

# PROPAGAÇÃO E RADIAÇÃO DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS (PROE)

## PROPAGAÇÃO GUIADA – FIBRAS ÓTICAS

Custódio Peixeiro

Janeiro 2022

Este documento foi concebido para servir de guia nas aulas e apenas como tal deverá ser utilizado no estudo da matéria.

- Motivação (3)
- Perspectiva Histórica do Desenvolvimento (3)
- Introdução (8)
- Parâmetros Fundamentais (8)
- Aproximação da Ótica Geométrica (1)
- Análise Modal (26)
- Dispersão (11)
- Atenuação (5)
- Fontes, Detetores e Outros Componentes (3)
- Aplicações (3)

# Motivação (1)

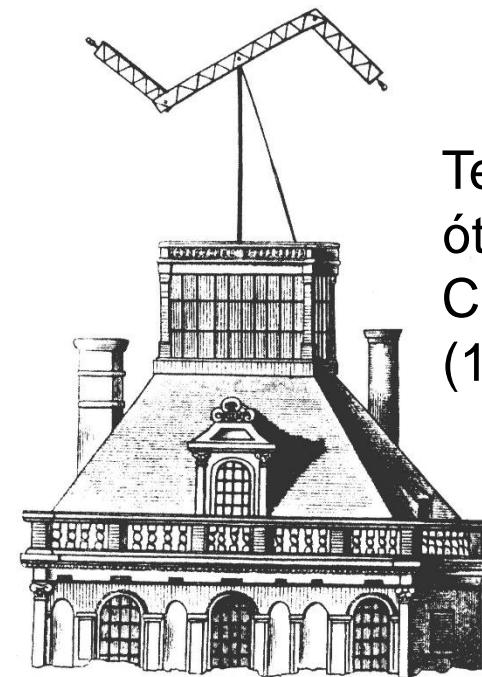
3/76

As comunicações óticas (visuais) existem há milhares de anos



Farol de Alexandria  
(ca 250 AC)

Fotofone  
Bell  
(1880)

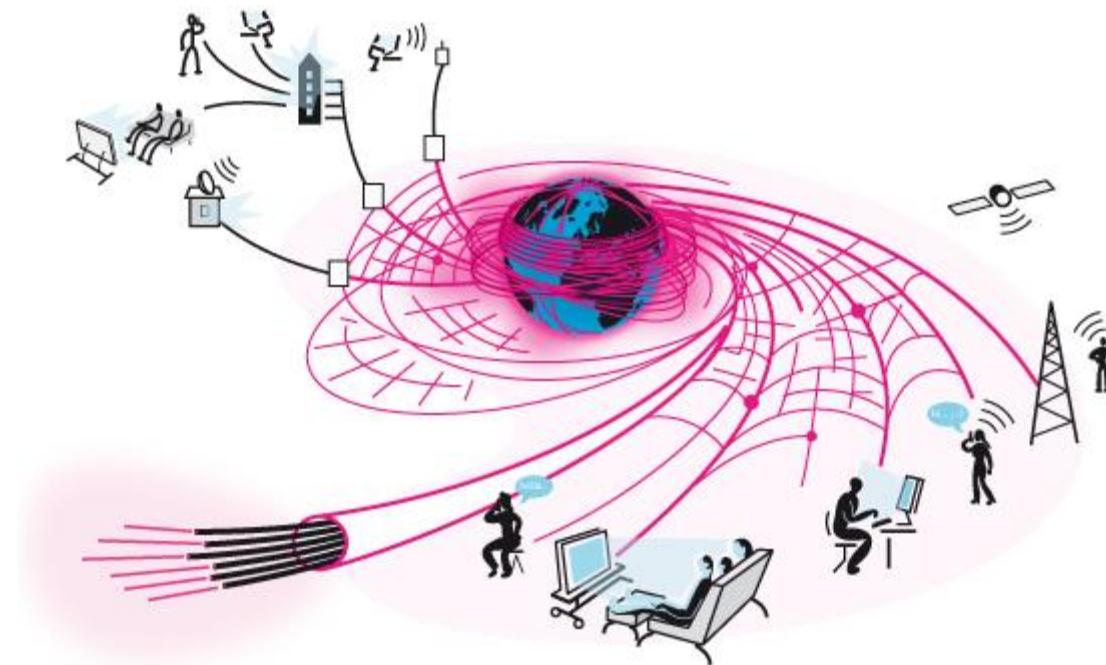


Telégrafo óptico  
Chappe  
(1790)

## Motivação (2)

4/76

(Metade do) Prémio Nobel da Física de 2009 foi atribuído a C. K. Kao “*for groundbreaking achievements concerning the transmission of light in fibers for optical communication*”

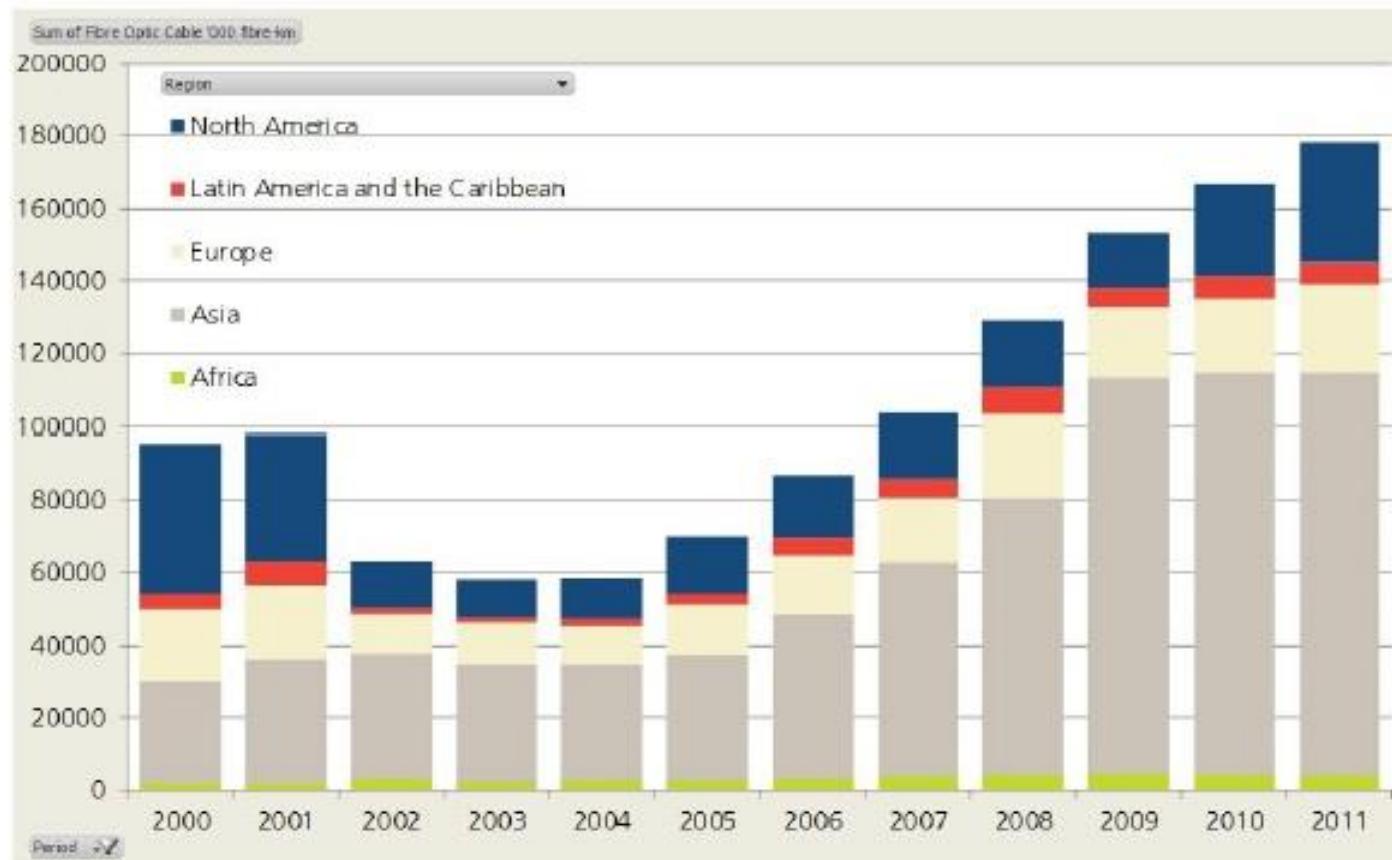


Se ligássemos todas as fibras ópticas (em 2009) poderíamos dar 25000 voltas à Terra (cerca de 1000 milhões de km). Tem-se verificado desde então um crescimento de vários milhares de km por hora.

## Motivação (3)

5/76

Em 2011 a rede mundial de fibra ótica cresceu quase 200 milhões de km (em média cerca de 6 km por segundo). O maior crescimento (cerca de 64%) deu-se na Ásia.



Source: Integer

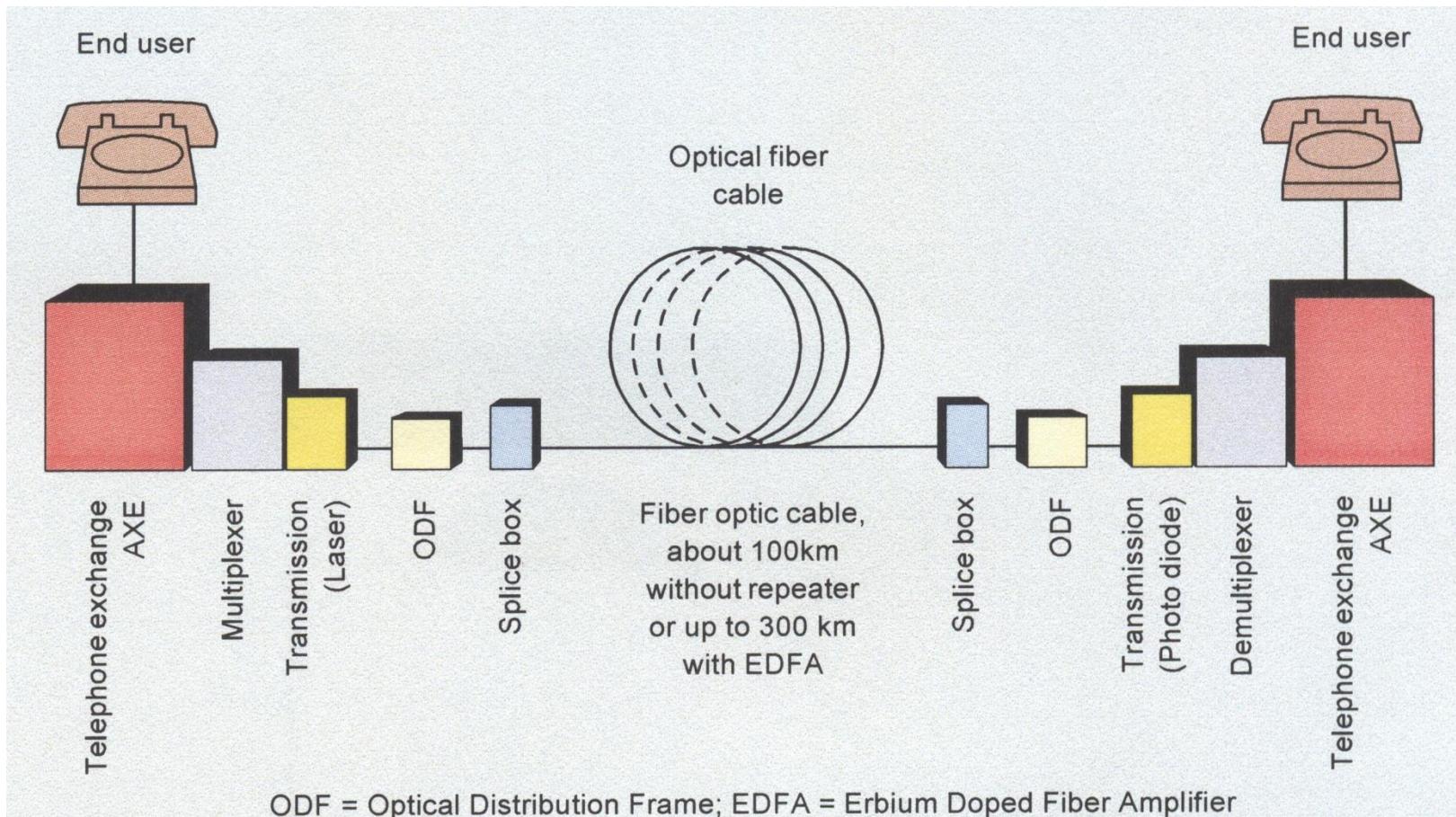
- O desenvolvimento da tecnologia da fibra ótica está intimamente ligado à tecnologia de fabrico do vidro
  - Os Egípcios já fabricavam vidro 3000 AC (atenuação  $10^7$  dB.km $^{-1}$ )
  - No final do século XIII dá-se a invenção do cristal em Veneza (atenuação  $10^5$  dB.km $^{-1}$ )
  - No século XIV começou a produção de óculos
  - No início do século XVII dá-se a invenção do telescópio
  - As primeiras fibras óticas (1920) tinham uma atenuação de cerca de  $10^3$  dB.km $^{-1}$
  - Não houve grande evolução até meados do século XX
  - Em 1970 a empresa Corning Glass (EUA) desenvolve um processo de fabrico de fibras óticas que permitiu obter uma atenuação de cerca de 17 dB.km $^{-1}$
  - Ainda na década de 70 a atenuação chegou aos 0,2 dB.km $^{-1}$

- Em 1958 o laser foi inventado por C. H. Townes (MIT, EUA) (prémio Nobel da Física em 1964)
- Em 1966 C. K. Kao (prémio Nobel de Física em 2009) e G. Hockham mostraram que a eliminação das impurezas da sílica poderia proporcionar níveis de atenuação compatíveis com a utilização das fibras óticas monomodo em telecomunicações a grandes distâncias (atenuação  $20 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ )
- 1975 – primeira rede local (não experimental) de fibra ótica (Dorset, GB)
- 1980 – primeira rede nacional de fibra ótica (entre Washington, DC e Cambridge, Massachusetts, EUA)
- 1983 – introdução da fibra ótica na rede de telecomunicações em Portugal
- 1987-1989 – aparecimento dos amplificadores óticos

- 1988 – primeiro cabo submarino em fibra ótica (TAT-8 entre New Jersey, EUA e Inglaterra/França, com 40000 canais telefónicos,  $280 \text{ Mbit.s}^{-1}$ , 10 vezes a capacidade do cabo coaxial que substituiu)
- 1991 – uso de solitões em comunicações por fibra ótica (Bell Labs) a grandes distâncias ( $2,5 \text{ Gbit.s}^{-1}$  em 14000 km)
- 1996 – introdução das técnicas de multiplexagem por divisão no comprimento de onda (WDM)
- Desde 1980 a capacidade aumenta (em média) 100 vezes em cada 10 anos

# Introdução (1)

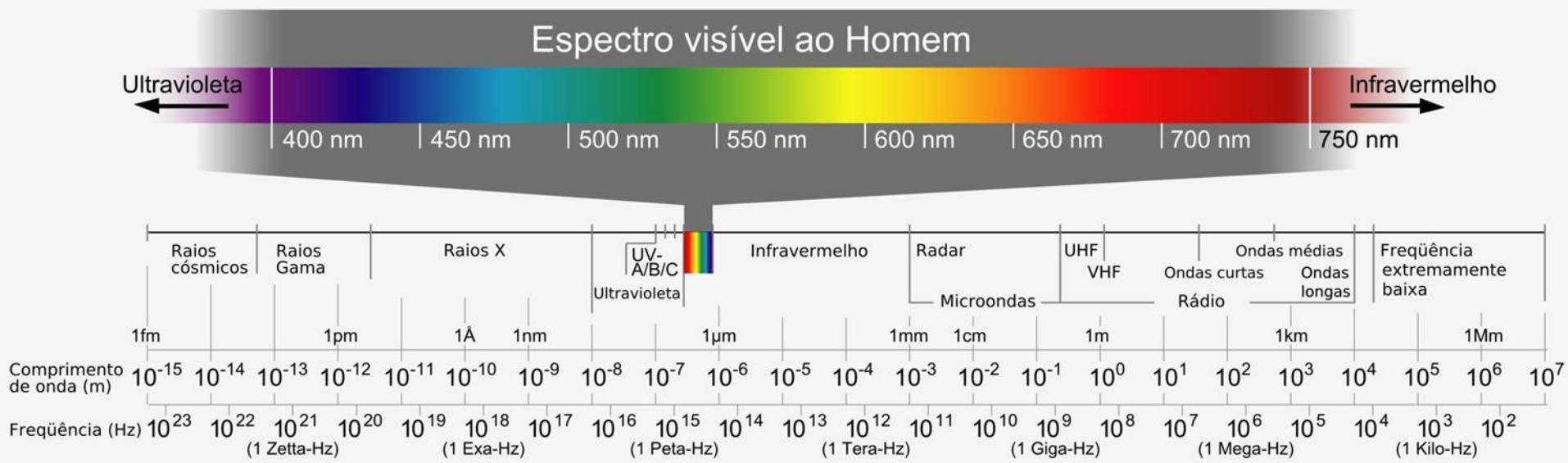
9/76



Vamos focar a nossa análise nas propriedades do guia de ondas (dielétrico) fibra ótica na perspectiva da sua utilização (sobretudo) em sistemas de telecomunicações.

# Introdução (2)

10/76



Microondas

$\lambda$ : 30 cm – 3 mm      f: 1 GHz – 100 GHz

Ondas Milimétricas (EHF)     $\lambda$ : 10 mm – 1 mm      f: 30 GHz – 300 GHz

Infravermelho

$\lambda$ : 1 mm – 750 nm      f: 300 GHz – 400 THz

Visível

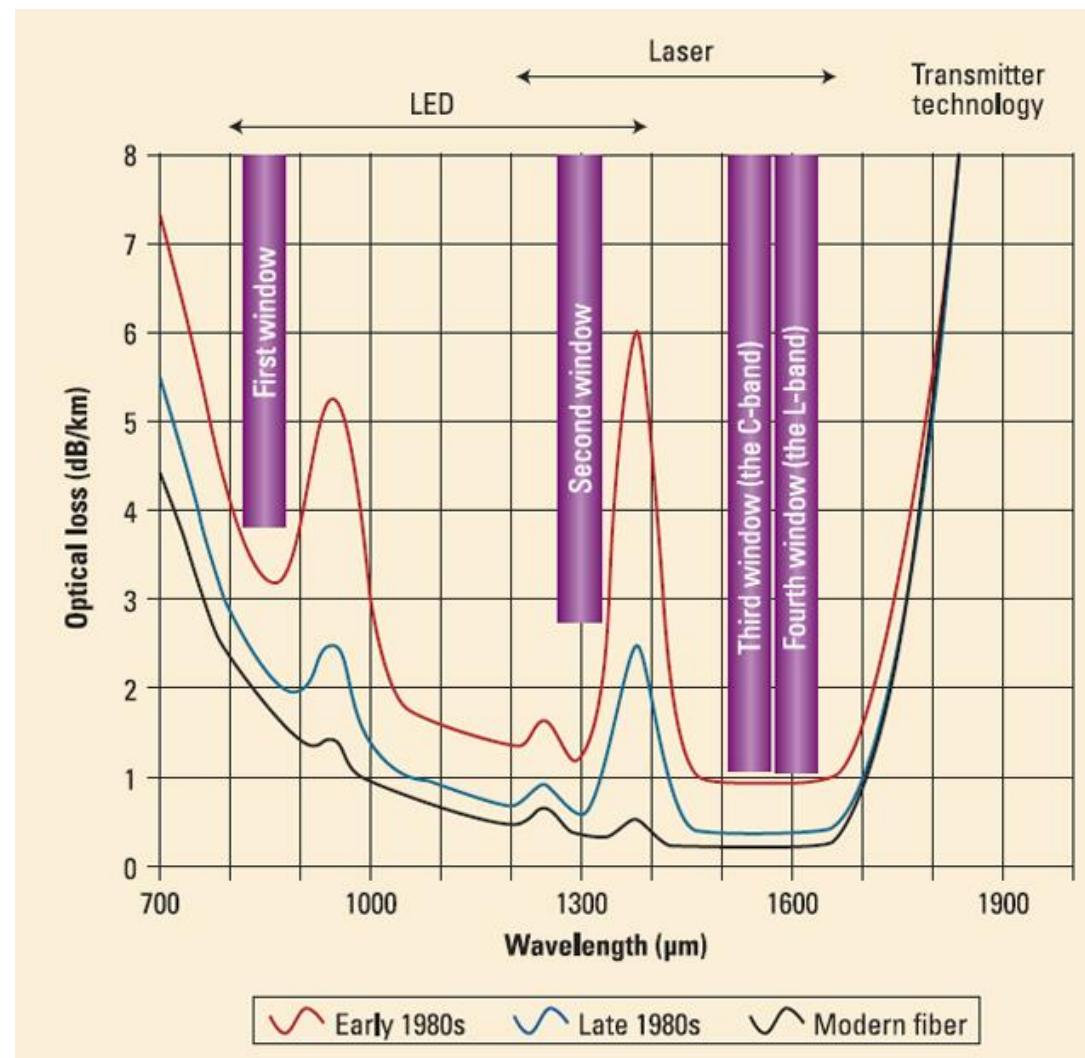
$\lambda$ : 750 nm – 400 nm      f: 400 THz – 750 THz

# Introdução (3)

11/76

As fibras ópticas têm (actualmente) atenuação muito pequena.

