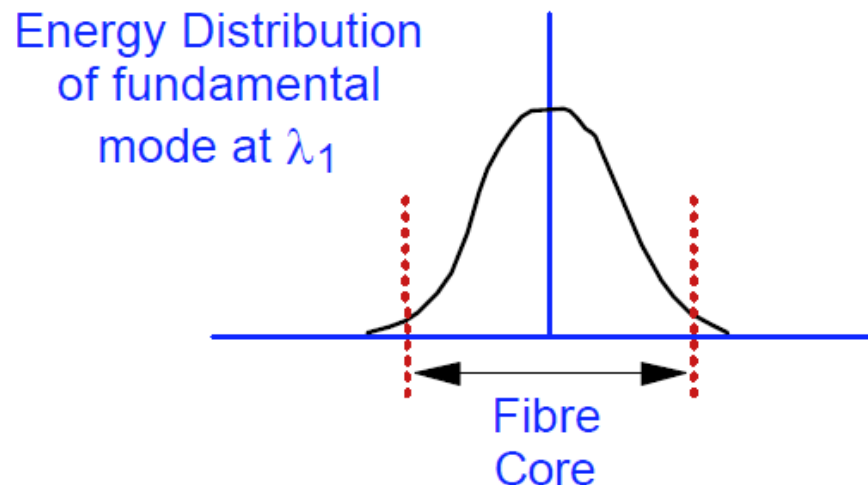
Gráfico da dispersão material em função do comprimento de onda para dois tipos de fibra



Há uma redução da dispersão material com uma nova composição na fabricação da fibra óptica

Dispersão de Guia de Onda

- Causado pela dependência da distribuição de energia do modo fundamental pelo comprimento de onda
- Em fibra multimodos é desprezível
- Com o aumento do comprimento de onda cresce a parcela de energia que se propaga na casca



Dispersão de Guia de Onda

O espalhamento do pulso σ_{wg} é dado pela expressão:

$$\sigma_{wg} \approx L | D_{wg}(\lambda) | \sigma_{\lambda}$$

*

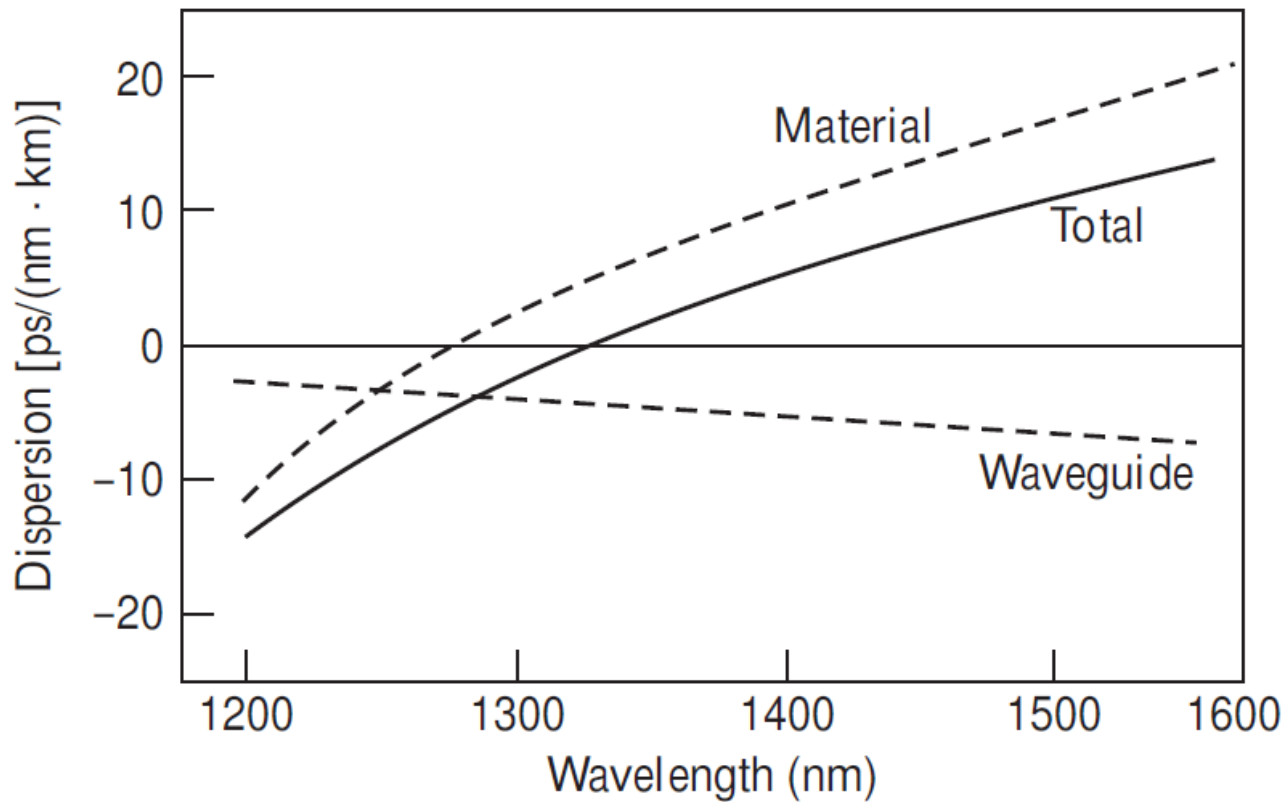
- $D_{wg}(\lambda)$ é o coeficiente de dispersão de guia de onda., fornecidos pelos fabricantes de fibra.
- σ_{λ} é a largura espectral da fonte de luz
- L é o comprimento total da fibra

* A dedução da equação de σ_{wg} é apresentada no artigo:

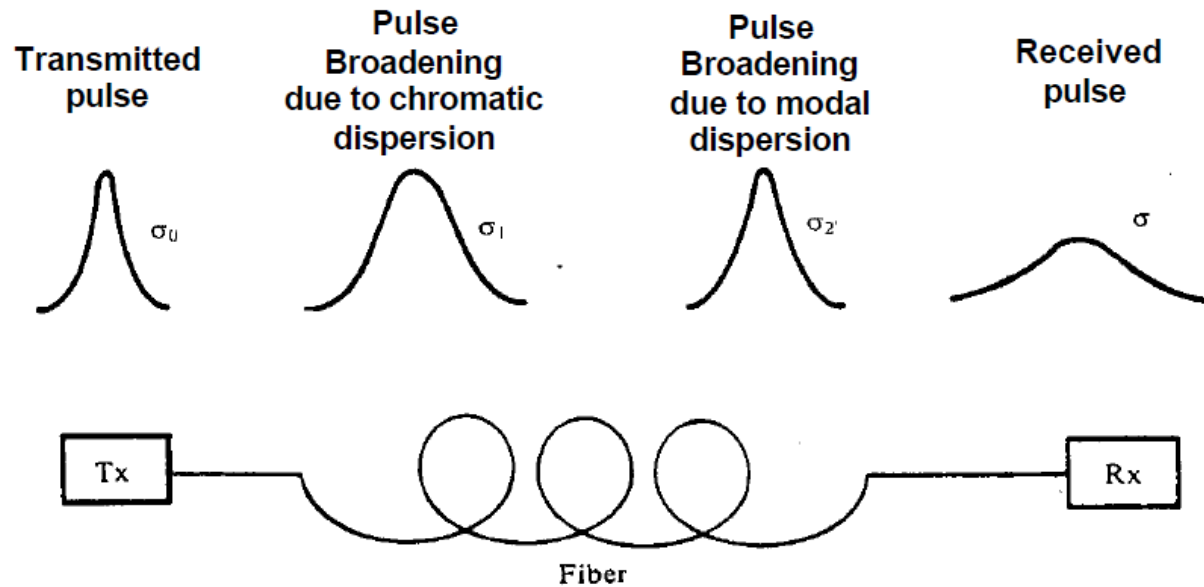


D. Gloge, “Weakly guiding fibers,” *Appl. Opt.*, vol. 10, pp. 2252–2258, Oct. 1971; “Dispersion in weakly guiding fibers,” *Appl. Opt.*, vol. 10, pp. 2442–2445, Nov. 1971.

Gráfico com as dispersões material e de guia de onda em função do comprimento de onda para uma fibra monomodo com núcleo de sílica.



Dispersão Total



Received pulse width

$$\sigma = (\sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$$

Assumes uncorrelated dispersion mechanisms and gaussian pulse shapes

FIBRAS ÓPTICAS

Perfis de dopagem do core

Multimodos



Multimode step index



Multimode graded index

Monomodo



Conventional singlemode fibre
(so called matched cladding)



Depressed cladding singlemode fibre
(less susceptible to bend loss)

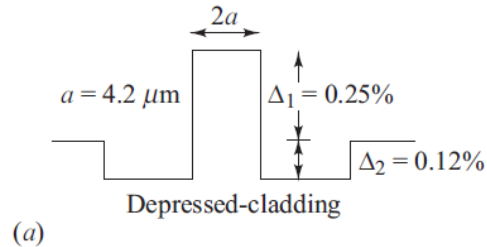
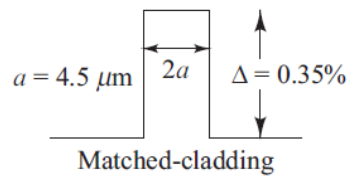


Triangular profile singlemode fibre
(used in dispersion shifted fibre)

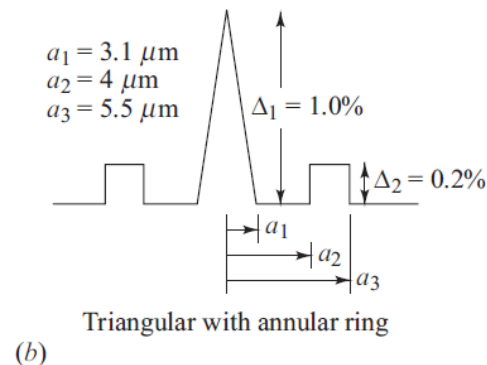
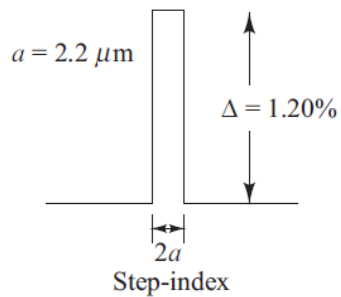


Up-and-down profile singlemode fibre
(used in dispersion flattened fibre)
also called multicladding fibre

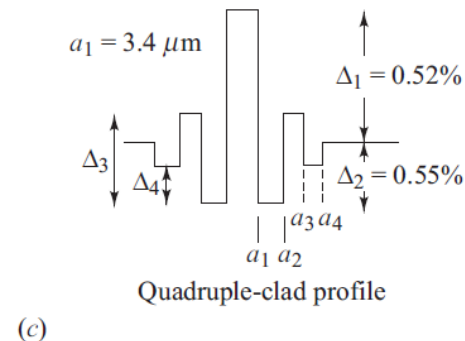
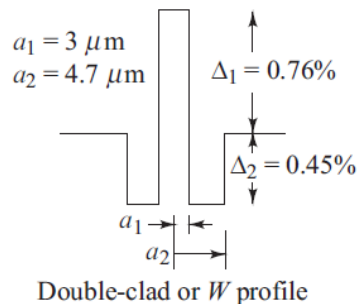
Perfis de Índice de Refração – Fibras Monomodo