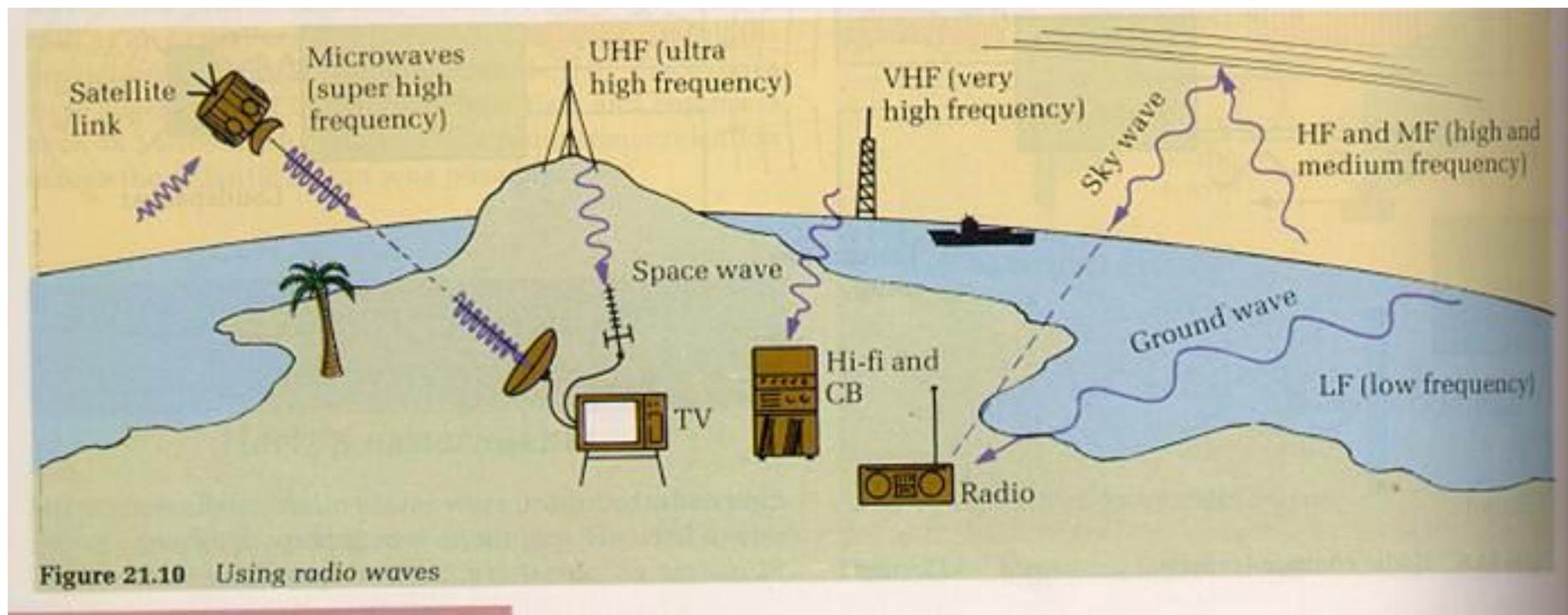
Banda	Descrição	$\lambda$
O	original	1260 a 1360 nm
E	estendida	1360 a 1460 nm
S	$\lambda$ curto	1460 a 1530 nm
C	convencional ("janela erbium")	1530 a 1565 nm
L	$\lambda$ longo	1565 a 1625 nm
U	$\lambda$ ultra-longo	1625 a 1735 nm



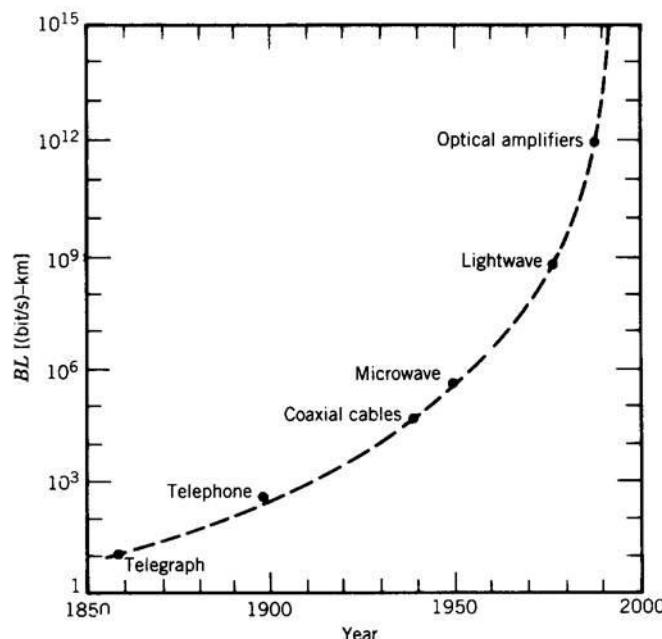
# Introdução (4)

12/76

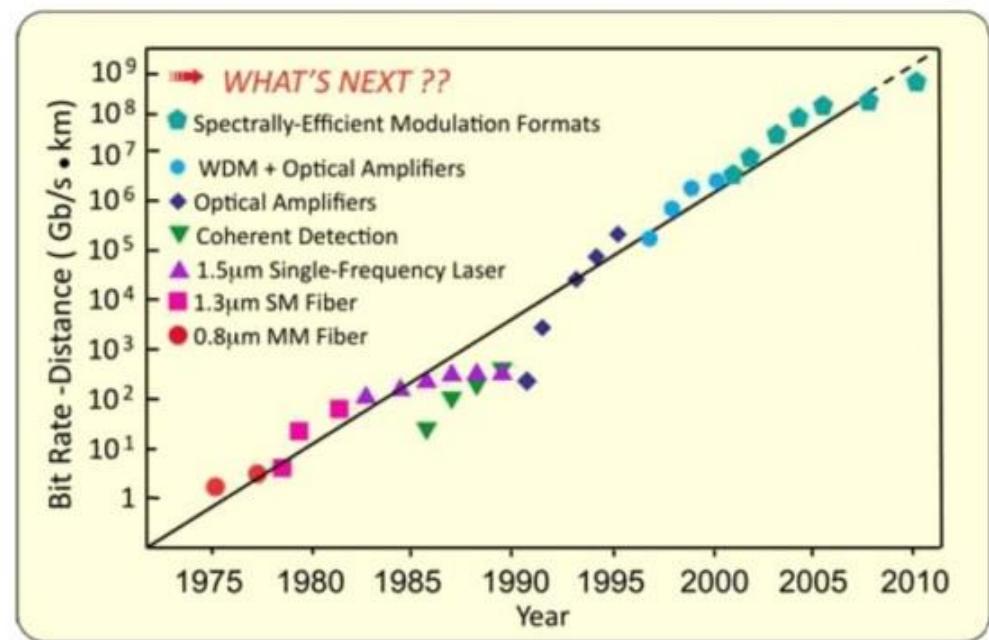
Frequências ( $\lambda=1,55 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $f \approx 200 \text{ THz}$ ) muitas ordens de grandeza acima das frequências das radiocomunicações (por exemplo SHF,  $f: 3-30 \text{ GHz}$ ).



Portadoras de frequência muito elevada (centenas de THz, 4 ordens de grandeza acima das Microondas) permitem larguras de banda (ritmos de transmissão) muito elevadas.



**FIGURE 1.1** Increase in bit rate-distance product during 1850–2000. The emergence of new technologies is marked by a filled circle.

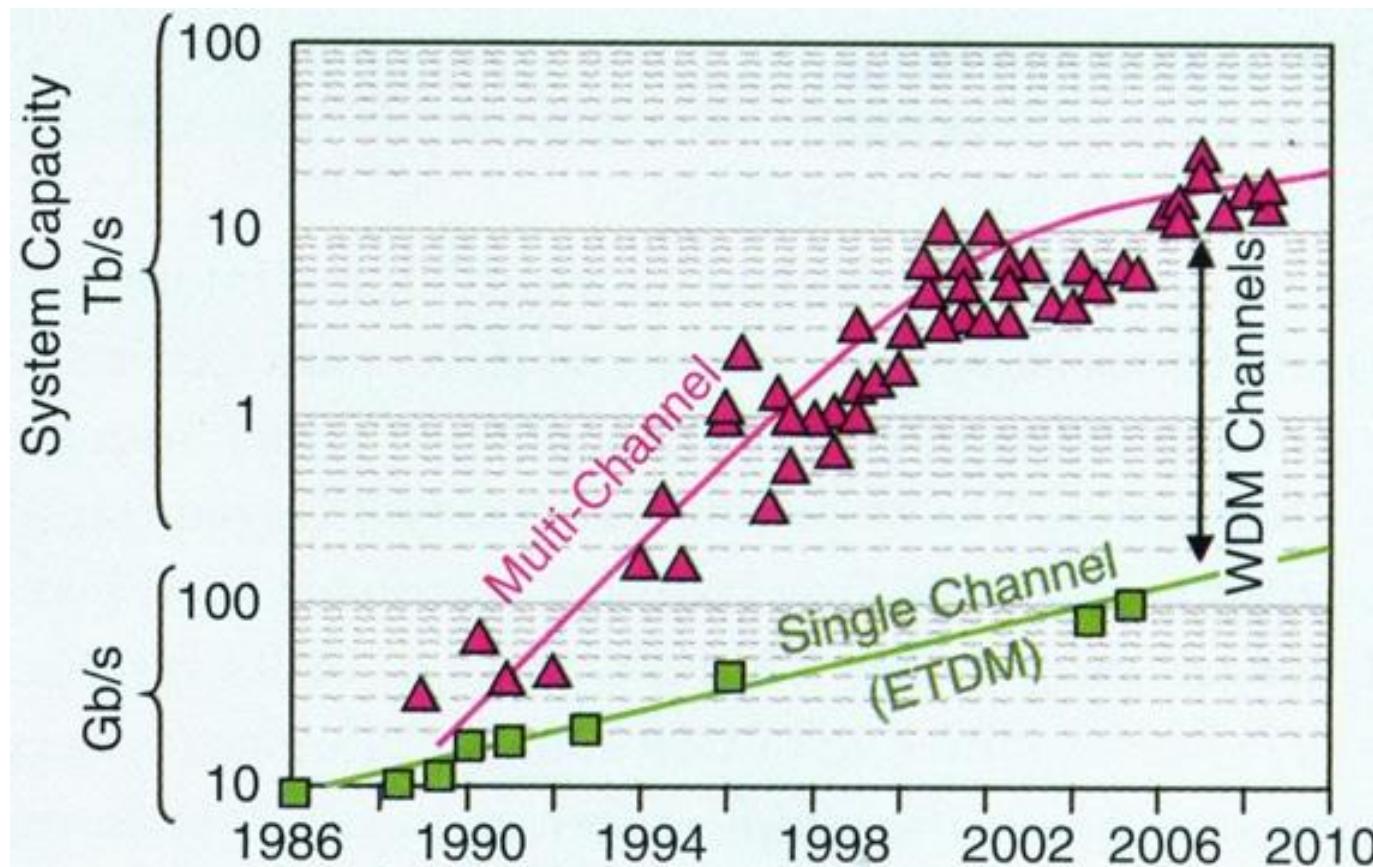


**Fig. 14.** Bit-rate distance product for transmission over a single optical fiber, highlighting the different key technologies that enabled the advances.

BL [bit.s<sup>-1</sup>.km] é uma figura de mérito de um sistema de telecomunicações que afere a sua capacidade de transmitir informação.

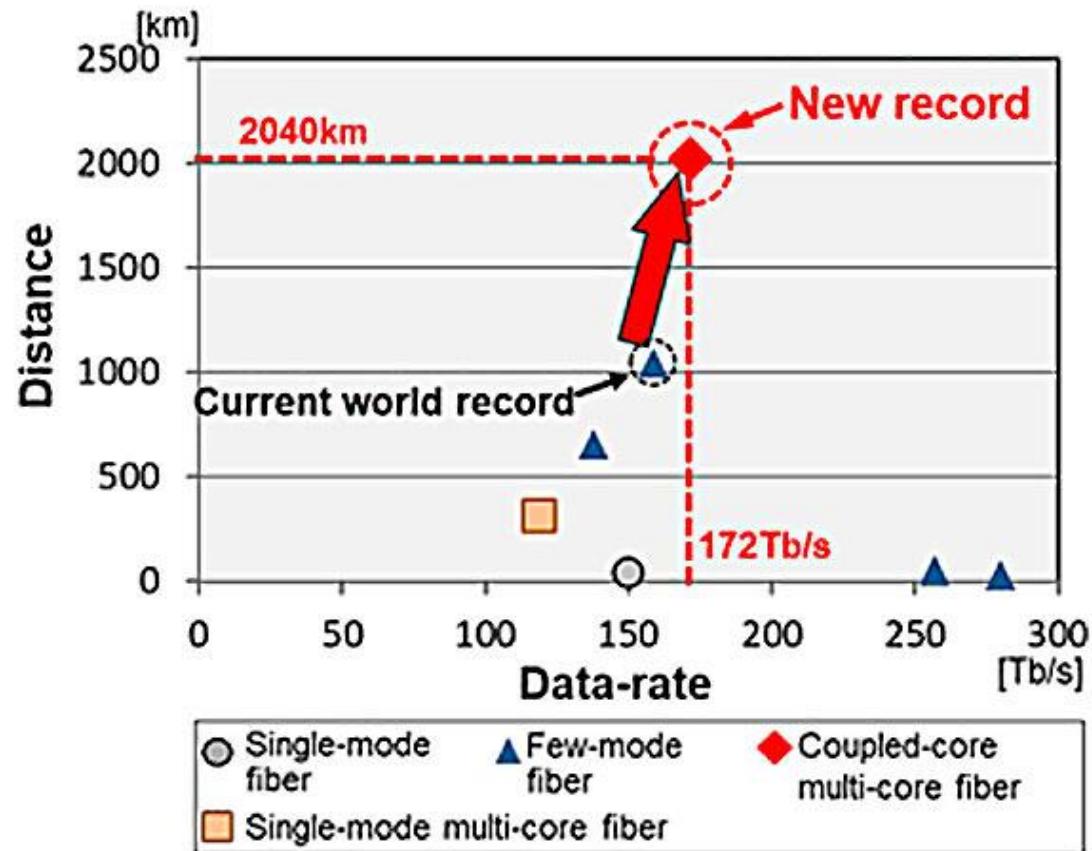
## Introdução (6)

14/76



As técnicas de multiplexagem por divisão no comprimento de onda (frequência) permitem grandes aumentos de capacidade.

This experiment	
Long-distance transmission	March 2020
Data-rate (b/s)	0.172 Peta
Number of cores	3
Number of modes/core	1
Optical coupling between core	Coupled
Distance (km)	2,040
Data-rate-distance product (bps × km)	351 Peta
Cladding diameter (mm)	



- Fibras com vários núcleos permitem grandes aumentos de capacidade.

Assistimos hoje a uma rapidíssima expansão da rede de fibra ótica não só nas comunicações a longas distâncias como também no mercado profissional e doméstico das comunicações de banda larga. Atualmente (Novembro 2020) quase todas as operadoras de telecomunicações nacionais publicitam serviços de internet fixa com ritmos de transmissão até  $500 \text{ Mbit.s}^{-1}$ , havendo mesmo ofertas de  $1 \text{ Gbit.s}^{-1}$ .

A dstelecom construiu e opera uma rede ultramoderna de fibra ótica nas zonas de menor densidade populacional do país

Exemplo:

SERPA

(25-Out-2020)



## Principais Vantagens das Fibras Óticas

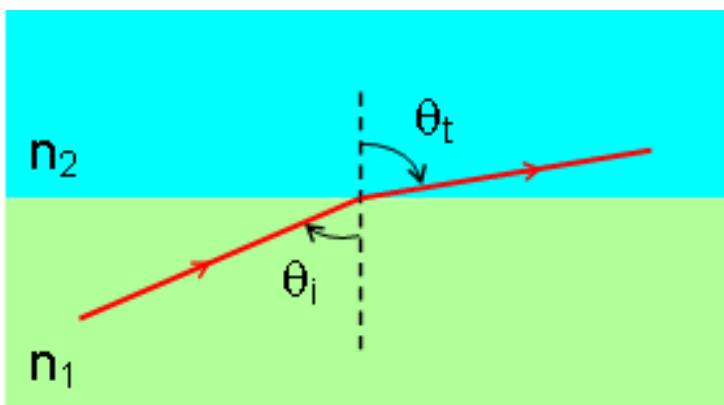
- Grande largura de banda (ritmos de transmissão muito elevados)
- Baixa atenuação (pode atingir cerca de  $0,2 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ )
- Grande imunidade à interferência e ao ruído
- Segurança da informação
- Pequeno volume e peso
- (Potencial) Baixo custo de fabrico (sílica extrai-se da areia)

## Principais Desvantagens das Fibras Óticas

- Fragilidade
- Exige equipamento muito especializado (precisão nas ligações)
- Custos de instalação são ainda elevados

## Reflexão Total

Quando a incidência se faz de um meio dielectricamente mais denso (para outro menos denso) há um ângulo de incidência (ângulo limite) a partir do qual há reflexão total.