➔ Otimizado para 1300 nm



➔ Dispersão Deslocada

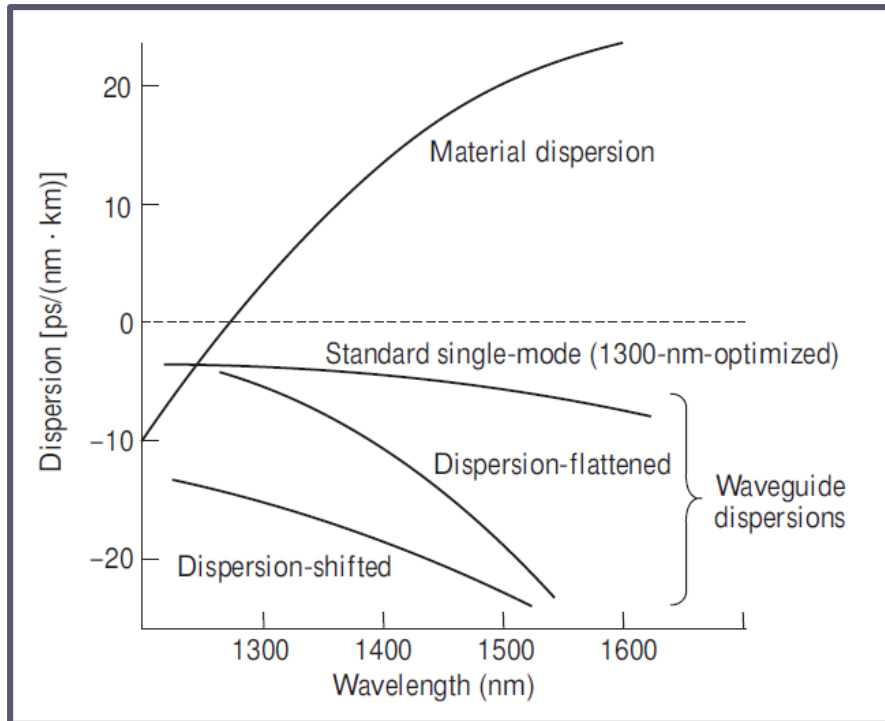


➔ Dispersão Plana

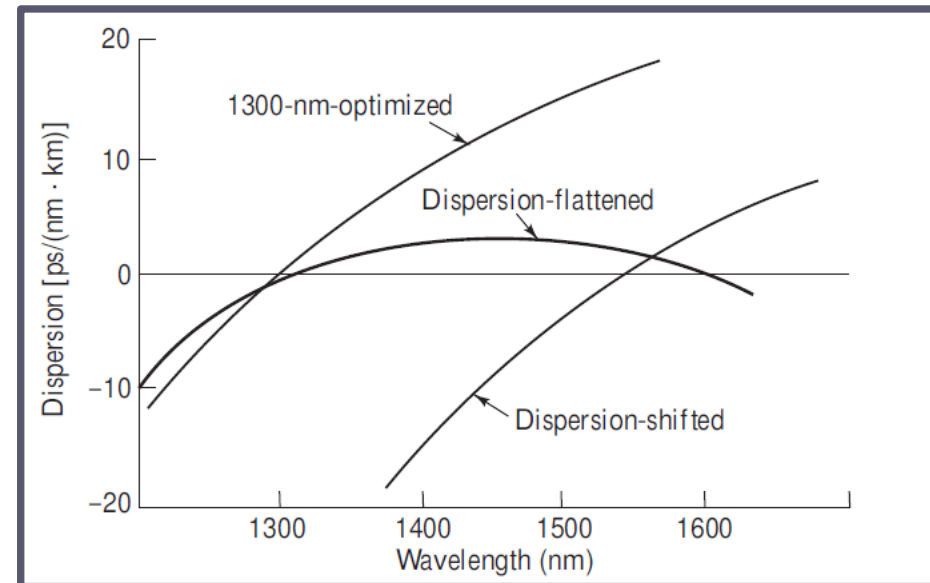
Perfis Normais

Perfis Otimizados

Resposta dos diferentes perfis de Índice de Refração em Fibras Monomodo

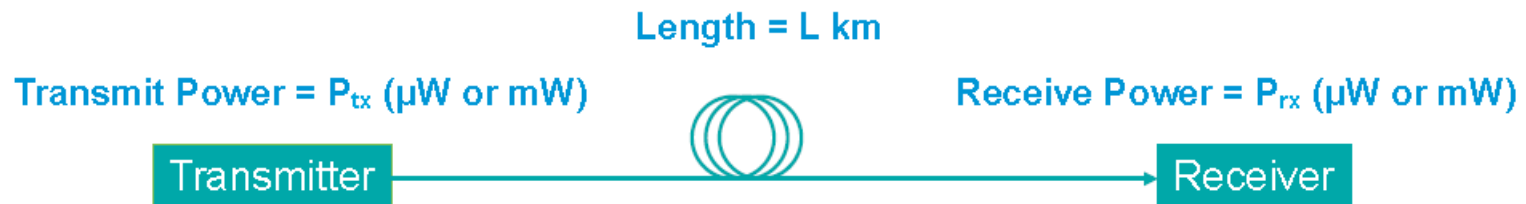


Perfis Normais



Perfis Otimizados

Atenuação em Fibra Óptica



A atenuação na fibra é expressa em dB/km calculado por:

$$A = (10 \cdot \log_{10}(P_{tx}/P_{rx}))/L$$

Exemplo:

Uma fibra de comprimento de 10 km tem $P_{in} = 10\mu W$ e $P_{out} = 6\mu W$

Este valor expresso em dB é:

Perda na fibra em 10 km $\rightarrow 10 \log (10/6) = 2.2\text{dB}$

Expressa em dB/km = 0.22 dB/km

Tipos de Atenuação em Fibra Óptica

- **Perda por Absorção**

Causadas por propriedades da própria fibra ou por impurezas na fibra, como água e metais.

- **Perdas por espalhamento**

Mecanismos de perda intrínsecos causados pela interação de fótons com a sílica que compõe a fibra

- **Perdas por curvatura**

Perdas induzidas por um “stress” físico na fibra.

- **Perdas em junções (conectores e emendas por fusão)**

Perda por Absorção no Material

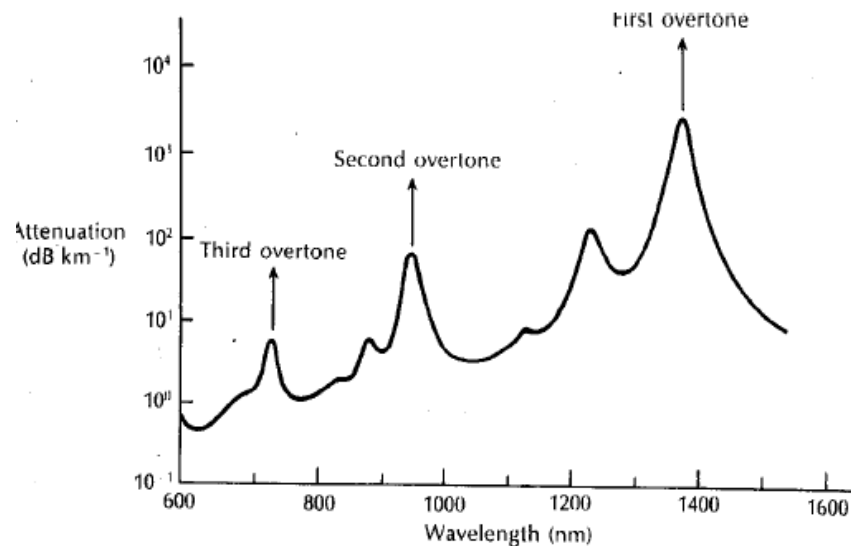
- Causada por absorção de fótons dentro da fibra
- A potência óptica é convertida em dissipação de calor
- Existem dois tipos de absorção:

Absorção Intrínseca: causadas pela interação da luz (ultravioleta e infravermelho) com as moléculas da sílica.

Absorção Extrínseca: causada por impurezas na sílica, por exemplo a contaminação por íons OH, também conhecidos como hidroxilas.

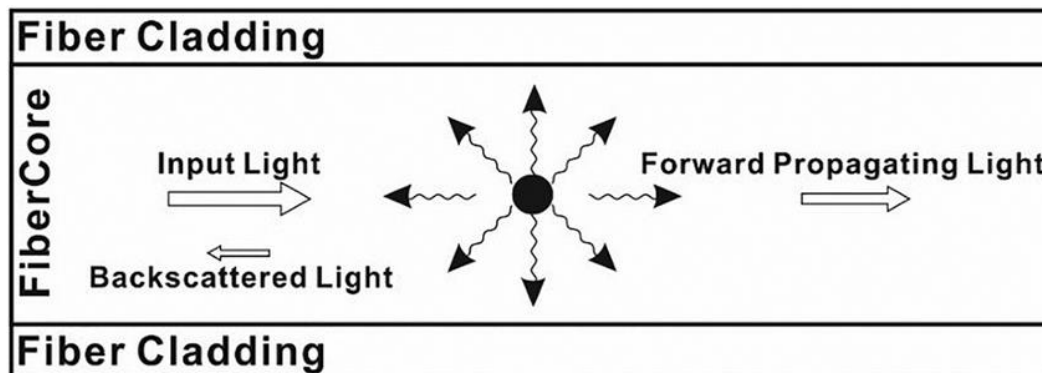
Absorção Extrínseca (Íons OH)

- Causada por água dissolvida na sílica
- Estas impurezas causam picos de atenuação em 720 nm, 950 nm e 1380 nm.
- Geralmente, uma parte por milhão (1 ppm) de impureza causa 1 dB/km de atenuação em 950 nm.



Perda por Espalhamento

- Espalhamento é um processo pelo qual um sinal óptico incide em imperfeições da fibra gerando reflexões para diversas direções.
- O espalhamento causa atenuação, uma vez que a luz deixa de se propagar adequadamente.
- Normalmente, o sinal óptico vaza pela casca.



Perda por Espalhamento

- Existem dois tipos básicos de espalhamento:
 - Espalhamento linear:** Espalhamentos de Rayleigh e Mie.
 - Espalhamento Não-linear:** Raman e Brillouin Estimulados.
- Espalhamento Rayleigh é um mecanismo de perda dominante em fibras de vidro de baixas perdas, particularmente na janela entre 800 nm e 1700 nm.

Perda por 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.

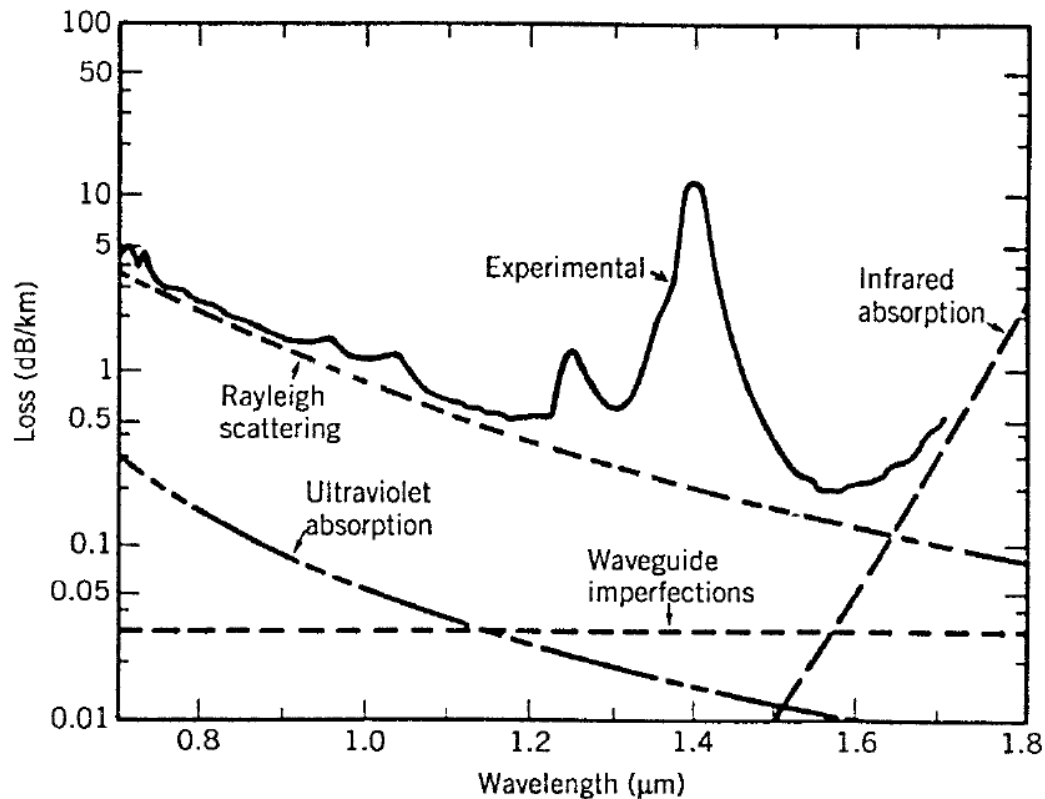
- **Espalhamento Raman e Brillouin Estimulados:**

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

Curso do Prof. Zucchi

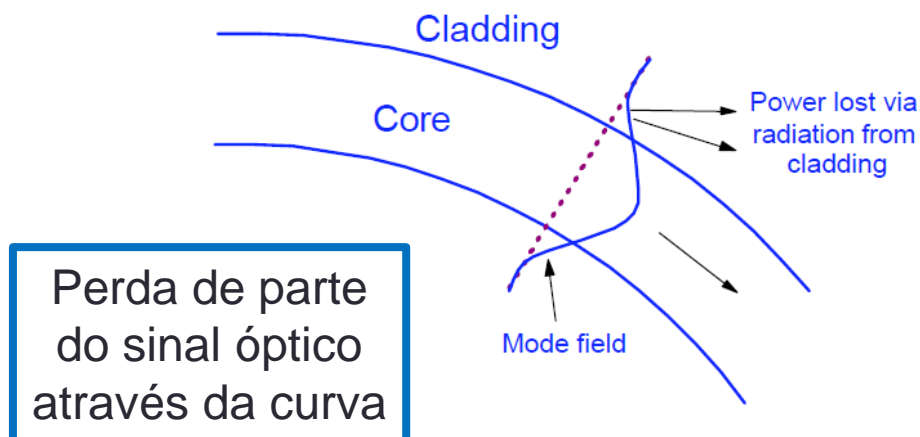
Atenuação total em uma fibra

O gráfico abaixo mostra o espectro de alguns mecanismos de perda de uma fibra monomodo



Atenuação em curvatura

- 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.