$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad 3^{\text{a}} \text{Lei de Snell}$$

$$\sin \theta_i \geq n_{21} \Rightarrow |R_{TE}| = |R_{TM}| = 1$$

$$\sin \theta_{ilim} = n_2/n_1$$

$$R_{TE} = \frac{\bar{E}_{0r}}{\bar{E}_{0i}} = \frac{\cos \theta_i - \frac{\mu_1}{\mu_2} \sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \frac{\mu_1}{\mu_2} \sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \theta_i}}$$

$$R_{TM} = \frac{\bar{H}_{0r}}{\bar{H}_{0i}} = \frac{\frac{\mu_1}{\mu_2} n_{21}^2 \cos \theta_i - \sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \theta_i}}{\frac{\mu_1}{\mu_2} n_{21}^2 \cos \theta_i + \sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \theta_i}}$$

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\mu_{r2} \epsilon_{r2}}{\mu_{r1} \epsilon_{r1}}}$$

# Parâmetros Fundamentais (2)

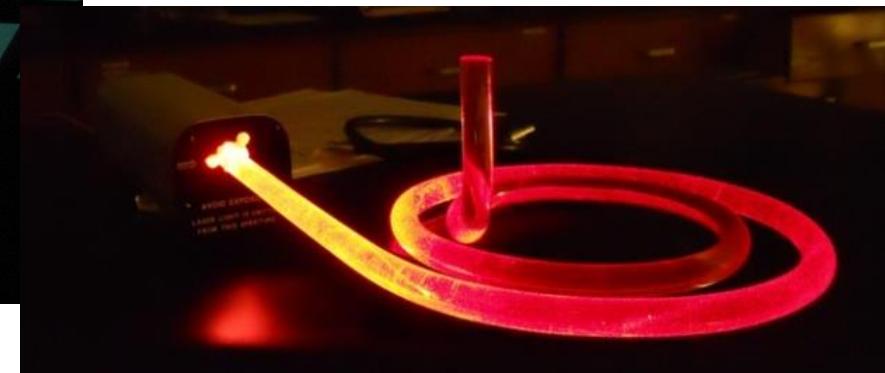
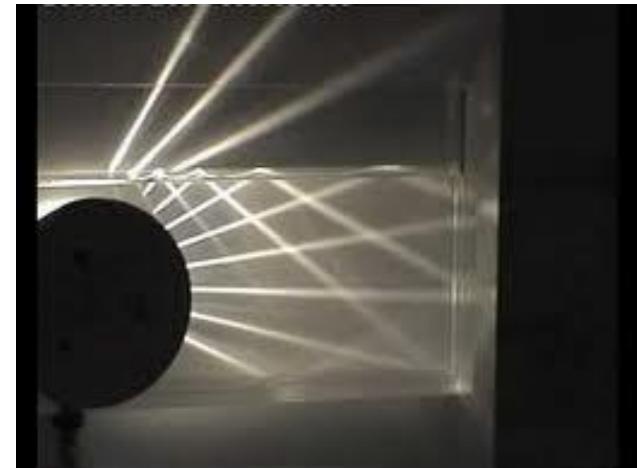
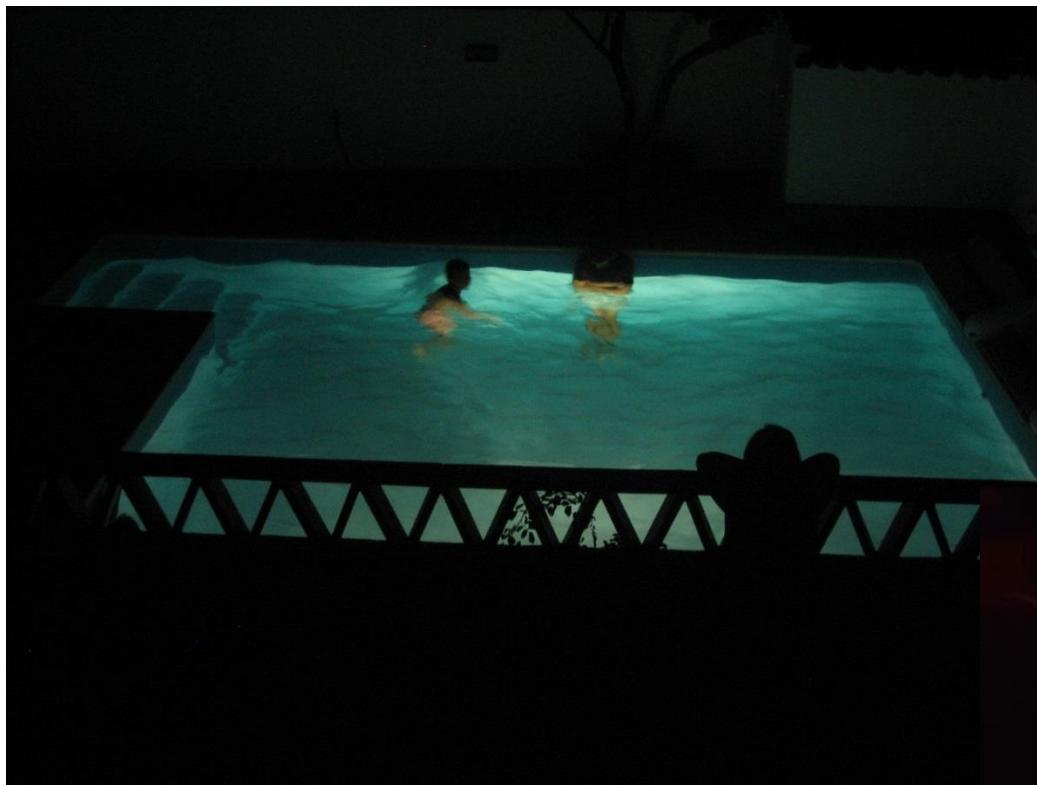
19/76

## Exemplo

Meio 1: Água ( $n_1 \approx 9$ )

Meio 2: Ar ( $n_2 = 1$ )

$$\theta_{\text{ilim}} \approx \sin^{-1}(1/9) \approx 6,4^\circ$$



## Parâmetros Fundamentais (3)

20/76

$$\operatorname{sen} \theta_i = n_1 \operatorname{sen} \theta_t$$

$$n_1 \operatorname{sen} \phi_i = n_2 \operatorname{sen} \phi_t$$

$$\operatorname{sen} \theta_i = \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \operatorname{sen}^2 \phi_t}$$

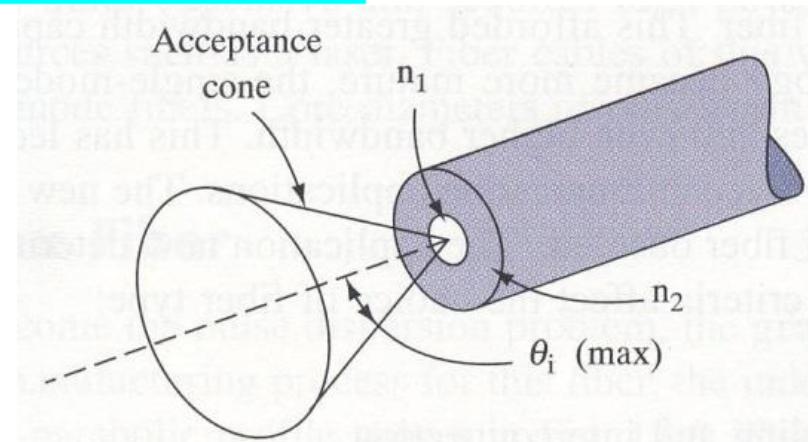
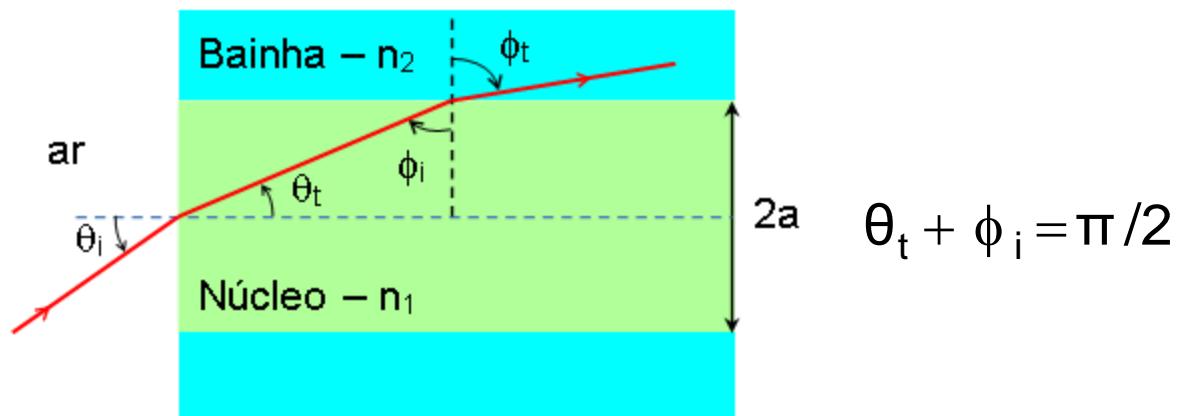
Reflexão Total ( $\phi_t=\pi/2$ )

$$AN = \operatorname{sen} \theta_a = \operatorname{sen} \theta_{i\text{Max}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

A abertura numérica (AN) representa a capacidade de captação de luz da fibra

Define-se contraste ( $\Delta$ ) da fibra

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



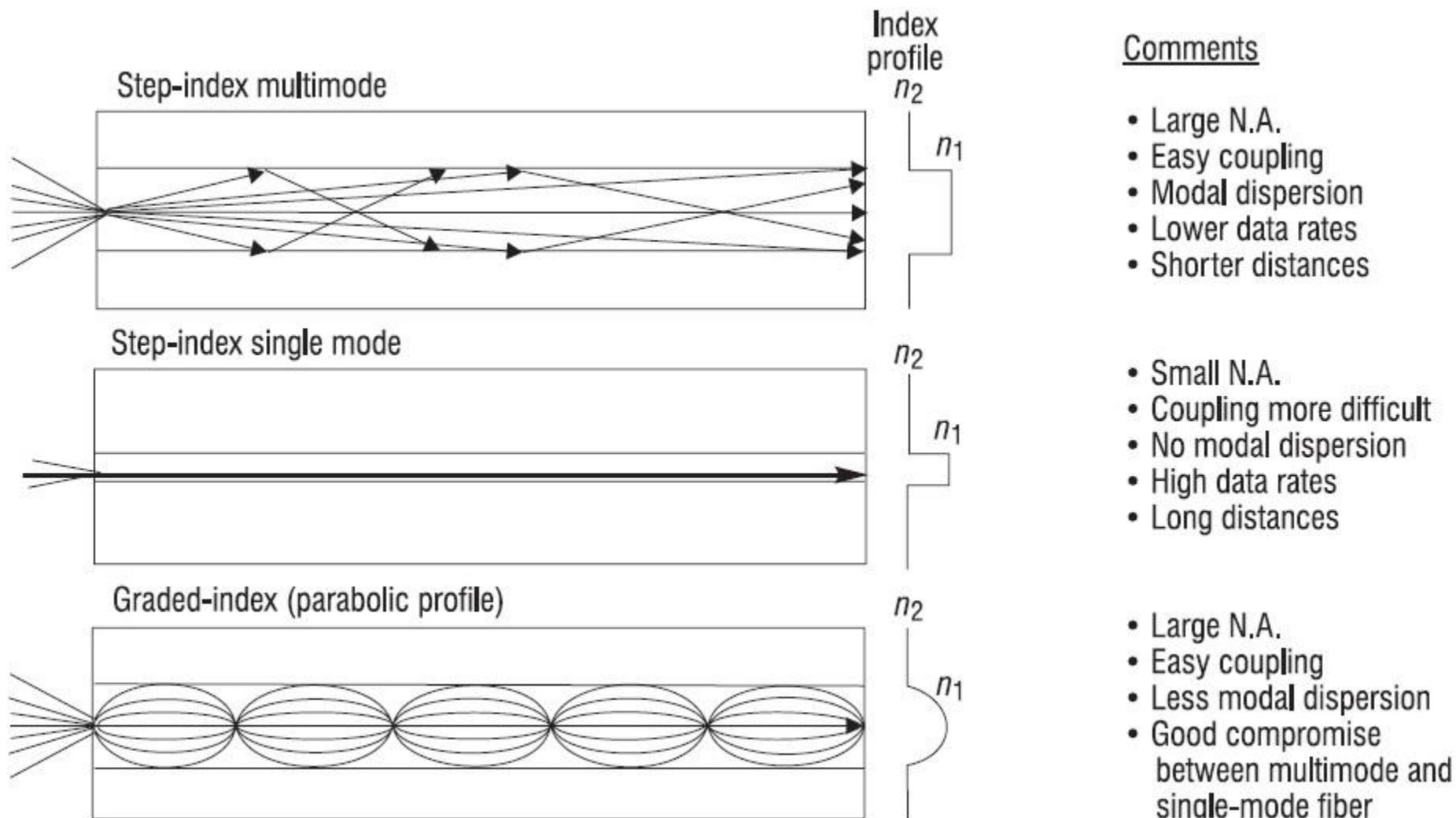
Na situação de pequeno contraste

$$n_1 \approx n_2$$

$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \ll 1$$

# Parâmetros Fundamentais (4)

21/76



## Parâmetros Fundamentais (5)

22/76

u – constante de propagação radial no núcleo

w – constante de atenuação radial na bainha

$$u^2 + k_z^2 = k_1^2 = n_1^2 k_0^2 \quad k_0 = \frac{\omega}{c_0}$$

$$-w^2 + k_z^2 = k_2^2 = n_2^2 k_0^2$$

$$u^2 + w^2 = k_0^2 (n_1^2 - n_2^2)$$

Definem-se parâmetros normalizados

$$U = au$$

$$W = aw$$

$$V = \sqrt{U^2 + W^2} = a \sqrt{u^2 + w^2} = a k_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = a k_0 \text{AN} = a n_1 k_0 \sqrt{2\Delta}$$

$$b = \frac{W^2}{V^2} = 1 - \frac{U^2}{V^2} = \frac{(k_z/k_0)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}$$

Constante de propagação normalizada (b)

No corte ( $W=0$ , não há confinamento)

$$U=V \quad b=0 \quad k_z=k_2$$

Longe do corte ( $W \rightarrow \infty$ , confinamento total)

$$W=V \quad b=1 \quad k_z=k_1$$

## Parâmetros Fundamentais (6)

23/76

(Como veremos mais à frente) O modo fundamental da fibra ótica é o LP<sub>01</sub> (HE<sub>11</sub>) que tem frequência de corte nula e equação característica (para pequeno contraste  $\Delta \ll 1$ )

$$\frac{J_0(U)}{U J_1(U)} = \frac{K_0(W)}{W K_1(W)}$$

J<sub>m</sub> – Função de Bessel de 1<sup>a</sup> espécie e ordem m  
K<sub>m</sub> – Função de Bessel modificada de 2<sup>a</sup> espécie e ordem m

A equação característica tem soluções aproximadas

$$U = \frac{(1+\sqrt{2})V}{1+(4+V^4)^{1/4}}$$

Aproximação de Gloge

$$U = \sqrt{V^2 - (1,1428V - 0,996)^2}$$

Aproximação de Rudolph e Neumann ( $1,5 < V < 2,5$ )

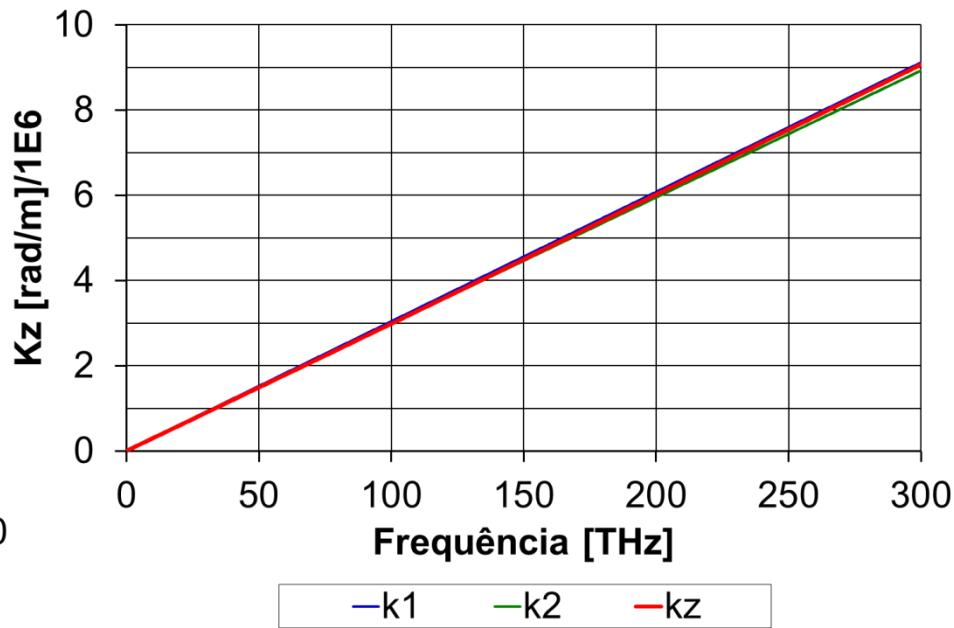
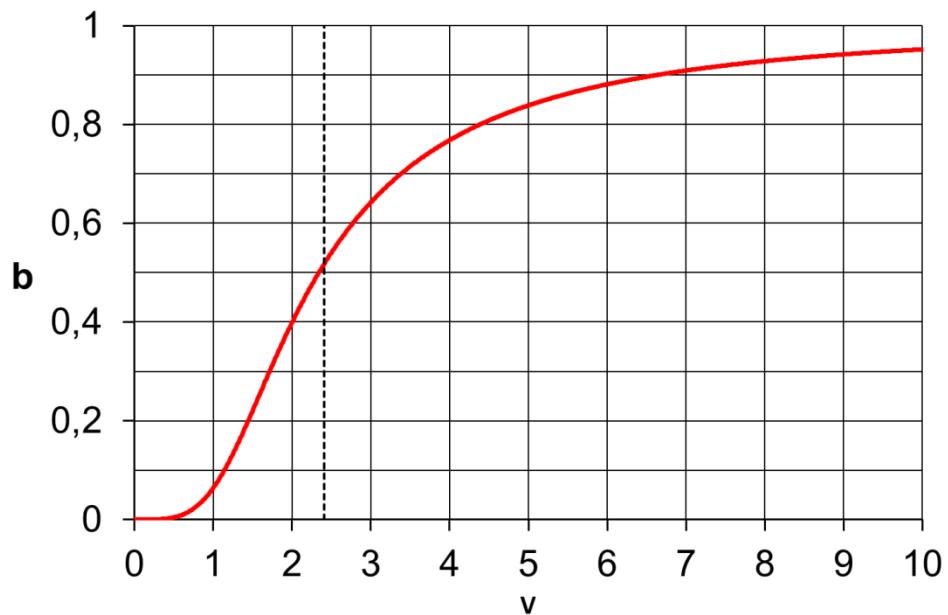
O segundo modo é o LP<sub>11</sub> (HE<sub>21</sub>, TM<sub>01</sub>, TE<sub>01</sub>) que tem frequência (normalizada) de corte V<sub>c</sub>=2,405

Estimativa do nº de modos (se V >> 1)    M ≈  $\frac{V^2}{2}$

**Regime monomodal para V < 2,405**

## Exemplo

$$(n_1=1,45, n_2=1,42, a=2 \text{ } \mu\text{m})$$



$$\Delta = 2\%,$$

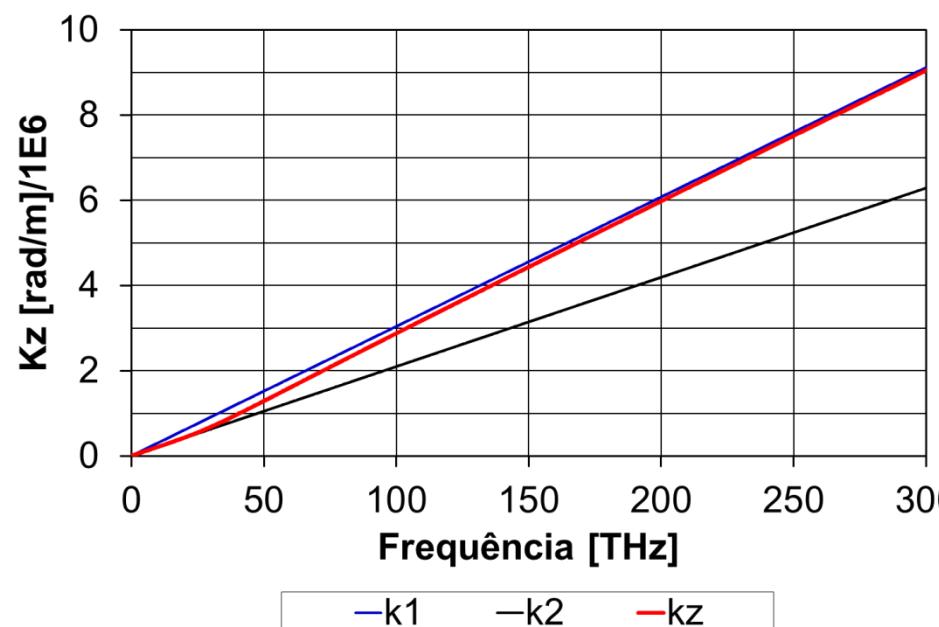
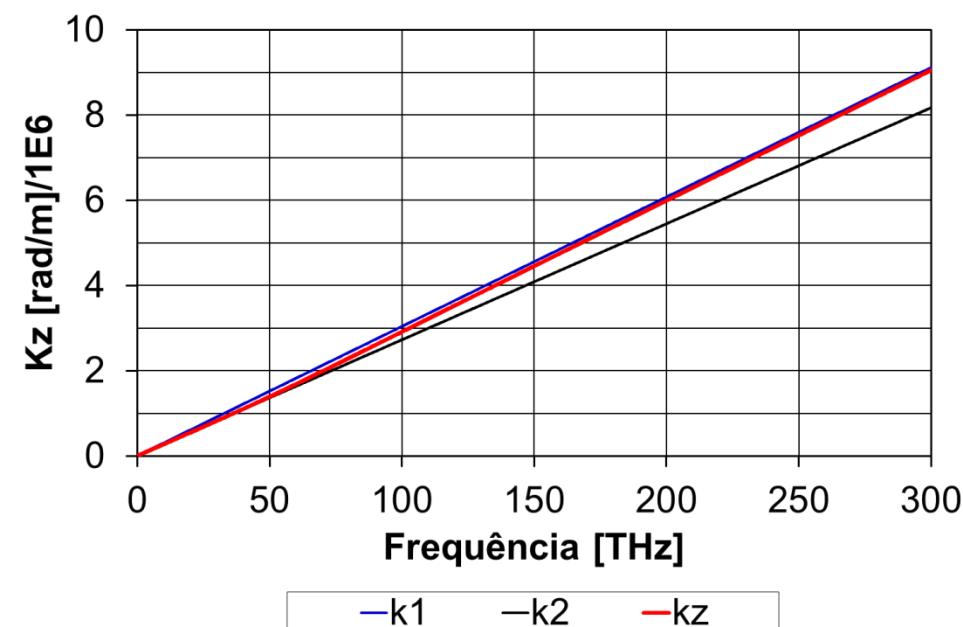
Regime monomodal ( $v=2,405$ ) até  $f=195,7$  THz ( $\lambda=1,533 \text{ } \mu\text{m}$ )