Curso do Prof. Zucchi

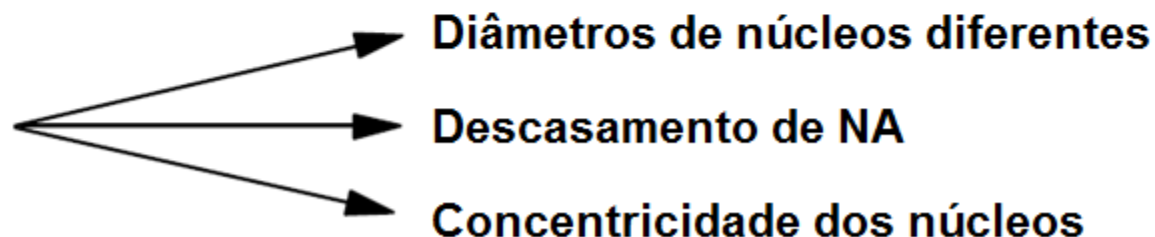
Atenuação em Junções

1. Perda de Fresnel

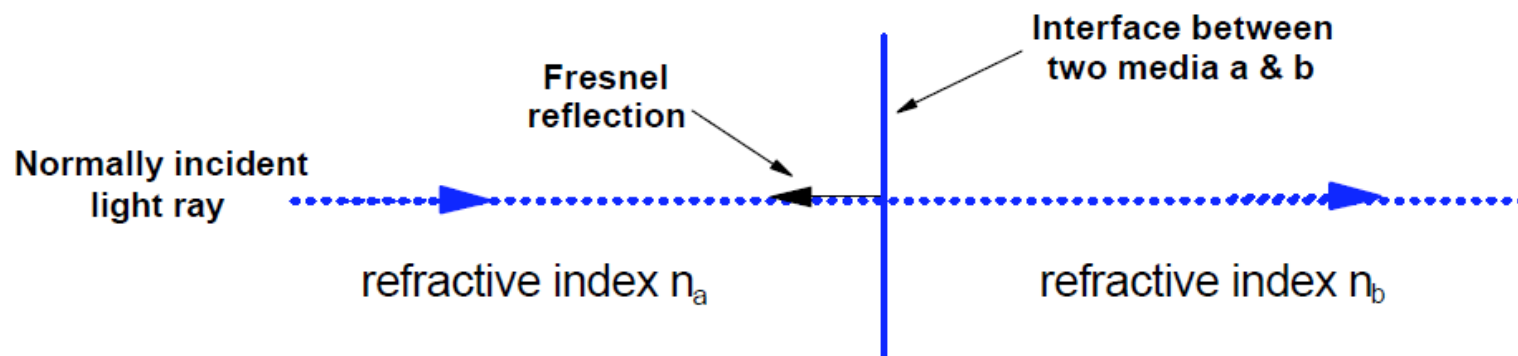
2. Desalinhamento entre núcleos



3. Descasamento entre parâmetros



Perda de Fresnel na Interface das fibras



Fraction of light reflected at the interface

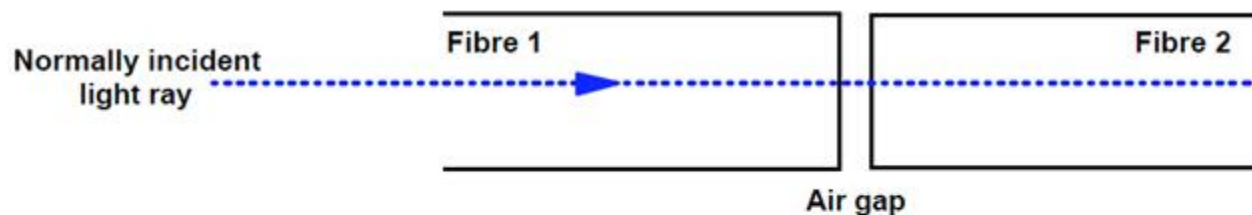
$$r = \frac{(n_a - n_b)^2}{(n_a + n_b)^2}$$

Fresnel loss in dB at the interface =

$$-10 \log_{10} \left[1 - r \right] = -10 \log_{10} \left[1 - \frac{(n_a - n_b)^2}{(n_a + n_b)^2} \right]$$

Perda de Fresnel na Interface das fibras

- A perda ou reflexão de Fresnel normalmente ocorre nas junções com espaçamentos de ar
- Para junções entre fibras a atenuação ocorre duas vezes (por isso temos a multiplicação por 20 na fórmula em dB).



n_1 core refractive index n_0 refractive index of air

$$\text{Total Fresnel loss in dB} = -20 \log_{10} \left[1 - \frac{(n_1 - n_0)^2}{(n_1 + n_0)^2} \right]$$

Perdas por separação entre as fibras

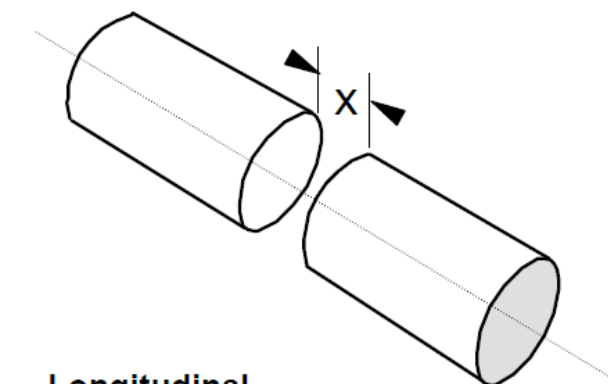
Ocorre por dois mecanismos:

- Perda de Fresnel
- Espalhamento do feixe de luz a partir do núcleo da fibra

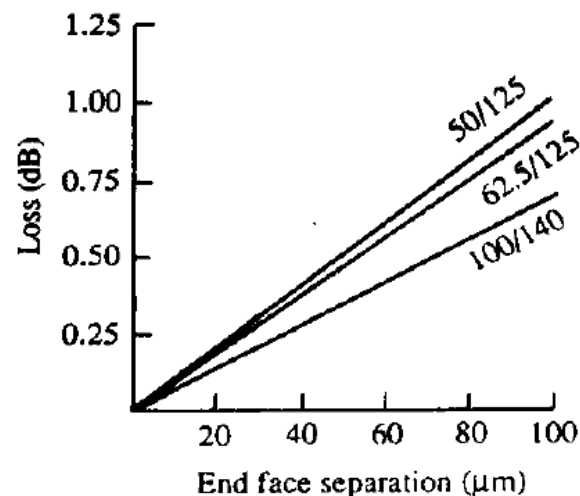
$$\text{Total Fresnel loss} = -20 \log_{10} \left[1 - \frac{(n_1 - n_0)^2}{(n_1 + n_0)^2} \right]$$

$$\text{Beam spreading loss} = -10 \log_{10} \left[1 - \frac{x \cdot (NA)^2}{2 \cdot d \cdot n_0} \right]$$

Onde: d é o diâmetro do núcleo da fibra
 n_0 é o índice de refração do ar



Longitudinal
misalignment or
End separation

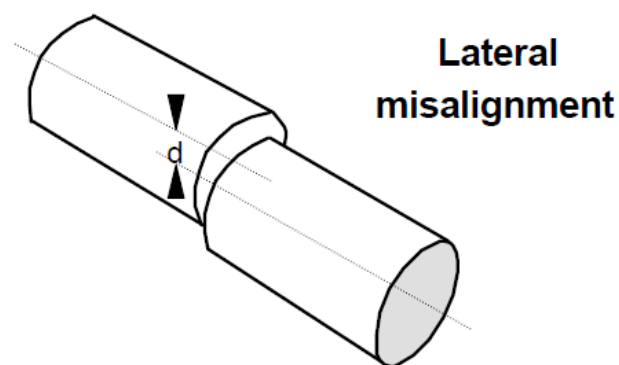
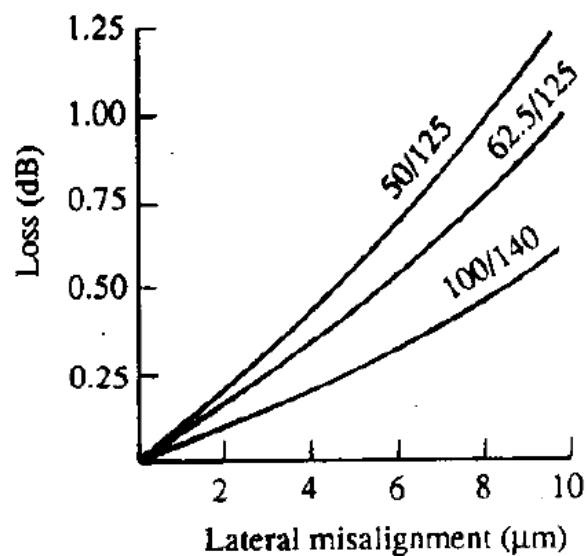