## Exemplo

$$(n_1=1,45, a=2 \mu\text{m})$$

$$n_2=1,3 (\Delta=9,8\%)$$

$$n_2=1 (\Delta=26,2\%)$$



Pode-se usar a aproximação da ótica geométrica quando o comprimento de onda é muito menor do que as dimensões das estruturas. Nesse caso a radiação é representada por raios e podem-se usar as ferramentas da ótica:

- Propagação rectilínea em meios homogéneos;
- Reflexão e refracção (leis de Snell)

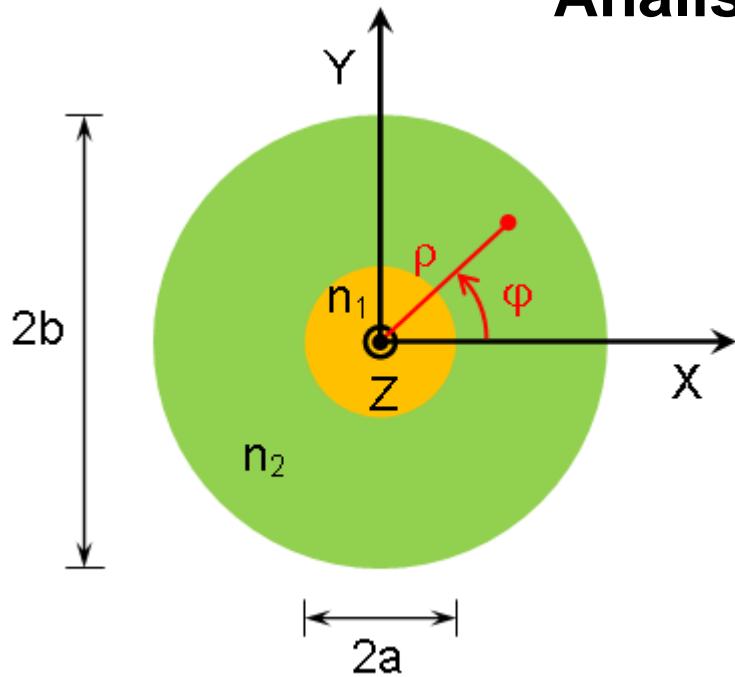
No caso das fibras monomodo o diâmetro do núcleo não é muito maior do que o comprimento de onda e assim sendo o uso da aproximação da ótica geométrica apenas permite resultados de natureza qualitativa. Nesse caso um estudo rigoroso exige a utilização da teoria electromagnética (análise modal)

Um diâmetro típico do núcleo de uma fibra monomodo é  $d_{1m}=10\text{ }\mu\text{m}$ . No caso da fibra multimodo tem-se tipicamente  $d_{mm}=100\text{ }\mu\text{m}$ .

Para  $\lambda=1,55\text{ }\mu\text{m}$ , tem-se  $d_{1m}/\lambda\approx6,5$  e  $d_{mm}/\lambda\approx65$ .

# Análise Modal (1)

27/76



Equação de Onda

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + k_c^2 \right) \left( \begin{bmatrix} \bar{E}_z \\ \bar{H}_z \end{bmatrix} \right) = 0$$

$$k_c^2 = k_0^2 n - k_z^2$$

Método de separação de variáveis

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_z \\ \bar{H}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} R(\rho) F(\varphi) e^{-jk_z z}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 R}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial R}{\partial \rho} + \left( k_c^2 - \frac{m^2}{\rho^2} \right) R = 0 \\ \frac{\partial^2 F}{\partial \varphi^2} + m^2 F = 0 \end{array} \right. \quad \text{Equação de Bessel}$$

## Análise Modal (2)

28/76

$$R(\rho) = \begin{cases} AJ_m(u\rho) & \rho \leq a \\ BK_m(w\rho) & \rho > a \end{cases} \quad \begin{aligned} u^2 &= k_0^2 n_1^2 - k_z^2 \\ w^2 &= k_z^2 - k_0^2 n_2^2 \end{aligned}$$

$J_m$  – função de Bessel de 1<sup>a</sup> espécie e ordem m

$K_m$  – função de Bessel modificada de 2<sup>a</sup> espécie e ordem m

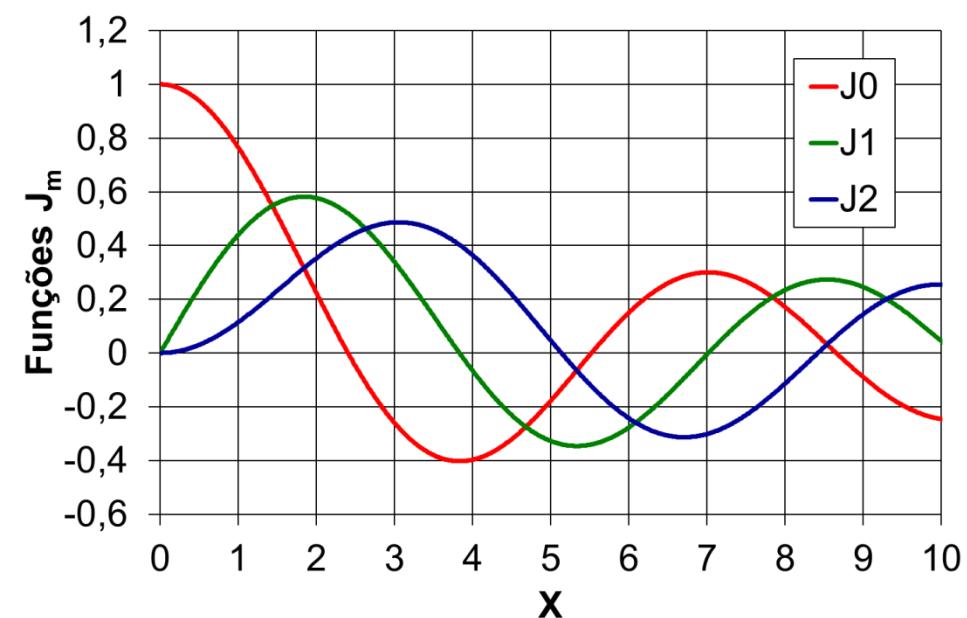
$$F(\varphi) = C \cos(m\varphi) \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Solução geral

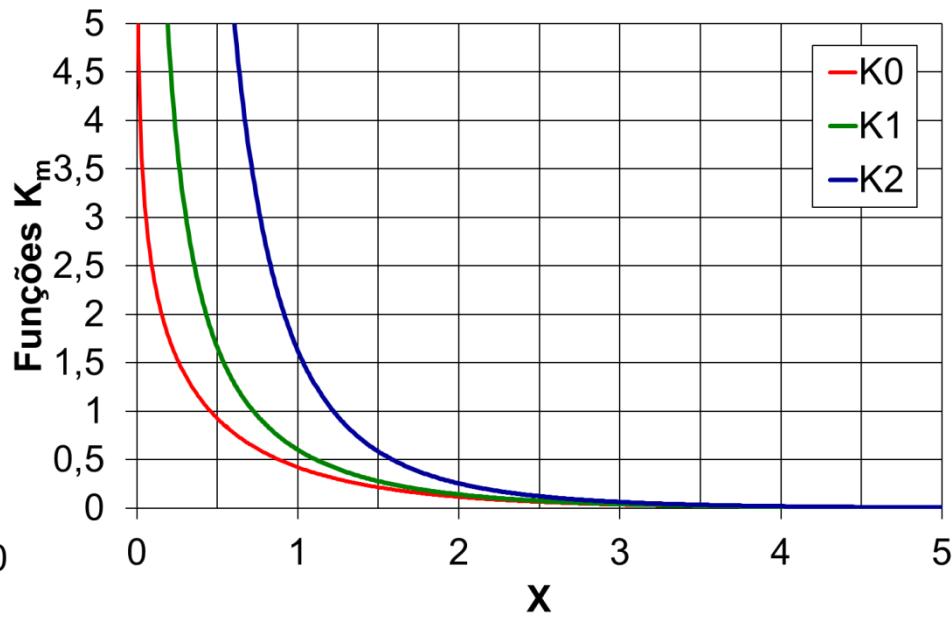
$$\begin{bmatrix} \bar{E}_z \\ \bar{H}_z \end{bmatrix} = \begin{cases} \bar{A} J_m(u\rho) \cos(m\varphi) & \rho \leq a \\ \bar{B} K_m(w\rho) \cos(m\varphi) & \rho > a \end{cases}$$

A solução particular obtém-se por imposição das cnf: continuidade das componentes tangenciais ( $E_z$ ,  $H_z$ ,  $E_\varphi$ ,  $H_\varphi$ ) na fronteira entre o núcleo e a bainha ( $\rho=a$ ).

Funções de Bessel de 1<sup>a</sup> Espécie

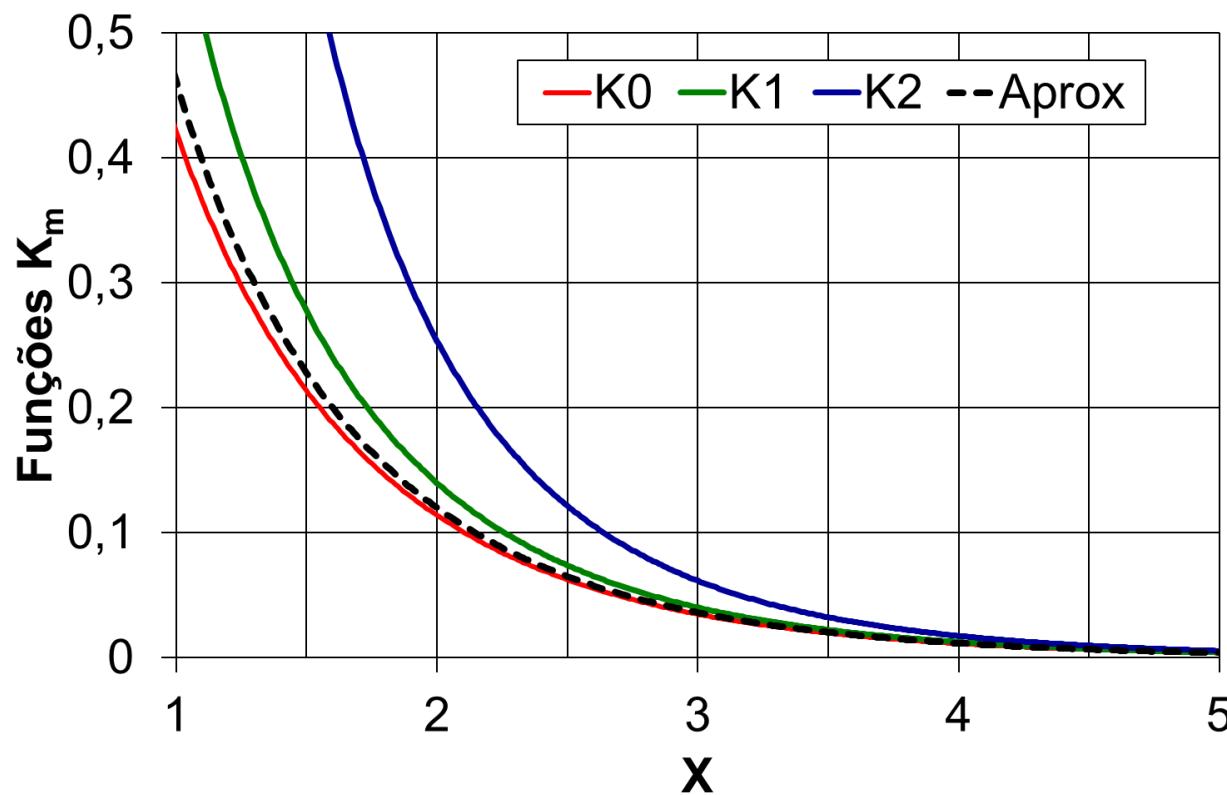


Funções de Bessel Modificadas de 2<sup>a</sup> Espécie



Funções de Bessel Modificadas de 2<sup>a</sup> Espécie

$$x \gg 1 \quad K_m(x) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2x}} e^{-x}$$



As componentes transversais obtém-se das componentes longitudinais de suporte ( $E_z$ ,  $H_z$ )

$$\bar{E}_\rho = \frac{1}{k_c^2} \left( -jk_z \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial \rho} - j\omega \mu \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial \phi} \right)$$

$$\bar{E}_\phi = \frac{1}{k_c^2} \left( -jk_z \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial \phi} + j\omega \mu \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial \rho} \right)$$

$$\bar{H}_\rho = \frac{1}{k_c^2} \left( j\omega \epsilon \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial \phi} - jk_z \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial \rho} \right)$$

$$\bar{H}_\phi = \frac{1}{k_c^2} \left( -j\omega \epsilon \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial \rho} - jk_z \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial \phi} \right)$$

# Análise Modal (5)

32/76

Modos TE:  $E_z=0, H_z \neq 0$

Modos TM:  $E_z \neq 0, H_z=0$

Modos Híbridos (HE ou EH):  $E_z \neq 0, H_z \neq 0$

## Modos TE ( $E_z=0$ )

$$\bar{H}_z = \begin{cases} \bar{A} J_m(u\rho) \cos(m\varphi) & \rho \leq a \\ \bar{B} K_m(w\rho) \cos(m\varphi) & \rho > a \end{cases} \quad \begin{aligned} u^2 &= k_0^2 n_1^2 - k_z^2 \\ w^2 &= k_z^2 - k_0^2 n_2^2 \end{aligned}$$

$$\bar{E}_\rho = -j \frac{\omega \mu}{k_c^2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial \varphi} = \begin{cases} -j \frac{\omega \mu}{u^2} \frac{1}{\rho} [-m \bar{A} J_m(u\rho) \sin(m\varphi)] & \rho \leq a \\ j \frac{\omega \mu}{w^2} \frac{1}{\rho} [-m \bar{B} K_m(w\rho) \sin(m\varphi)] & \rho > a \end{cases}$$

$$\bar{E}_\varphi = j \frac{\omega \mu}{k_c^2} \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial \rho} = \begin{cases} j \frac{\omega \mu}{u^2} \bar{A} u J'_m(u\rho) \cos(m\varphi) & \rho \leq a \\ -j \frac{\omega \mu}{w^2} \bar{B} w K'_m(w\rho) \cos(m\varphi) & \rho > a \end{cases}$$

$$\boxed{\frac{\partial J_m(u\rho)}{\partial \rho} = u J'_m(u\rho)}$$

## Análise Modal (6)

33/76

$$\bar{H}_\rho = -j \frac{k_z}{k_c^2} \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial \rho} = \begin{cases} -j \frac{k_z}{u^2} \bar{A} u J_m'(u\rho) \cos(m\varphi) & \rho \leq a \\ j \frac{k_z}{w^2} \bar{B} w K_m'(w\rho) \cos(m\varphi) & \rho > a \end{cases}$$

$$\bar{H}_\varphi = -j \frac{k_z}{k_c^2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial \varphi} = \begin{cases} -j \frac{k_z}{u^2} \frac{1}{\rho} [-m \bar{A} J_m(u\rho) \sin(m\varphi)] & \rho \leq a \\ j \frac{k_z}{w^2} \frac{1}{\rho} [-m \bar{B} K_m(w\rho) \sin(m\varphi)] & \rho > a \end{cases}$$

Cnf em  $\rho=a$

$$U=u a \quad W=w a$$

1.  $H_z$  contínuo  $\rightarrow \bar{A} J_m(U) = \bar{B} K_m(W)$

2.  $H_\varphi$  contínuo  $\rightarrow \frac{m}{U^2} \bar{A} J_m(U) \sin(m\varphi) = -\frac{m}{W^2} \bar{B} K_m(W) \sin(m\varphi)$

3.  $E_\varphi$  contínuo  $\rightarrow \frac{\bar{A}}{U} J_m'(U) = -\frac{\bar{B}}{W} K_m'(W)$

Só é possível satisfazer 2 (conjuntamente com 1) se  $m=0$ .

1 e 3 conduzem à equação característica

$$\frac{J_1(U)}{U J_0(U)} = - \frac{K_1(W)}{W K_0(W)}$$

$$J'_0(U) = -J_1(U)$$

$$K'_0(W) = -K_1(W)$$

**Modos TE<sub>0n</sub> ( $E_z = E_\rho = H_\phi = 0$ )**

$$\bar{H}_z = \begin{cases} \bar{A} J_0\left(\frac{U}{a}\rho\right) & \rho \leq a \\ \frac{J_0(U)}{K_0(W)} \bar{A} K_0\left(\frac{W}{a}\rho\right) & \rho > a \end{cases}$$

$$\bar{H}_\rho = \begin{cases} \frac{jk_z}{u} \bar{A} J_1\left(\frac{U}{a}\rho\right) & \rho \leq a \\ -\frac{jk_z}{w} \frac{J_0(U)}{K_0(W)} \bar{A} K_1\left(\frac{W}{a}\rho\right) & \rho > a \end{cases}$$

$$\bar{E}_\varphi = \begin{cases} -\frac{j\omega\mu_0}{w} \frac{u}{a} J_1\left(\frac{U}{a}\rho\right) & \rho \leq a \\ \frac{j\omega\mu_0}{w} \frac{J_0(U)}{K_0(W)} \frac{w}{a} K_1\left(\frac{W}{a}\rho\right) & \rho > a \end{cases}$$

## Modos TM<sub>0n</sub> ( $H_z = H_\rho = E_\varphi = 0$ )

Também só existem modos sem variação azimutal ( $m=0$ ) e a equação característica é agora

$$\frac{J_1(U)}{UJ_0(U)} = -\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \frac{K_1(W)}{WK_0(W)}$$

Notar que esta equação apenas difere da dos modos TE<sub>0n</sub> no termo  $(n_2/n_1)^2$ .