Perdas por desalinhamento lateral

A atenuação por desalinhamento lateral é dada pela equação:

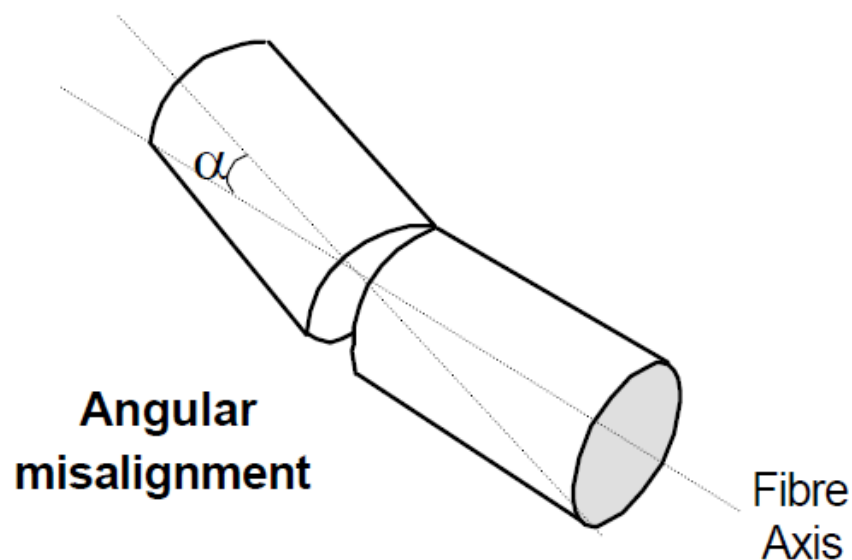
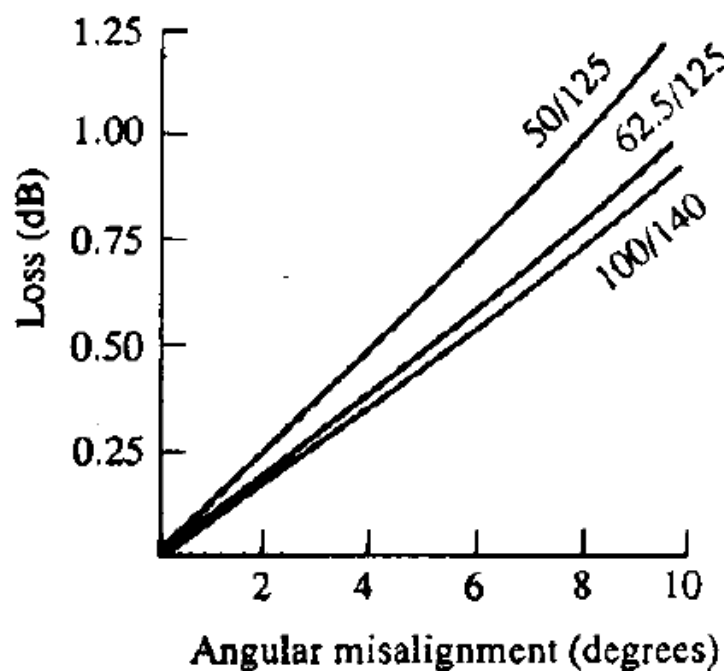
$$\text{Attenuation in dB} = -10 \cdot \log \left[1 - \left(\frac{2d}{\pi a} \right)^2 \right]$$

Onde “a” é o raio do núcleo da fibra óptica



Most problematic form of loss

Perdas por desalinhamento angular



Insertion loss in dB =

$$- 10 \log [1 - (n_0 \cdot \alpha) / (180 \cdot NA)]$$

Onde o ângulo “ α ” é dado em graus

Perdas por diferença entre parâmetros

- Mesmo quando a junção é perfeita, descasamento entre qualquer parâmetro pode causar perdas
- Algumas destas diferenças são chamadas de diferenças paramétricas

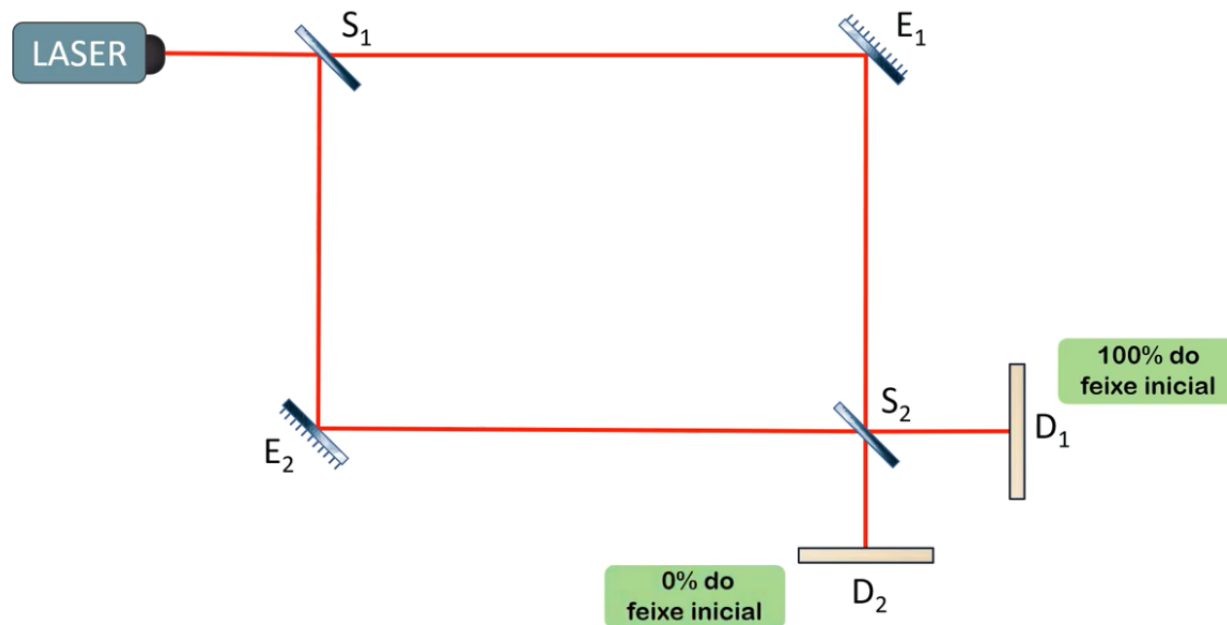
	Cause	Calculation
Diâmetro dos núcleos	If the exit fibre core is smaller any mismatch will cause loss	attenuation in dB = $-20 \log [d2 / d1]$, where d1 is source fibre diameter and d2 is exit fibre diameter. $d2 < d1$
Abertura Numérica	If the exit fibre has a lower NA then loss will occur	attenuation in dB = $-20 \log [NA2 / NA1]$, NA1 is the NA of source fibre and NA2 is the NA of the exit fibre and $NA2 < NA1$.
Concentricidade dos núcleos	Core is not centred within the cladding	Complex equation. A core concentricity of 2 microns for a 50 micron core fibre produces an attenuation of 0.47 dB