## Modos Híbridos (EH, HE)

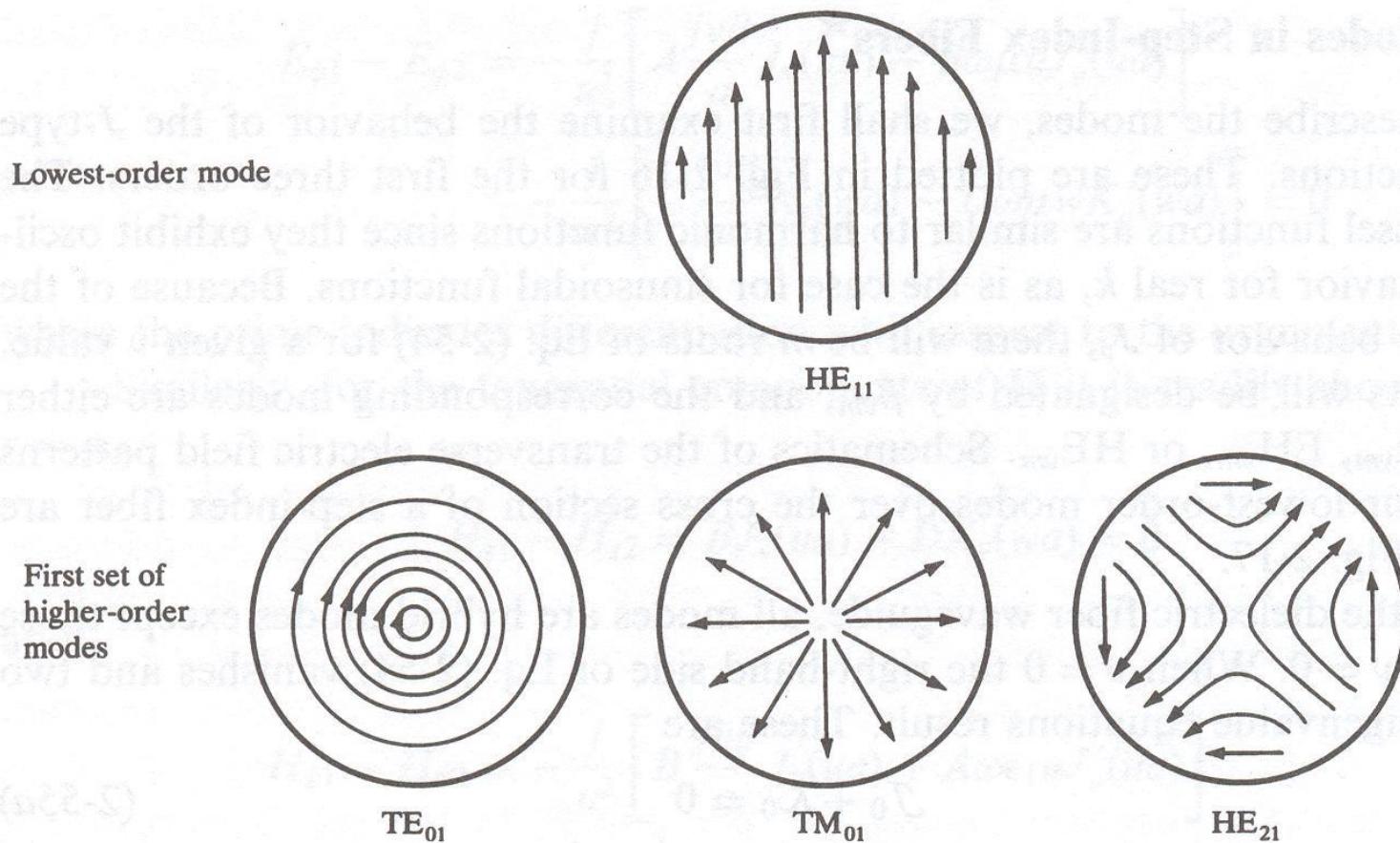
As soluções gerais das componentes de suporte,  $E_z$  e  $H_z$ , obtêm-se da resolução das equações diferenciais (método de separação de variáveis). As componentes transversais obtêm-se das equações da página 29. As soluções particulares obtêm-se por imposição das cnf que são a continuidade de  $E_z$ ,  $E_\varphi$ ,  $H_z$  e  $H_\varphi$ , em  $\rho=a$ .

$$\bar{E}_z = \begin{cases} \bar{A} J_m\left(\frac{U}{a}\rho\right) \cos(m\varphi) & \rho \leq a \\ \bar{A} \frac{J_m(U)}{K_m(W)} K_m\left(\frac{W}{a}\rho\right) \cos(m\varphi) & \rho > a \end{cases}$$

$$\bar{H}_z = \begin{cases} \bar{B} J_m\left(\frac{U}{a}\rho\right) \sin(m\varphi) & \rho \leq a \\ \bar{B} \frac{J_m(U)}{K_m(W)} K_m\left(\frac{W}{a}\rho\right) \sin(m\varphi) & \rho > a \end{cases}$$

# Análise Modal (10)

37/76



**FIGURE 2-17**

Cross-sectional views of the transverse electric field vectors for the four lowest-order modes in a step-index fiber.

Existem modos de índice mn e a equação característica é agora

$$\left[ \frac{J'_m(U)}{UJ_m(U)} + \frac{K'_m(W)}{WK_m(W)} \right] \left[ \frac{J'_m(U)}{UJ_m(U)} + \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \frac{K'_m(W)}{WK_m(W)} \right] = m^2 \left( \frac{1}{U^2} + \frac{1}{W^2} \right) \left[ \frac{1}{U^2} + \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \frac{1}{W^2} \right]$$

Esta equação (tal como as equações características dos modos TE e TM) é difícil de resolver.

As fibras ópticas utilizadas na prática têm pequeno contraste ( $\Delta$ ). Os valores típicos de  $\Delta$  são da ordem de 1%. Tem-se nestes casos  $n_1 \approx n_2$ .

Tem portanto mais interesse o caso do pequeno contraste. Além disso obtém-se equações mais simples.

### Equações Características para Fibras de Pequeno Contraste $n_1 \approx n_2$

Neste caso os modos  $TE_{0n}$  e  $TM_{0n}$  têm a mesma equação característica (são degenerados)

$$\frac{J_1(U)}{UJ_0(U)} = -\frac{K_1(W)}{WK_0(W)}$$

A equação característica dos modos híbridos fica agora

$$\left[ \frac{J'_m(U)}{UJ_m(U)} + \frac{K'_m(W)}{WK_m(W)} \right] = \pm m \left( \frac{1}{U^2} + \frac{1}{W^2} \right) \quad m \geq 1$$

Modos EH ( $H_z$  preponderante) escolhe-se o sinal +  
Modos HE ( $E_z$  preponderante) escolhe-se o sinal -

## Análise Modal (13)

40/76

Utilizando as relações de recorrência das funções de Bessel

$$J'_m(x) = \frac{1}{2} [J_{m-1}(x) - J_{m+1}(x)]$$

$$\frac{m}{x} J_m(x) = \frac{1}{2} [J_{m-1}(x) + J_{m+1}(x)]$$

$$K'_m(x) = -\frac{1}{2} [K_{m-1}(x) + K_{m+1}(x)]$$

$$\frac{m}{x} K_m(x) = -\frac{1}{2} [K_{m-1}(x) - K_{m+1}(x)]$$

Modos EH (sinal +)

$$\frac{J_{m+1}(U)}{U J_m(U)} = -\frac{K_{m+1}(W)}{W K_m(W)}$$

Modos HE (sinal -)

$$\frac{J_{m-1}(U)}{U J_m(U)} = \frac{K_{m-1}(W)}{W K_m(W)}$$

Para  $m \geq 2$  a equação característica dos modos HE pode ser escrita na forma

$$\frac{J_{m-1}(U)}{U J_{m-2}(U)} = -\frac{K_{m-1}(W)}{W K_{m-2}(W)}$$

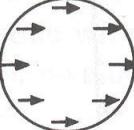
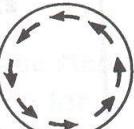
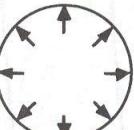
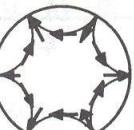
## Modos Linearmente Polarizados (LP)

Nas fibras de pequeno contraste encontram-se modos quase degenerados cuja sobreposição dos respectivos campos origina (pseudo) modos com campos transversais (em toda a secção transversal da fibra) paralelos a direcções fixas (normalmente x ou y) no espaço – **modos LP**

Modo LP ( $n \geq 1$ )	Modos Convencionais ( $n \geq 1$ )	Equação de Dispersão
$LP_{0n}$	$HE_{1n}$	$\frac{J_0(U)}{UJ_1(U)} = \frac{K_0(W)}{WK_1(W)}$
$LP_{1n}$	$TE_{0n}$ $TM_{0n}$ $HE_{2n}$	$\frac{J_1(U)}{UJ_0(U)} = -\frac{K_1(W)}{WK_0(W)}$
$LP_{mn}$ ( $m \geq 2$ )	$EH_{m-1,n}$ $HE_{m+1,n}$	$\frac{J_m(U)}{UJ_{m-1}(U)} = -\frac{K_m(W)}{WK_{m-1}(W)}$

# Análise Modal (15)

42/76

LP-mode designations	Traditional designations	Electric field distribution	Intensity distribution of $E_x$
$LP_{01}$	$HE_{11}$		
$LP_{11}$	$TE_{01}$		
	$TM_{01}$		
	$HE_{21}$		
$LP_{21}$	$EH_{11}$		
	$HE_{31}$		

**Figure 3.2:** Electric field vectors and intensity profiles of LP modes and conventional modes.

Nas fibras de pequeno contraste as componentes longitudinais de suporte ( $E_z, H_z$ ) têm amplitudes muito inferiores às componentes transversais ( $E_x, E_y, H_x, H_y$ ) – **modos quase-TEM**.

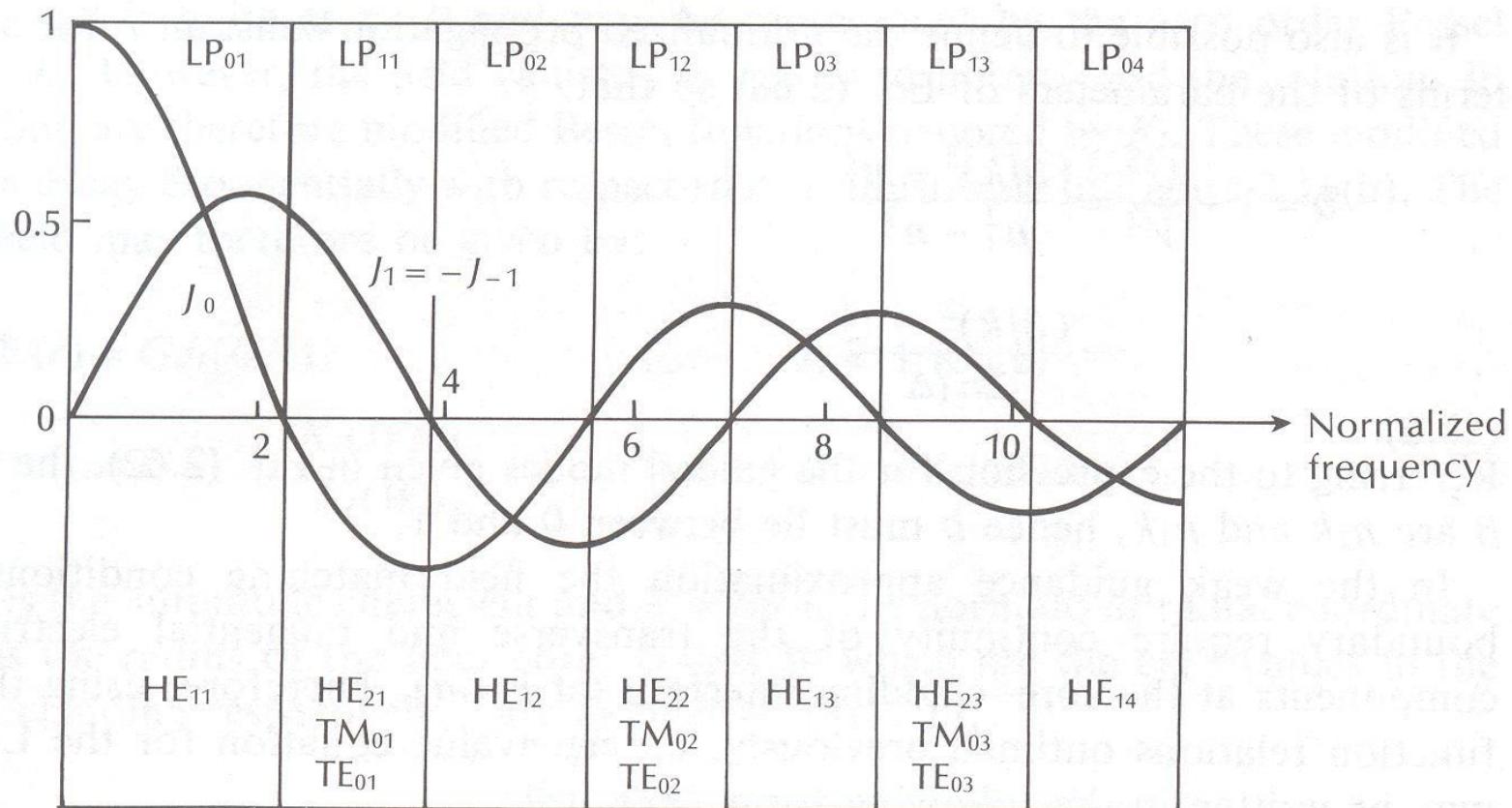
## Condição de Corte

A condição de corte de cada modo obtém-se impondo  $W=0$  ( $U=V, b=0$ ) à respectiva equação característica.

Modo LP	Modos Convencionais	Condição de Corte	$U_c$	Número de Modos
$LP_{01}$	$HE_{11}$	$U=0$	0	1
$LP_{11}$	$TE_{01}$ $TM_{01}$ $HE_{21}$	$J_0(U)_1=0$	2,405	4
$LP_{21}$	$EH_{11}$ $HE_{31}$	$J_1(U)_1=0$	3,832	6

# Análise Modal (17)

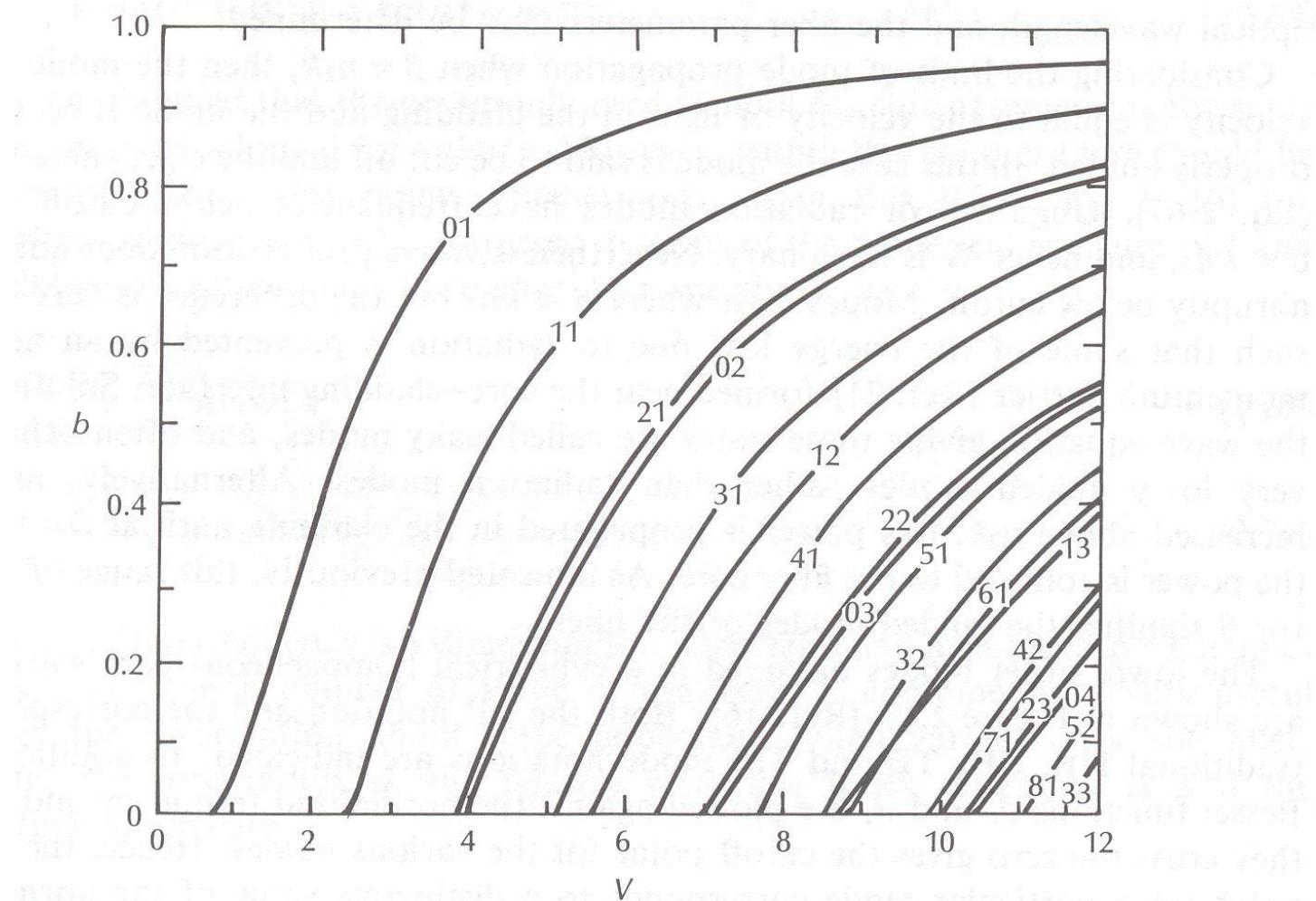
44/76



**Figure 2.17** The allowed regions for the LP modes of order  $l=0,1$  against normalized frequency ( $V$ ) for a circular optical waveguide with a constant refractive index core (step index fiber). Reproduced with permission from D. Gloge. *Appl. Opt.*, **10**, p. 2552, 1971.

# Análise Modal (18)

45/76



**Figure 2.18** The normalized propagation constant  $b$  as a function of normalized frequency  $V$  for a number of LP modes. Reproduced with permission from D. Gloge. *Appl. Opt.*, **10**, p. 2552, 1971.

## Modo Fundamental LP<sub>01</sub> (HE<sub>11</sub>)

Regime monomodal até V=2,405. Já vimos (página 22) as soluções aproximadas da equação característica.

O campo eléctrico vale (para pequeno contraste)

$$\begin{aligned} A_x &= A_\rho \cos \varphi - A_\varphi \sin \varphi \\ A_y &= A_\rho \sin \varphi + A_\varphi \cos \varphi \end{aligned}$$

**HE<sub>11</sub>x**

$$\bar{E}_z = \begin{cases} \bar{A} J_1(U\rho/a) \cos \varphi & \rho \leq a \\ \bar{A} \frac{J_1(U)}{K_1(W)} K_1(W\rho/a) \cos \varphi & \rho > a \end{cases}$$

**HE<sub>11</sub>y**

$$\bar{E}_z = \begin{cases} -\bar{A} J_1(U\rho/a) \sin \varphi & \rho \leq a \\ -\bar{A} \frac{J_1(U)}{K_1(W)} K_1(W\rho/a) \sin \varphi & \rho > a \end{cases}$$

$$\bar{E}_x = \begin{cases} -jk_z \bar{A} \frac{a}{U} J_0(U\rho/a) & \rho \leq a \\ -jk_z \bar{A} \frac{a}{W} \frac{J_1(U)}{K_1(W)} K_0(W\rho/a) & \rho > a \end{cases}$$

$$\bar{E}_y = 0$$

$$\bar{E}_x = 0$$

$$\bar{E}_y = \begin{cases} jk_z \bar{A} \frac{a}{U} J_0(U\rho/a) & \rho \leq a \\ jk_z \bar{A} \frac{a}{W} \frac{J_1(U)}{K_1(W)} K_0(W\rho/a) & \rho > a \end{cases}$$

# Análise Modal (20)

47/76

**HE<sub>11</sub>x**

$$\bar{H}_z = \begin{cases} \frac{k_z}{\omega \mu_0} \bar{A} J_1(U\rho/a) \sin \varphi & \rho \leq a \\ \frac{k_z}{\omega \mu_0} \bar{A} \frac{J_1(U)}{K_1(W)} K_1(W\rho/a) \sin \varphi & \rho > a \end{cases}$$