Anexo 1

Interferômetro de Mach-Zehnder

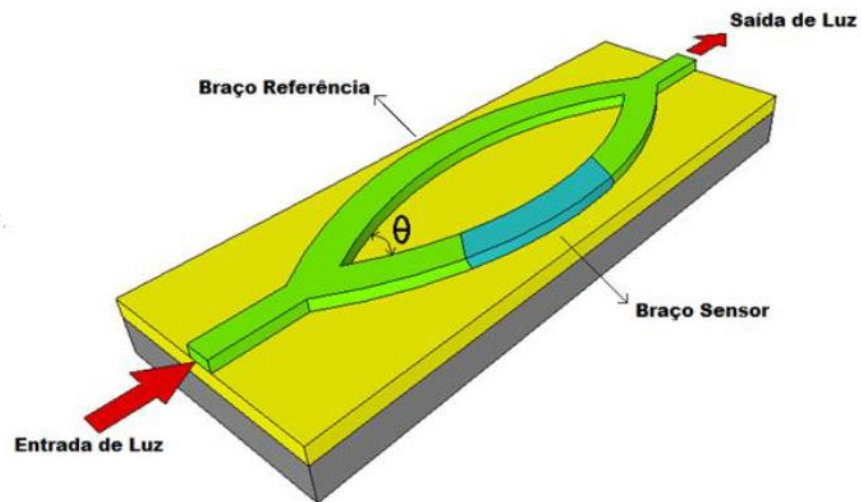
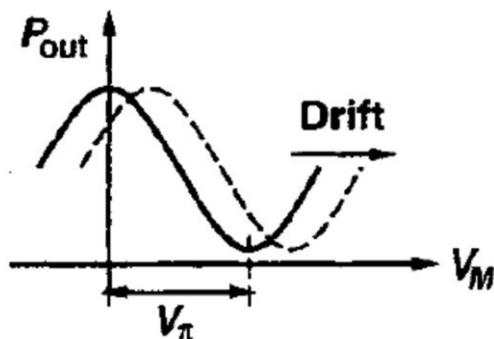
O interferômetro de Mach-Zehnder é um arranjo de espelhos e semi-espelhos que demonstra o fenômeno da interferência da luz pela divisão de um feixe luminoso

Dispositivo Clássico



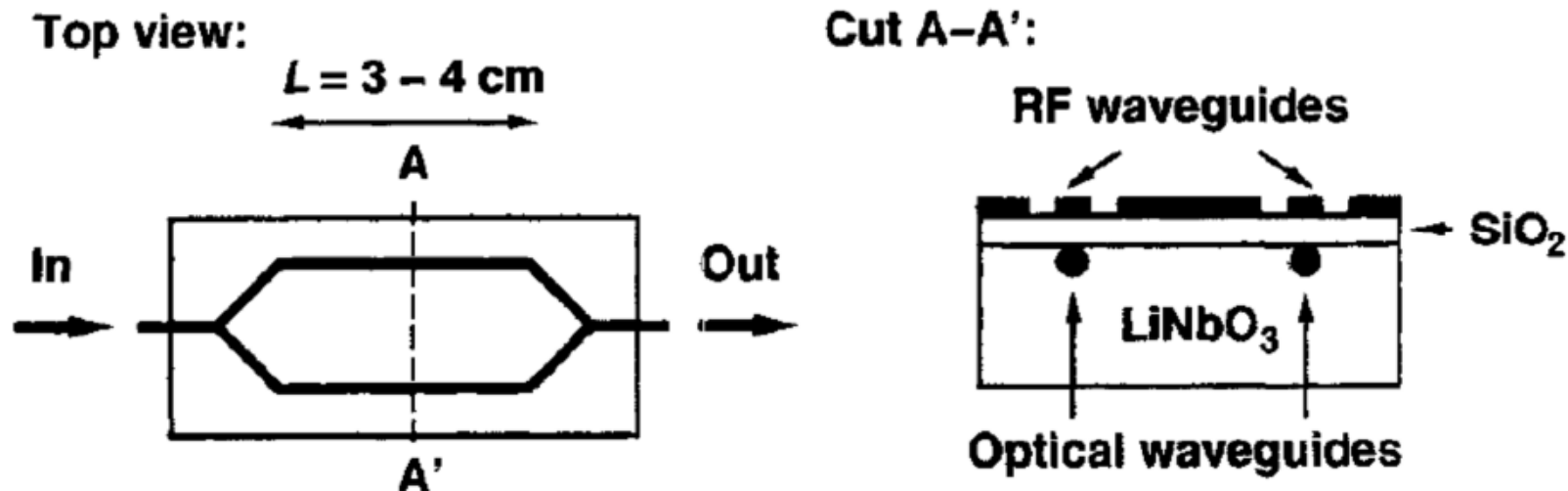
Interferômetro de Mach-Zehnder Planar

O interferômetro de Mach-Zehnder pode ser construído com um arranjo de espelhos, com a junção de fibras ópticas ou com tecnologia de planar usando microeletrônica, como mostram as figuras abaixo.