**HE<sub>11</sub>y**

$$\bar{H}_z = \begin{cases} \frac{k_z}{\omega \mu_0} \bar{A} J_1(U\rho/a) \cos \varphi & \rho \leq a \\ \frac{k_z}{\omega \mu_0} \bar{A} \frac{J_1(U)}{K_1(W)} K_1(W\rho/a) \cos \varphi & \rho > a \end{cases}$$

$$\bar{H}_x = 0$$

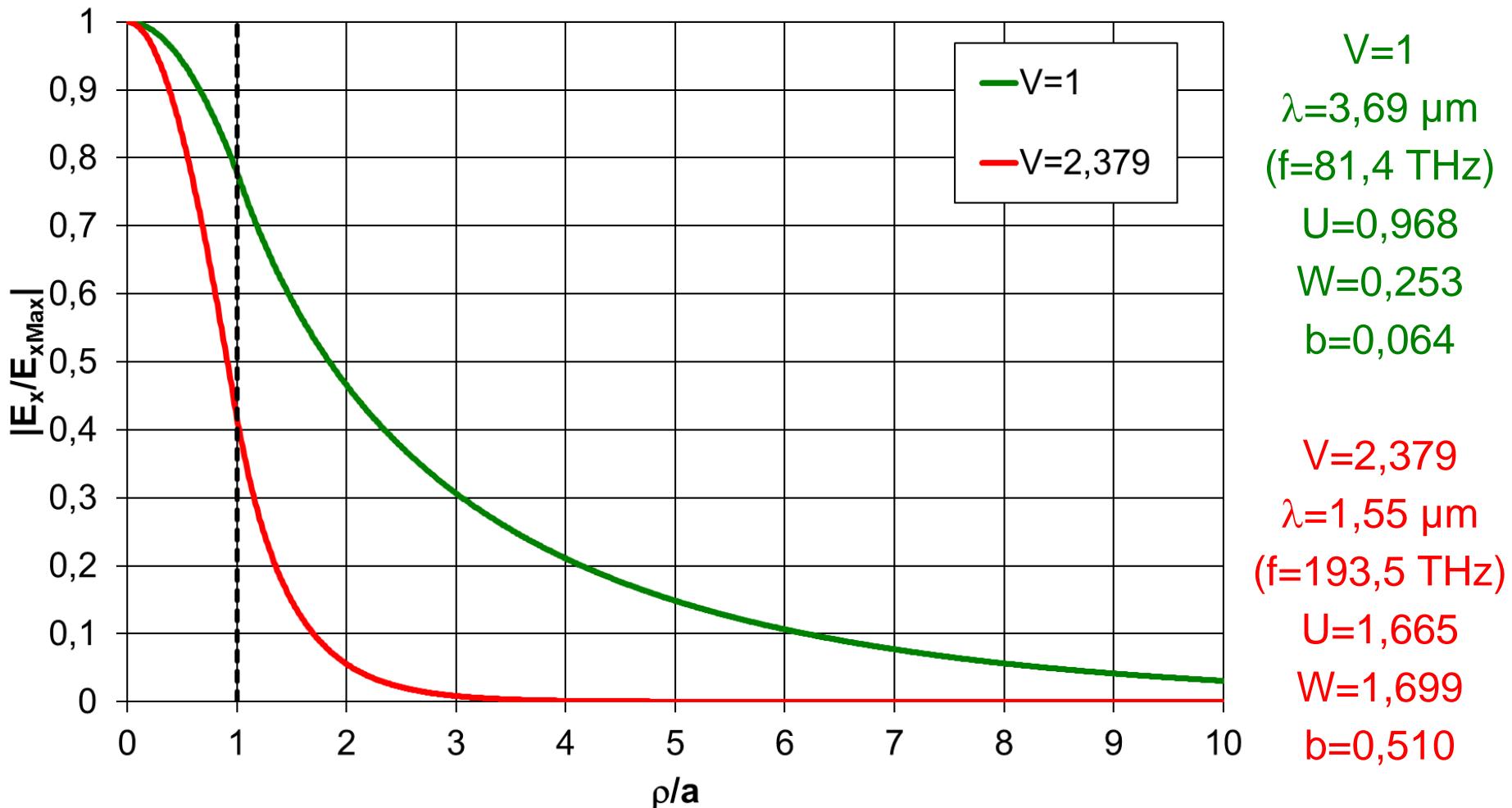
$$\bar{H}_x = \begin{cases} -j\omega \epsilon_0 \bar{A} n_1^2 \frac{a}{U} J_0(U\rho/a) & \rho \leq a \\ -j\omega \epsilon_0 \bar{A} n_2^2 \frac{a}{W} \frac{J_1(U)}{K_1(W)} K_0(W\rho/a) & \rho > a \end{cases}$$

$$\bar{H}_y = \begin{cases} -j\omega \epsilon_0 \bar{A} n_1^2 \frac{a}{U} J_0(U\rho/a) & \rho \leq a \\ -j\omega \epsilon_0 \bar{A} n_2^2 \frac{a}{W} \frac{J_1(U)}{K_1(W)} K_0(W\rho/a) & \rho > a \end{cases}$$

$$\bar{H}_y = 0$$

## Exemplo

$|E_x|$  para  $n_1=1,45$ ,  $n_2=1,42$  ( $\Delta=2\%$ ),  $a=2 \mu\text{m}$



## Densidade de Potência do Modo Fundamental ( $\text{HE}_{11}^x$ )

$$\langle S \rangle_z = \frac{1}{2} \operatorname{Re} (\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}^*) \cdot \hat{\mathbf{z}} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} (\bar{E}_x \bar{H}_y^* - \bar{E}_y \bar{H}_x^*)$$

$$\bar{E}_x = \begin{cases} -jk_z \bar{A} \frac{a}{U} J_0(U\rho/a) & \rho \leq a \\ -jk_z \bar{A} \frac{a}{W} \frac{J_1(U)}{K_1(W)} K_0(W\rho/a) & \rho > a \end{cases}$$

$$\bar{H}_y = \begin{cases} -j\omega \varepsilon_0 \bar{A} n_1^2 \frac{a}{U} J_0(U\rho/a) & \rho \leq a \\ -j\omega \varepsilon_0 \bar{A} n_2^2 \frac{a}{W} \frac{J_1(U)}{K_1(W)} K_0(W\rho/a) & \rho > a \end{cases}$$

$$\bar{E}_y = \bar{H}_x = 0$$

## Análise Modal (23)

50/76

$$\langle S \rangle_z = \frac{1}{2} k_z |\bar{A}|^2 \omega \epsilon_0 \begin{cases} n_1^2 \left( \frac{a}{U} \right)^2 J_0^2(U\rho/a) & \rho \leq a \\ n_2^2 \left( \frac{a}{W} \right)^2 \frac{J_1^2(U)}{K_1^2(W)} K_0^2(W\rho/a) & \rho > a \end{cases}$$

Usando a equação característica obtém-se

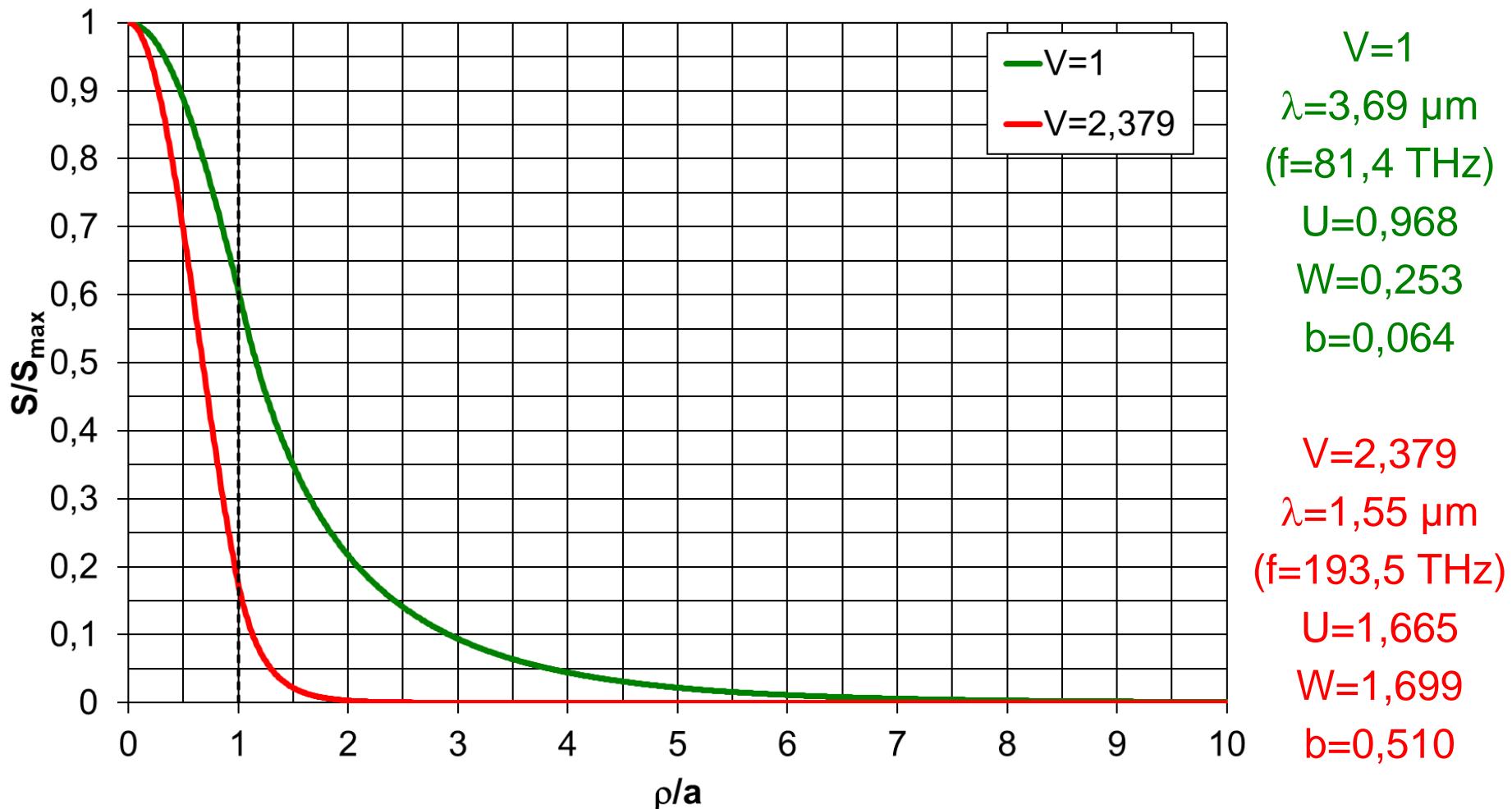
$$\frac{J_0(U)}{U J_1(U)} = \frac{K_0(W)}{W K_1(W)}$$

$$\langle S \rangle_z = S_{\max} \begin{cases} J_0^2(U\rho/a) & \rho \leq a \\ \left[ \frac{J_0(U)}{K_0(W)} \right]^2 K_0^2(W\rho/a) & \rho > a \end{cases}$$

$$S_{\max} = \frac{1}{2} k_z |\bar{A}|^2 \omega \epsilon_0 n_2^2 \left( \frac{a}{U} \right)^2$$

## Exemplo

$S$  para  $n_1=1,45$ ,  $n_2=1,42$  ( $\Delta=2\%$ ),  $a=2 \mu\text{m}$



# Análise Modal (25)

52/76

$$P_{\text{Núcleo}} = \int_0^{2\pi} \int_0^a \langle S \rangle_z \rho d\rho d\varphi$$

$$P_{\text{Bainha}} = \int_0^{2\pi} \int_a^{+\infty} \langle S \rangle_z \rho d\rho d\varphi$$

$$\int_0^a J_0^2(U\rho/a) \rho d\rho = \frac{a^2}{2} [J_0^2(U) + J_1^2(U)]$$
$$\int_a^{+\infty} K_0^2(W\rho/a) \rho d\rho = \frac{a^2}{2} [K_1^2(W) - K_0^2(W)]$$

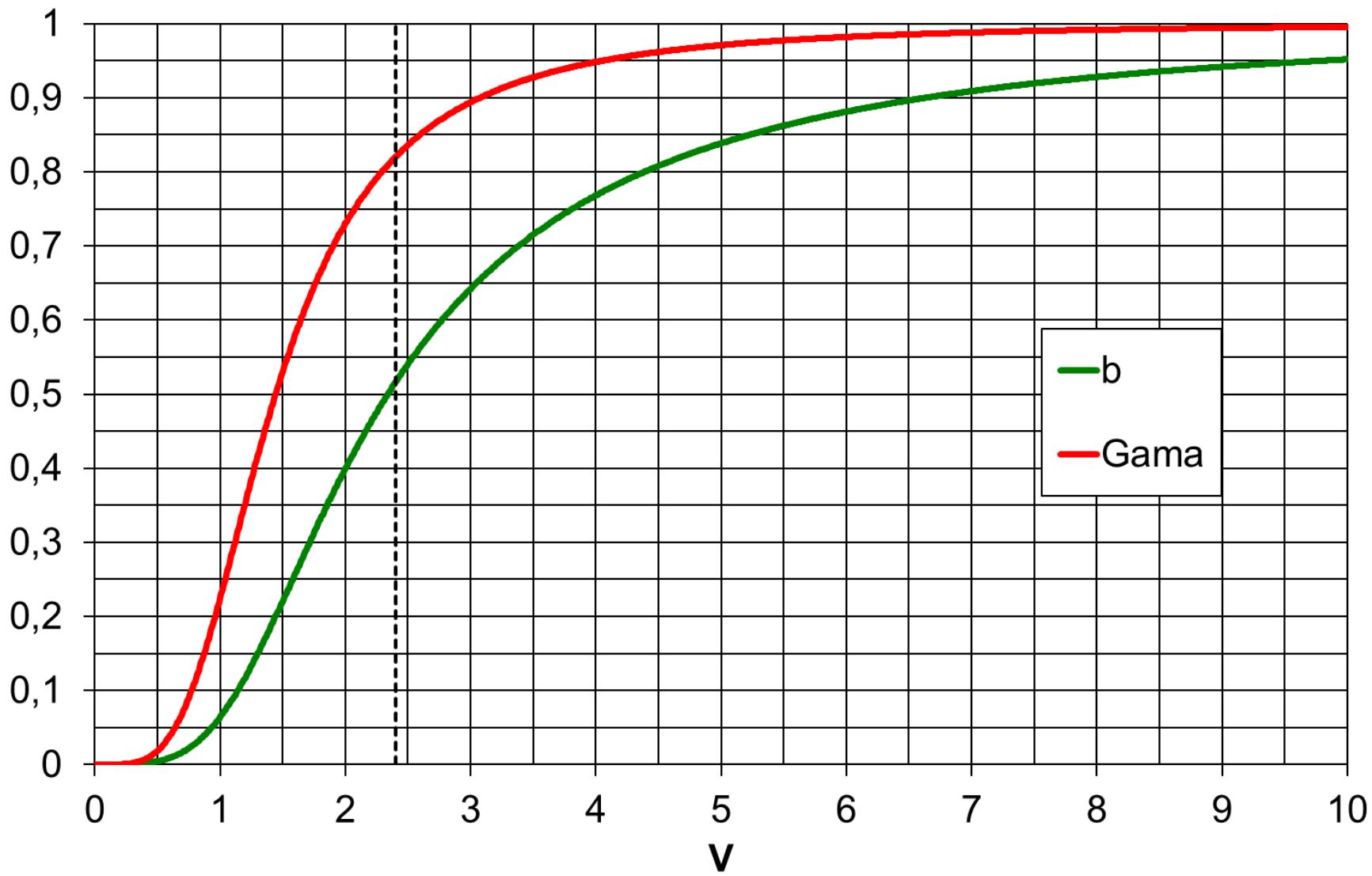
$$P_{\text{Núcleo}} = S_{\max} \pi a^2 J_0^2(U) \left[ 1 + \frac{J_1^2(U)}{J_0^2(U)} \right]$$

$$P = P_{\text{Núcleo}} + P_{\text{Bainha}}$$

$$P_{\text{Bainha}} = S_{\max} \pi a^2 J_0^2(U) \left[ \frac{K_1^2(W)}{K_0^2(W)} - 1 \right]$$

$$\Gamma = \frac{P_{\text{Núcleo}}}{P} = 1 - \frac{P_{\text{Bainha}}}{P} = 1 - \left( \frac{U}{V} \right)^2 \left\{ 1 - \left[ \frac{K_0(W)}{K_1(W)} \right]^2 \right\}$$

## Confinamento da Potência: Comparação com $b(V)$



# Dispersão (1)

54/76

A dispersão é o fenómeno físico que se dá nas fibras ópticas (tal como outros guias) e que provoca o alargamento dos impulsos transmitidos.

Este alargamento limita o ritmo de transmissão.

BL [bits.s<sup>-1</sup>.km] é uma figura de mérito de um sistema de telecomunicações que afere a sua capacidade de transmitir informação.

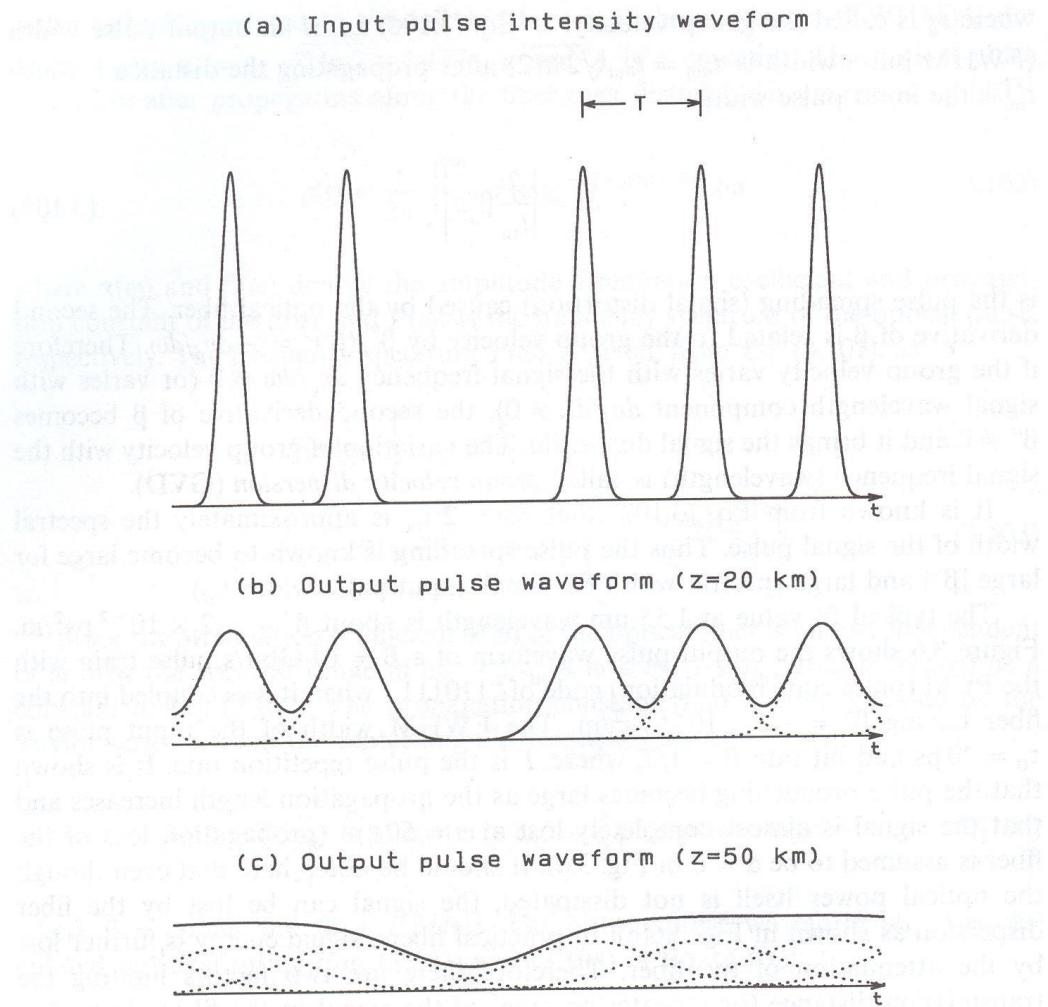


Figure 3.6: Several pulse waveforms with PCM code of "11011." (a) Input pulse waveform, (b) output pulse waveform after  $z = 20 \text{ km}$  of the fiber with  $\beta'' = -2 \times 10^{-2} \text{ ps}^2/\text{m}$ , and (c) output pulse after  $z = 50\text{-km}$  propagation.

Causada pela variação com a frequência da velocidade de grupo

Tradução: “scattering” $\rightarrow$  dispersão    “dispersion” $\rightarrow$  dispersão ??

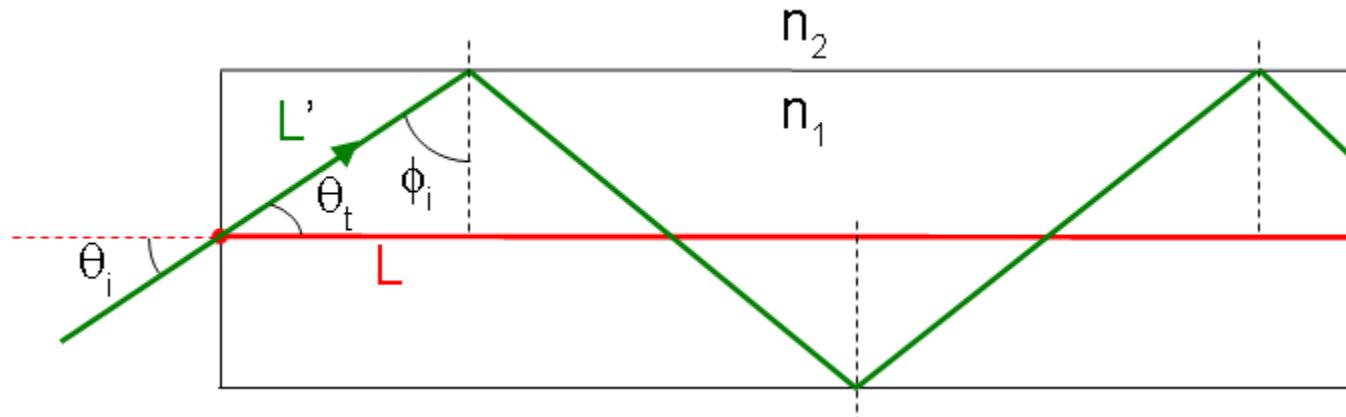
- Dispersão intermodal (só em regime multi-modal)  
Diferente modos viajam a diferentes velocidades (raios diferentes)
- Dispersão intramodal
  - Dispersão material  
O(s) índice(s) de refracção depende(m) da frequência
  - Dispersão estrutural  
Para cada modo  $V_g(\omega)$  (solução da equação característica depende da frequência)

Designa-se por “dispersão cromática” a soma das dispersões material e estrutural.

# Dispersão (3)

56/76

## Dispersão Intermodal



$$\cos \theta_{t\text{Max}} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{t\text{Max}}} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_{i\text{Max}}}{n_1^2}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{página 19})$$

**Raio axial**  $t_{\min} = \frac{L_{\min}}{c_0/n_1} = \frac{L}{c_0} n_1$

**Raio meridional extremo**  $t_{\max} = \frac{L_{\max}}{c_0/n_1} = \frac{L(\theta_{i\text{Max}})}{c_0/n_1} = \frac{L/\cos \theta_{t\text{Max}}}{c_0/n_1} = \frac{L}{c_0} \frac{n_1^2}{n_2}$

$$\Delta t = t_{\max} - t_{\min} = \frac{L}{c_0} \frac{n_1^2}{n_2} - \frac{L}{c_0} n_1 \approx \frac{L}{c_0} n_1 \Delta \quad \Delta \ll 1$$

Admitindo um atraso que pode chegar até metade do período

$$\Delta t \leq \frac{T}{2} = \frac{1}{2B} \Rightarrow BL \leq \frac{c_0}{2n_1 \Delta}$$

### Exemplo

$$n_1 = 1,45$$

$$\Delta = 1\%$$

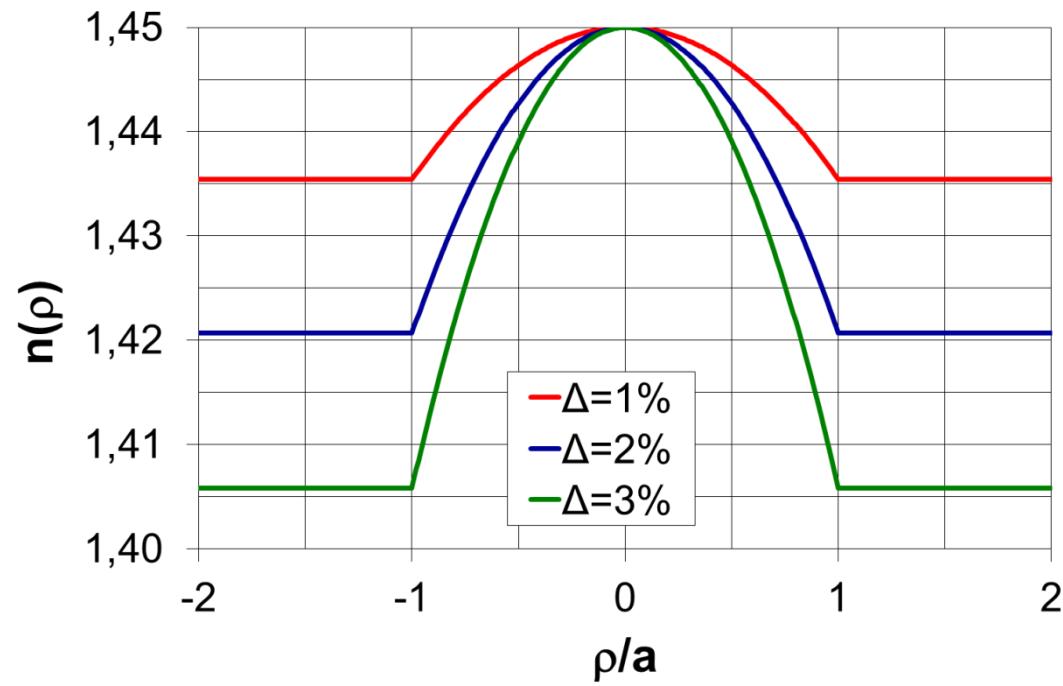
$$BL_{Max} = 10,3 \text{ Mbit.s}^{-1}.\text{km}$$

Os raios enviesados (não considerados na análise), com trajectórias helicoidais, provocam atrasos ainda maiores.

A dispersão intermodal é a mais limitativa nas fibras multimodais. Para reduzir a dispersão:

- Usam-se fibras monomodais
- Usam-se fibras de índice de refracção variável. A velocidade de grupo aumenta com o aumento de  $\rho$  porque o índice de refracção diminui com o aumento de  $\rho$ .

## Perfil parabólico (ver página 20)



$$n(\rho) = \begin{cases} n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left( \frac{\rho}{a} \right)^2} & \rho \leq a \\ n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} & \rho \geq a \end{cases}$$

$$\Delta t = \frac{L n_1}{c_0} \frac{\Delta^2}{2}$$

$$BL \leq \frac{c_0}{n_1 \Delta^2}$$

## Exemplo

$$n_1 = 1,45$$

$$\Delta = 1\%$$

$$BL_{Max} = 2,1 \text{ Gbit.s}^{-1}.\text{km}$$

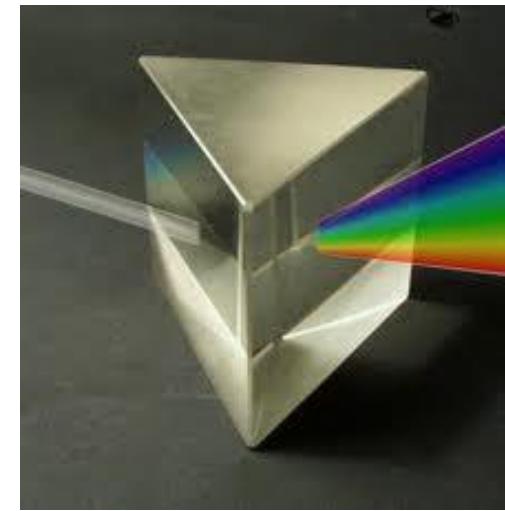
## Dispersão Material

Resulta do alargamento dos impulsos causado pela variação do índice de refracção do núcleo com a frequência.

$$\Delta t = L |M_m| \Delta \lambda \quad \Delta t \leq \frac{T}{2} = \frac{1}{2B} \Rightarrow BL \leq \frac{1}{2|M_m| \Delta \lambda}$$

$M_m$  – Coeficiente de dispersão material

$\Delta\lambda$  - Largura espectral da fonte



Nos guias monomodais esta (dispersão material) é normalmente a mais importante.

## Exemplo

$$M_m(\lambda=1,55 \mu m) = 25 \text{ ps}.\text{nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$$

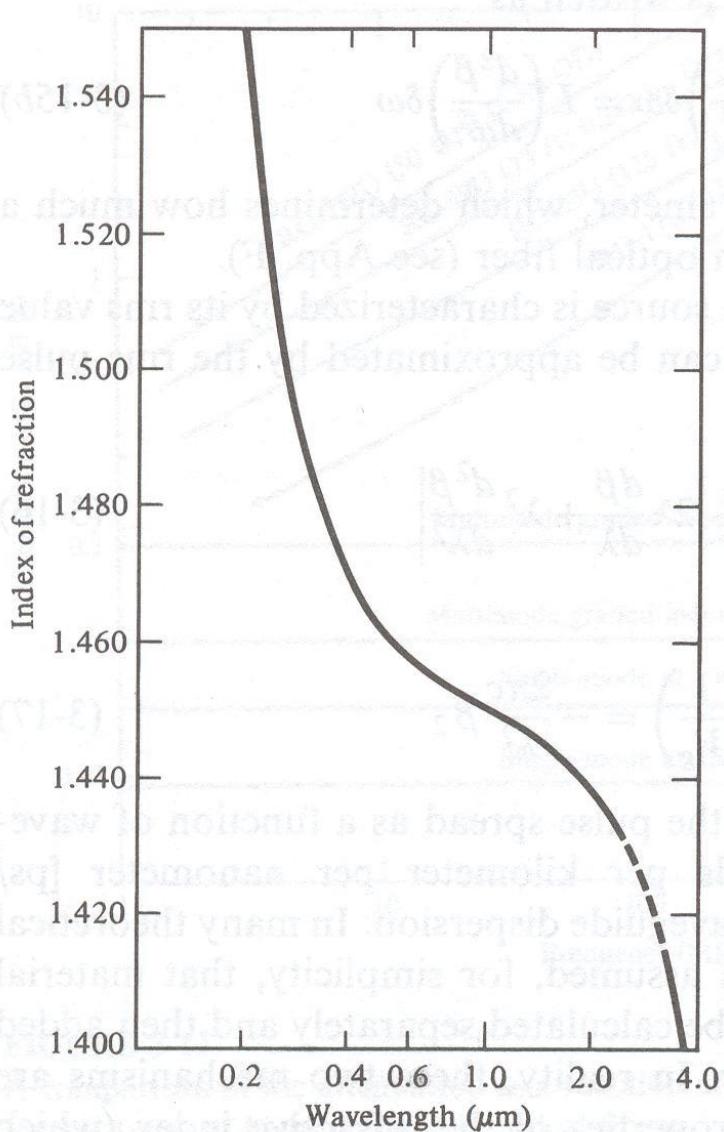
$$\Delta\lambda = 50 \text{ nm (LED)}$$

$$BL_{Max} = 400 \text{ Mbit.s}^{-1}.\text{km}$$

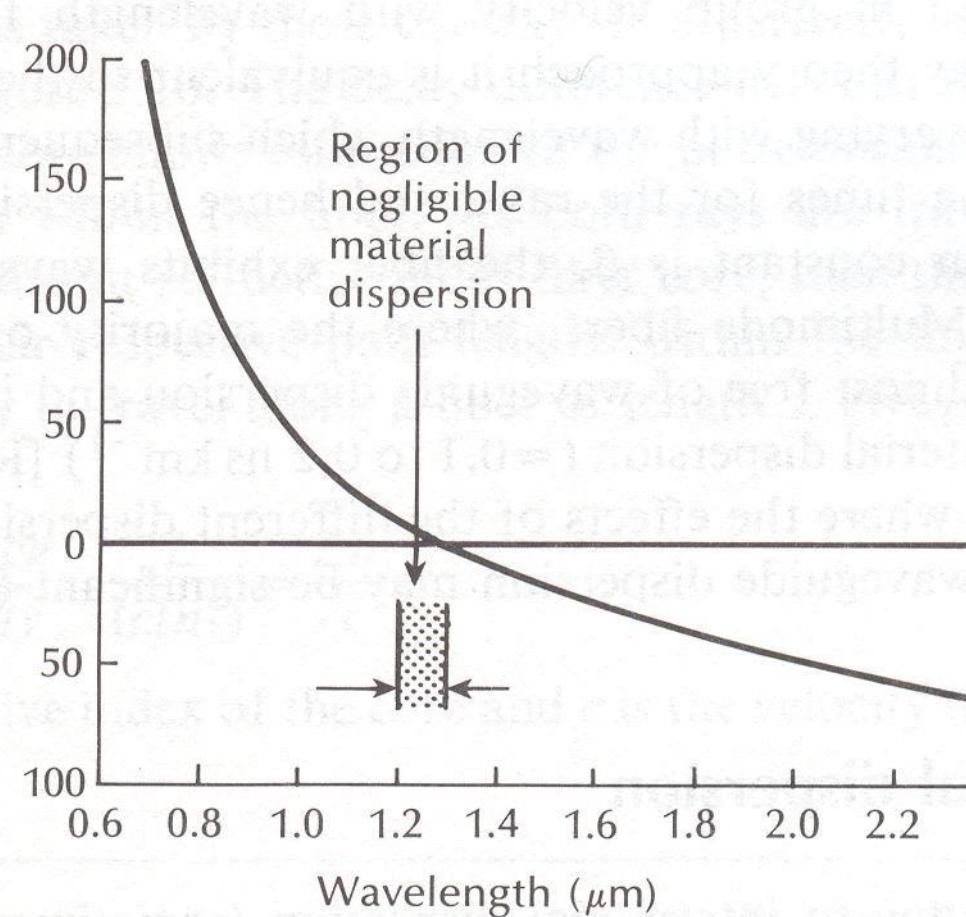
# Dispersão (7)

60/76

$n(\lambda)$  da sílica



$M_m [\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}]$  da sílica



## Dispersão Estrutural

É causada pela dependência com a frequência ( $\lambda$ ) das constantes de propagação (núcleo e bainha). É intrínseca dos guias de ondas (excepto modos TEM).

Normalmente só é relevante em fibras monomodo que usam valores de  $\lambda$  onde o coeficiente de dispersão material de aproxima de zero.

$$\Delta t = L |M_e| \Delta \lambda \quad M_e = -\frac{n_2 \Delta}{c_0 \lambda_0} V \frac{d^2(bV)}{dV^2} \quad BL \leq \frac{1}{2|M_e| \Delta \lambda}$$

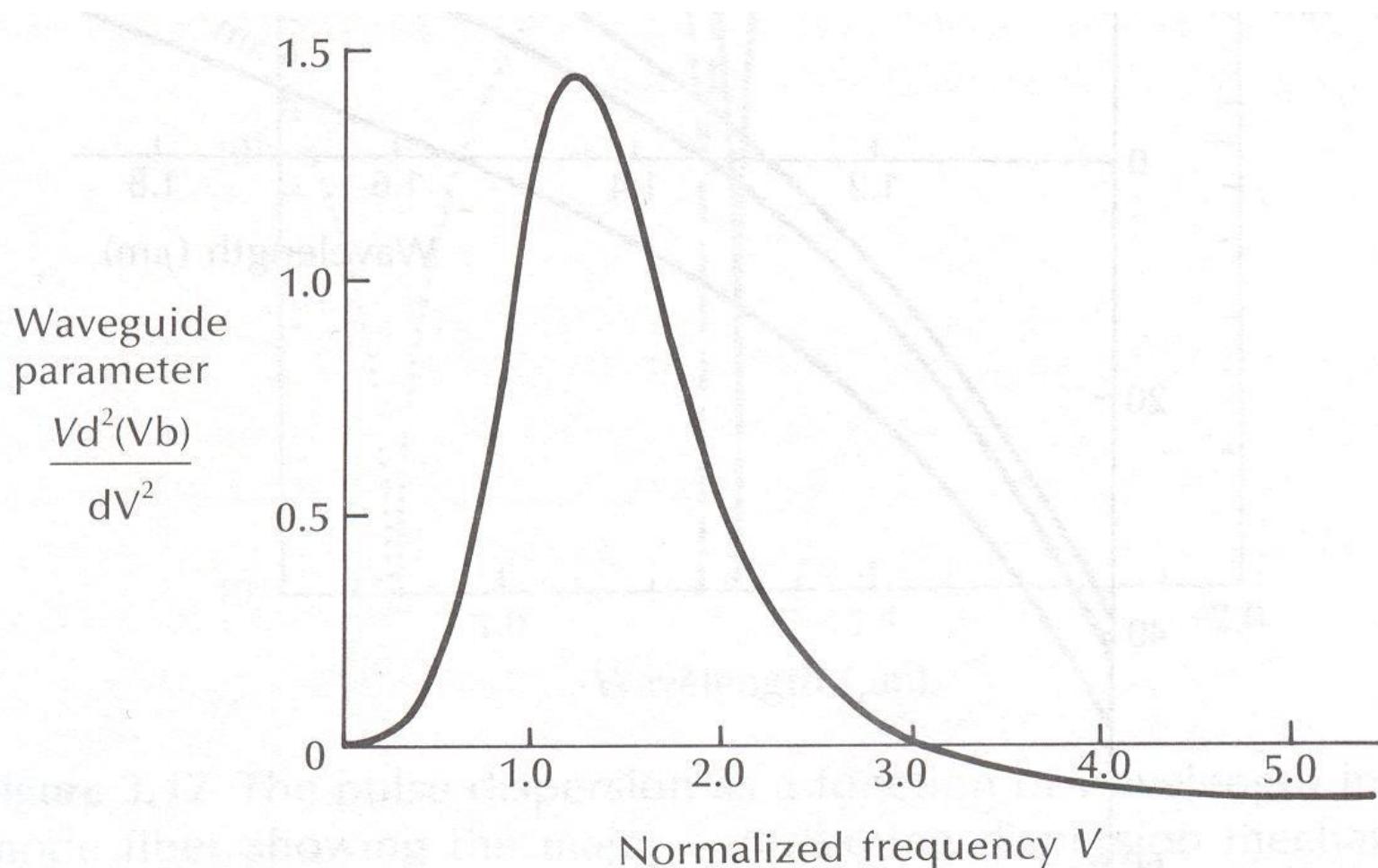
## Exemplo

$$n_1=1,45, \Delta=1\%, \lambda=1,55 \text{ } \mu\text{m}, a=2,8 \text{ } \mu\text{m}, V=2,33$$

$$M_e = 7 \text{ ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1} \quad \Delta \lambda = 50 \text{ nm (LED)}$$

$$BL_{Max} = 1,4 \text{ Gbit.s}^{-1}.\text{km}$$

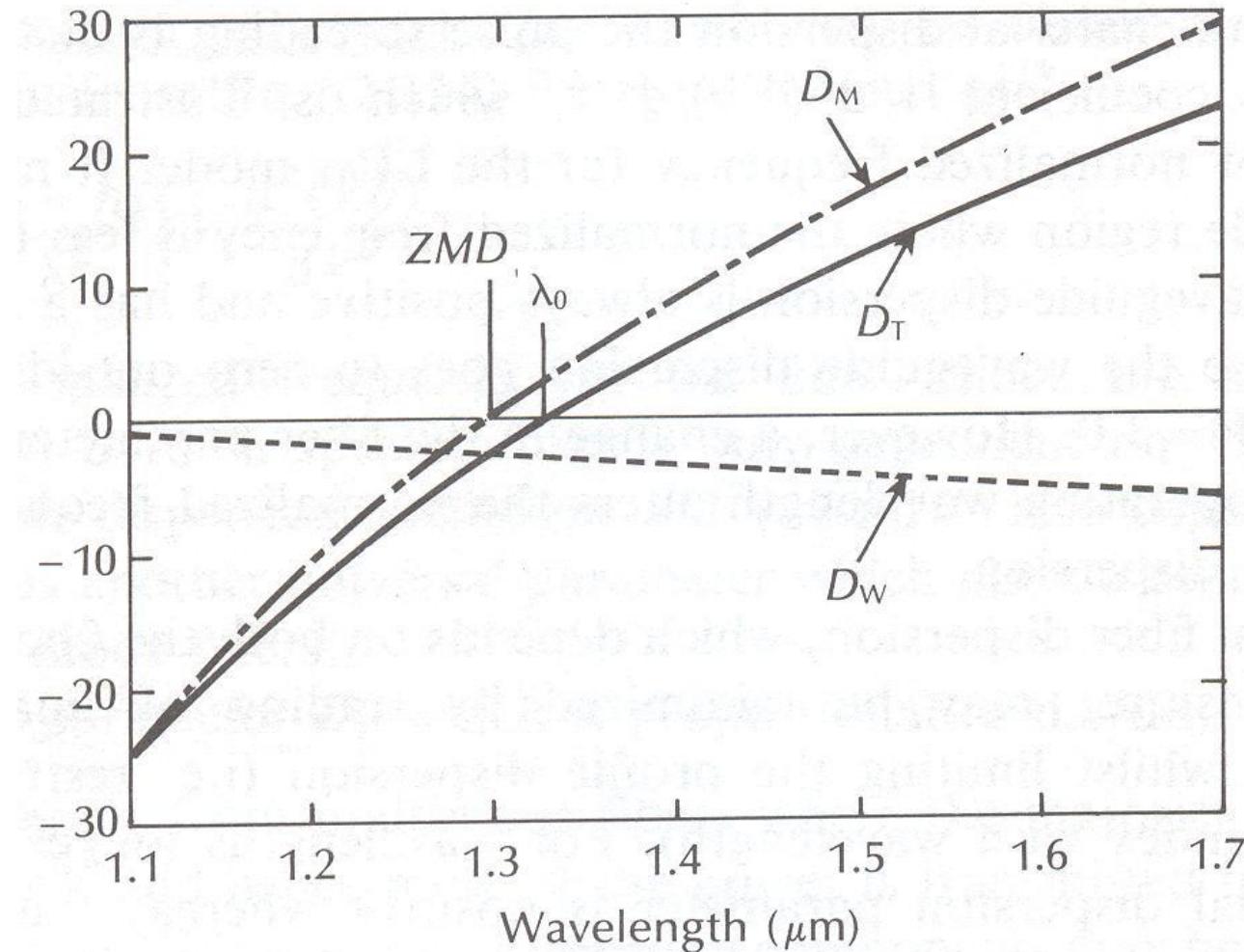
## Modo LP<sub>01</sub> (Fibra monomodal convencional)