Aplicações do Interferômetro de Mach-Zehnder

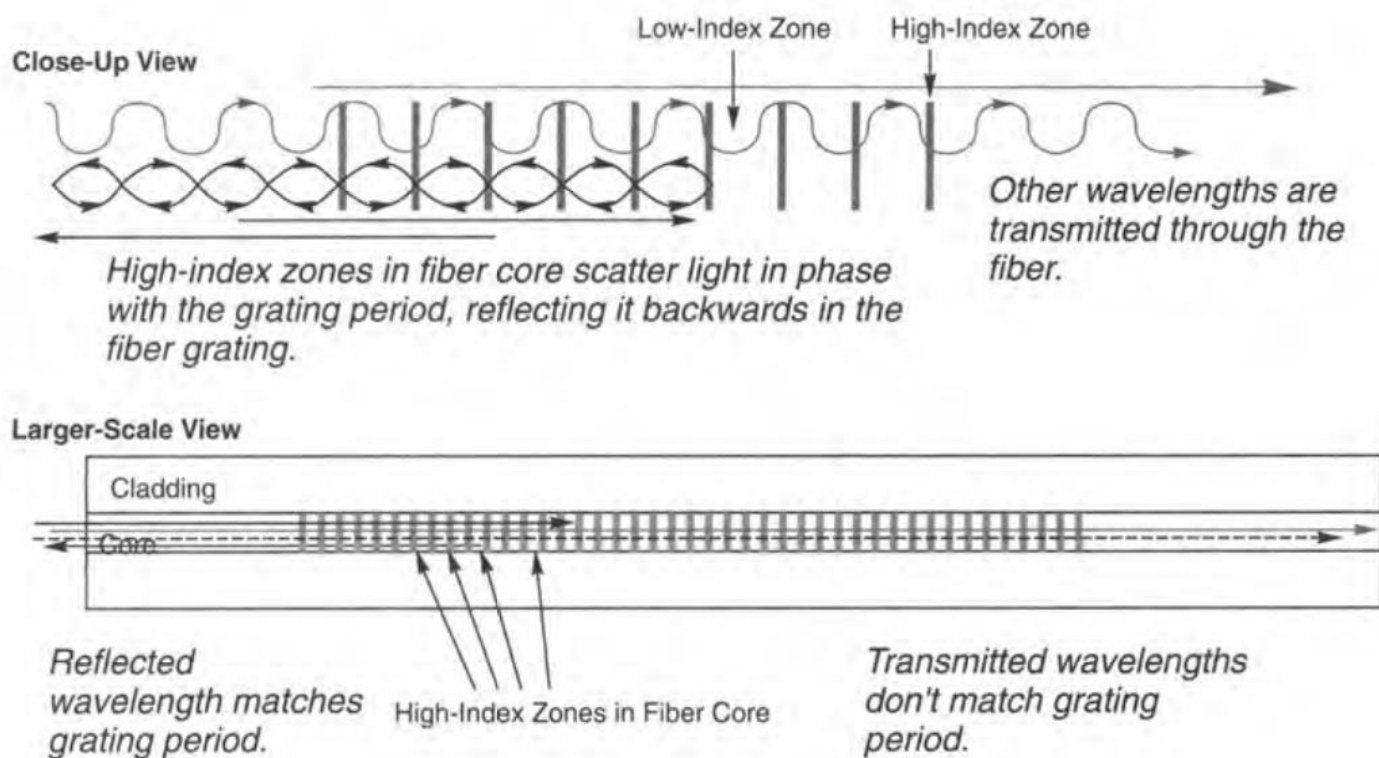
- Visualização de fluxo em geral, nas áreas de aerodinâmica, física de plasma e transferência de calor.
- Demultiplexadores de canais ópticos.
- Moduladores Eletro-ópticos (mostrado na figura abaixo)



Anexo 2

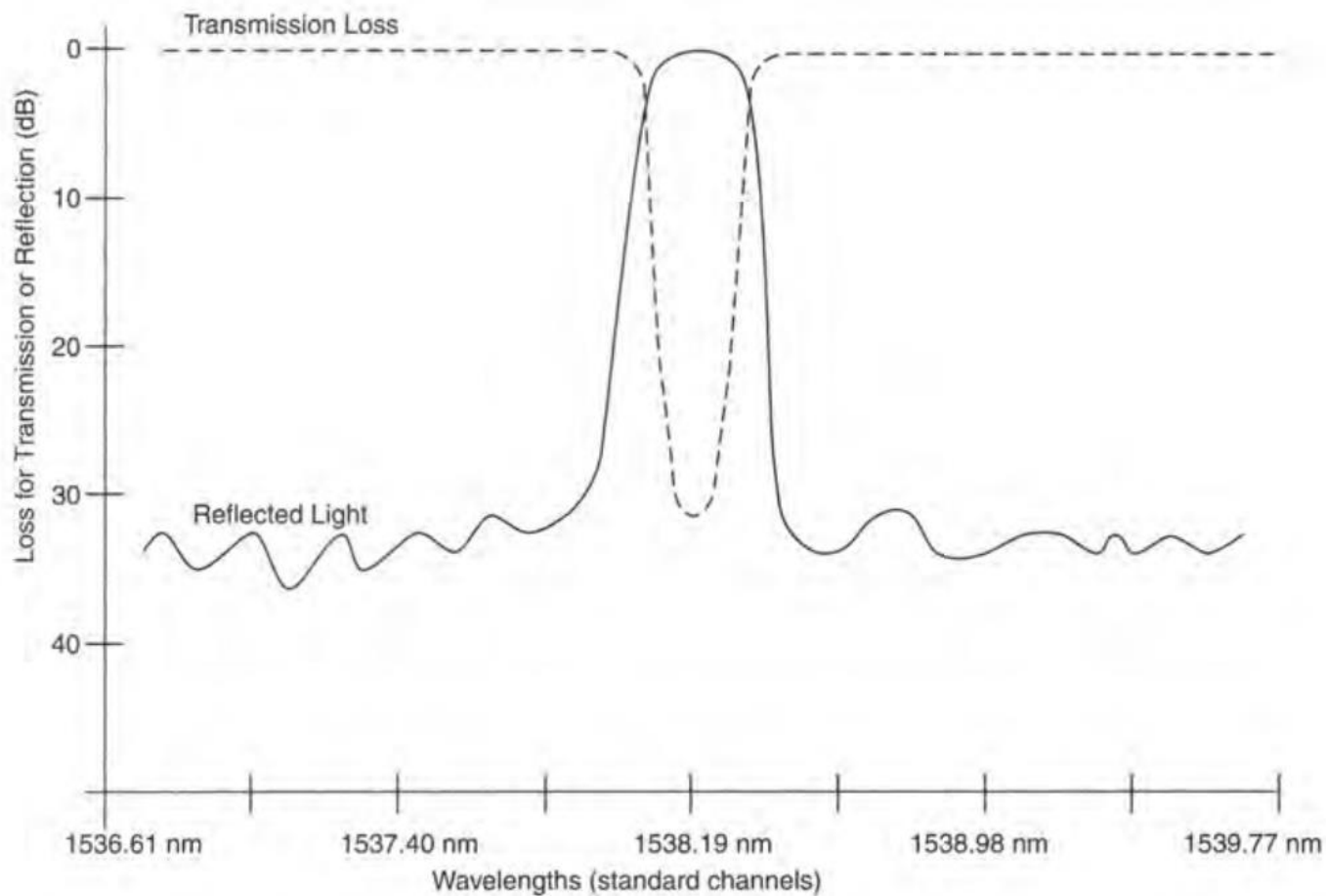
Grades de Bragg em Fibras Ópticas

- As grades de Bragg em fibras ópticas são usadas para separar comprimentos de ondas de um sistema DWDM.



Grades de Bragg em Fibras Ópticas

- Trata-se de um filtro de reflexão de banda estreita



Aplicação das Grades de Bragg em Fibras Ópticas

- Sistemas de multiplexação e demultiplexação WDM