# Dispersão (10)

63/76

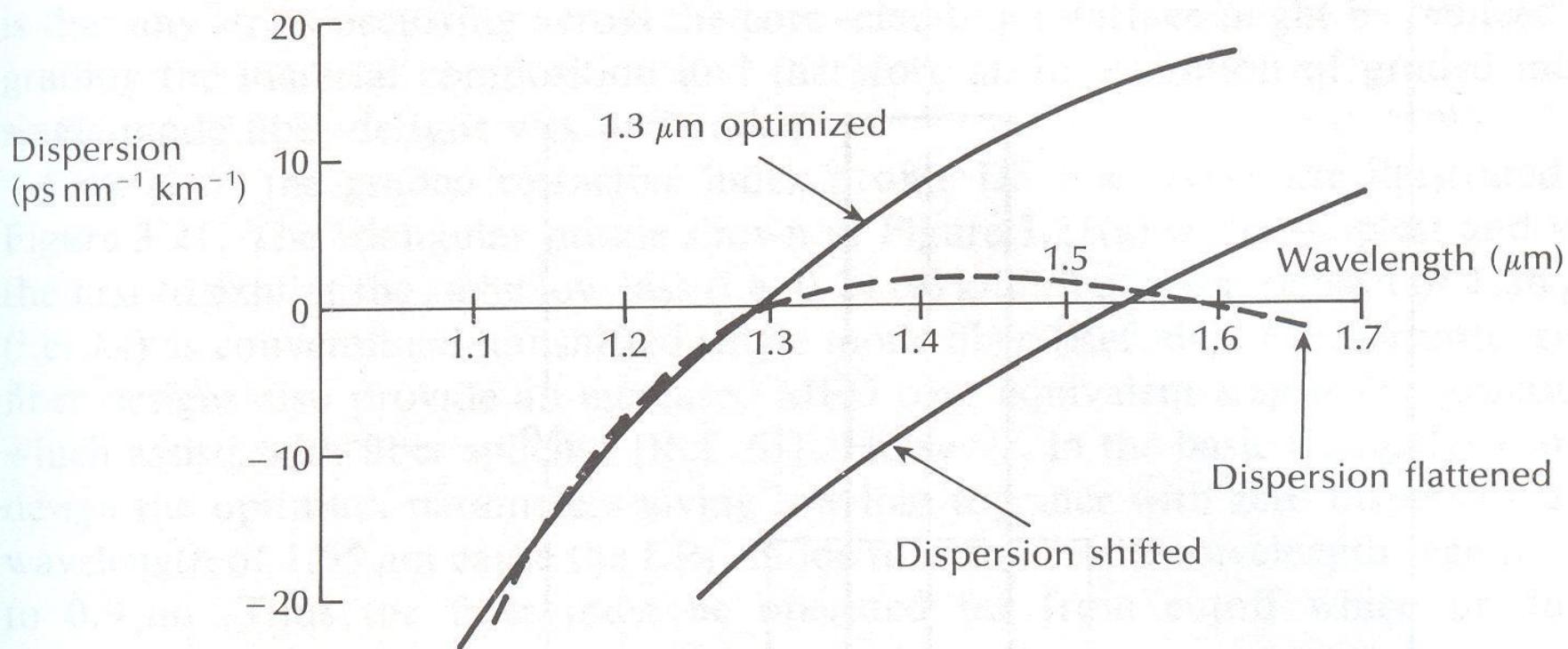
$$M_T = M_m + M_e \text{ [ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}\text{]} \text{ (Fibra monomodal convencional)}$$



## Dispersão (11)

64/76

Em fibras monomodais pode-se alterar o comportamento dispersivo (escolha adequada do raio do núcleo e do contraste) por forma a conseguir dispersão cromática nula na zona de atenuação mínima ( $\lambda=1,55 \mu\text{m}$ )

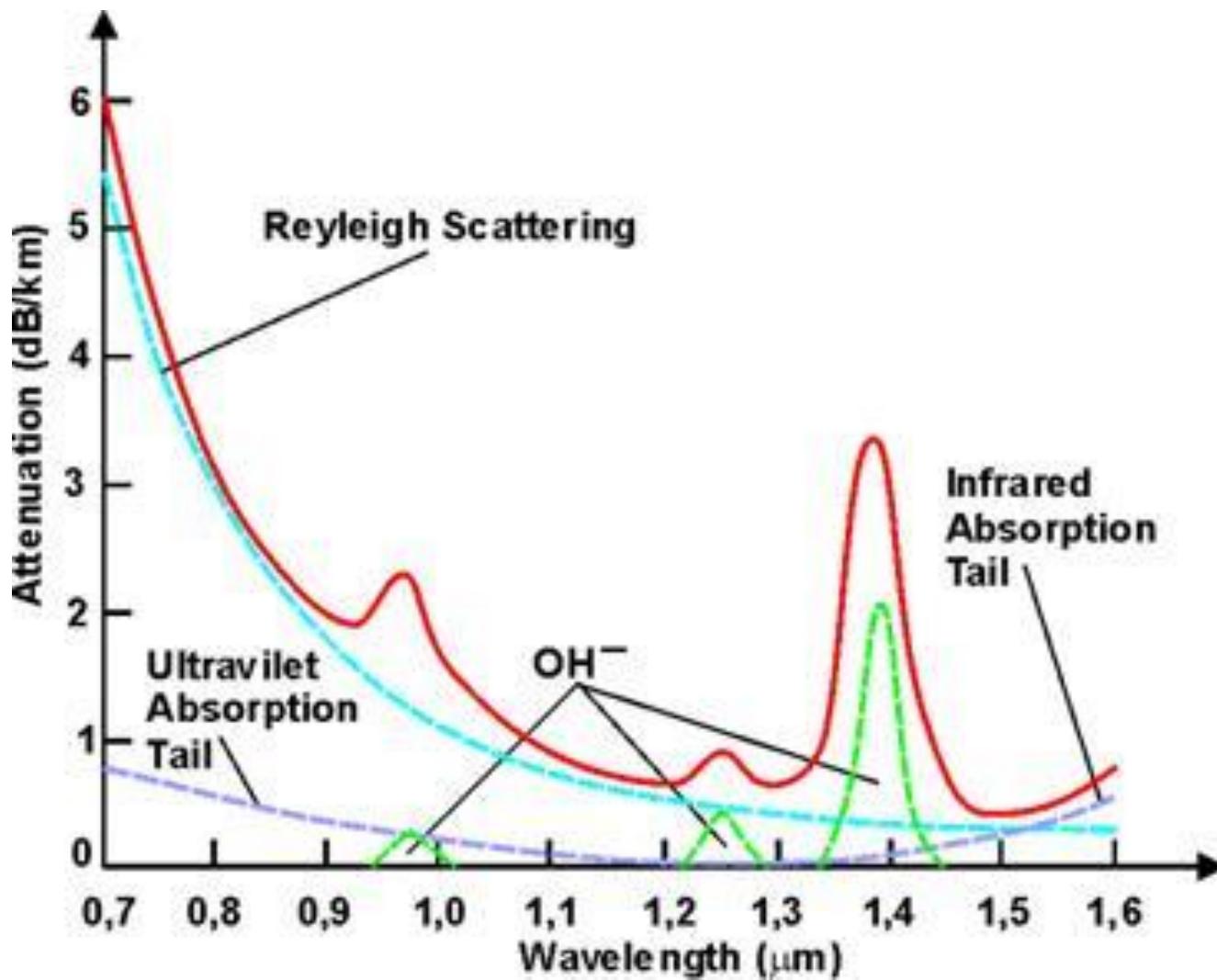


## Mecanismos da atenuação

- Dispersão (“scattering”)
  - Não homogeneidade microscópica (dispersão de Rayleigh)  $\alpha \propto \frac{1}{\lambda^4}$
  - Defeitos de fabrico
- Absorção
  - Intrínseca da sílica
  - Causada pelas impurezas (iões OH)
- Radiação
  - Perturbações (microscópicas e macroscópicas) da geometria

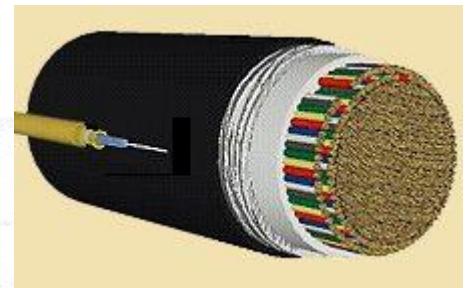
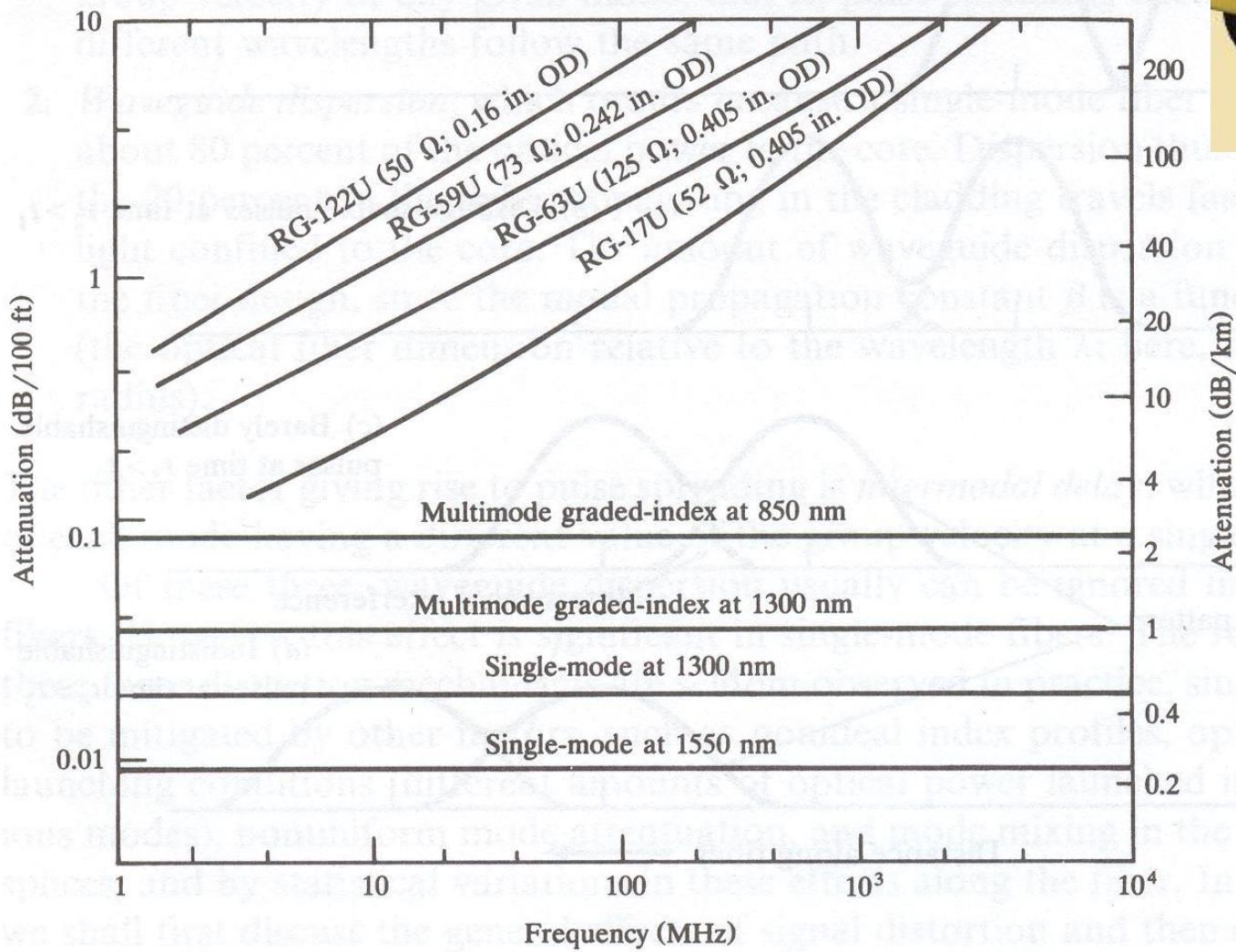
## Atenuação (2)

66/76



# Atenuação (3)

67/76



## Atenuação versus Dispersão

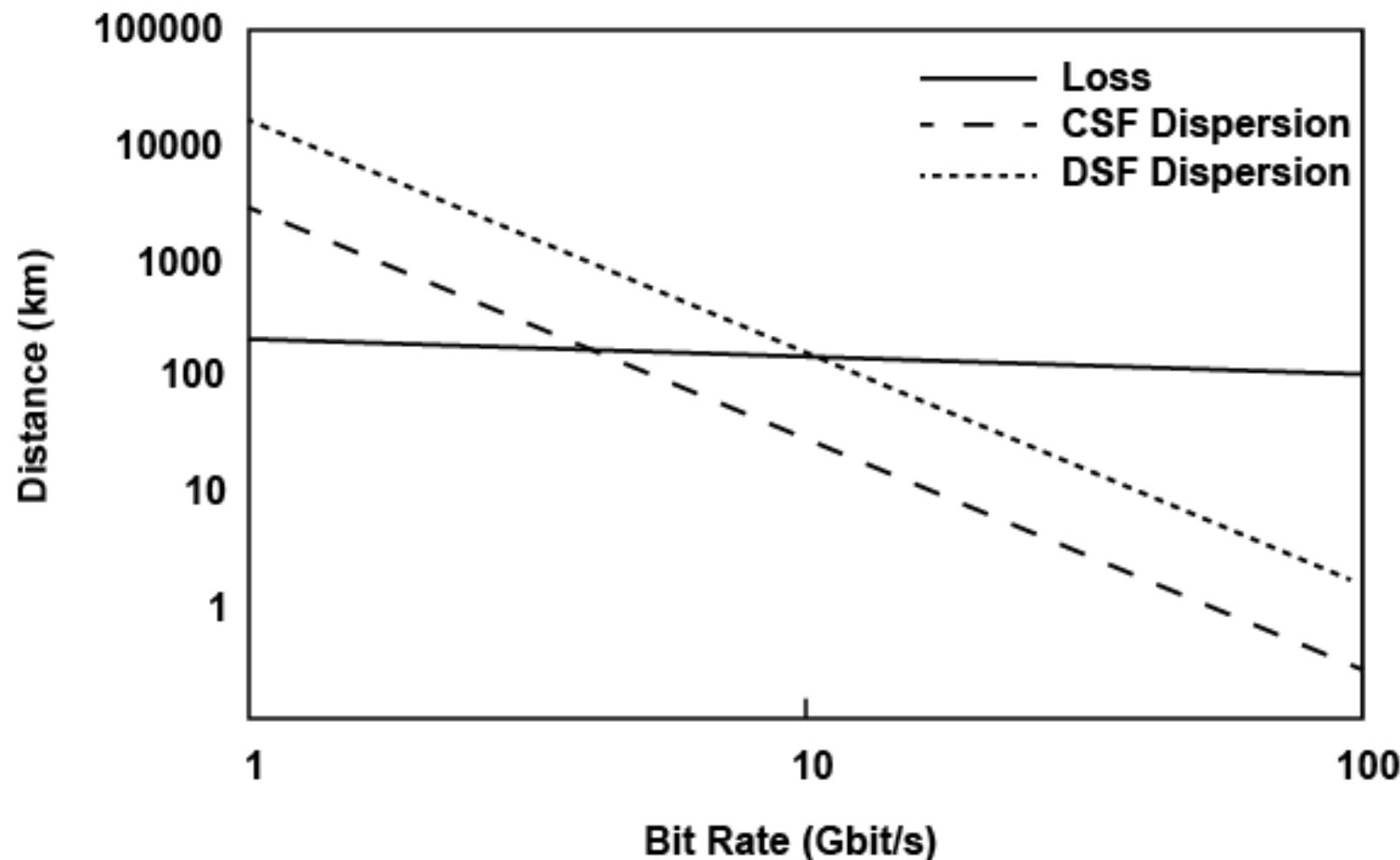
A atenuação provoca a diminuição do sinal       $P(z) = P(0)e^{-2\alpha z}$

A diminuição da potência ótica recebida aumenta a probabilidade de erro.  
A atenuação limita portanto a distância máxima entre repetidores.

A dispersão limita o ritmo máximo de transmissão e (indirectamente através de BL) a distância máxima (sem regeneração).

- Para ritmos de transmissão baixos é a atenuação que impõe a distância máxima
- Para ritmos de transmissão elevados é a dispersão que impõe a distância máxima

Exemplo (Fibra monomodal,  $\lambda=1,55 \mu\text{m}$ , BER=10<sup>-9</sup>)



## Fontes

Transformam o sinal eléctrico num sinal luminoso.

Há dois tipos de fontes de luz utilizadas nas fibras ópticas:

- LED (Light-Emitting Diode)
- LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)



Os LASERs têm maior pureza espectral ( $\Delta\lambda < 5 \text{ nm}$ ), maior potência luminosa (até cerca de 20 dBm) mas são mais caros que os LEDs.

Os LEDs tem menor pureza espectral ( $\Delta\lambda \in [30;150] \text{ nm}$ ), menor potência luminosa (< -10 dBm) mas são mais baratos que os LASERs.

Os LEDs só são usados até ritmos de transmissão da ordem de dezenas de  $\text{MBit.s}^{-1}$ .

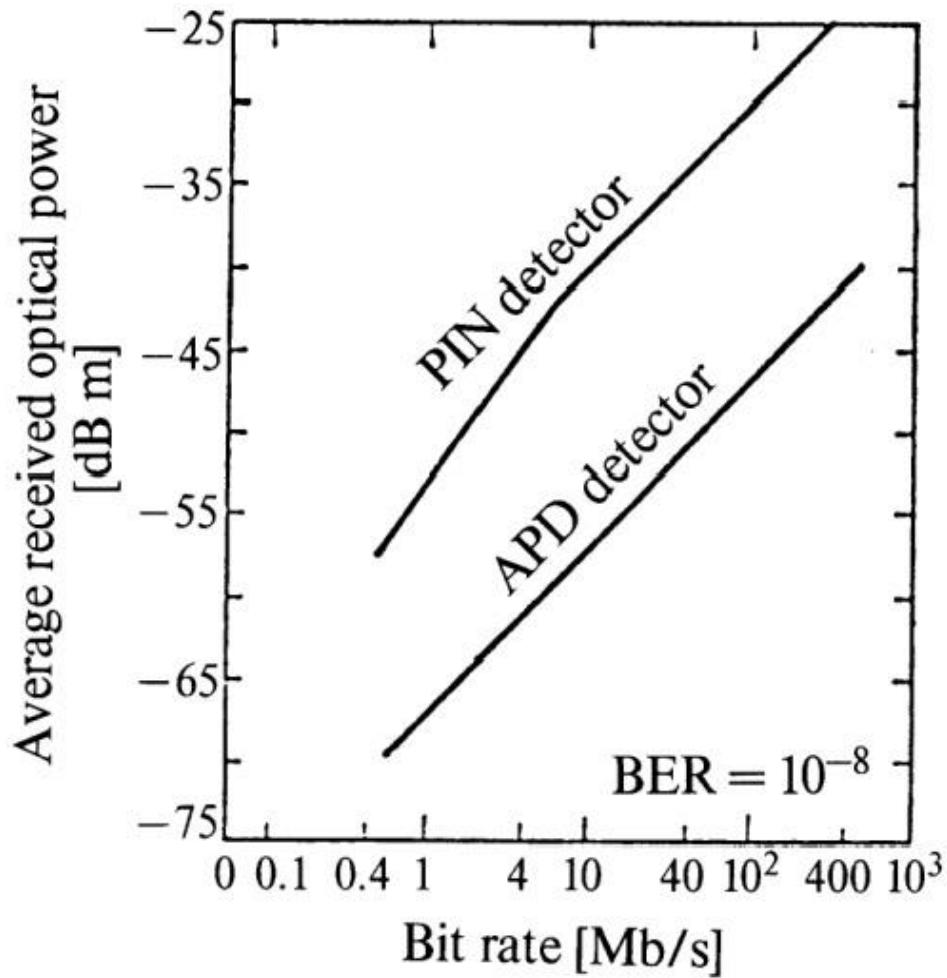
## Detectores

Transformam o sinal luminoso num sinal eléctrico.

Os detectores mais comuns são:

- Foto díodo PIN
- Foto díodo de Avalanche

Os foto diodos de avalanche são mais sensíveis (entre 5 e 15 dB), mas são mais caros.



## Outros Componentes (Activos e Passivos)

Há muitos tipos de componentes usados nos sistemas de comunicações óticas:

- Amplificadores

Uma das razões de sucesso das comunicações óticas está ligada ao aparecimento de amplificadores **óticos** de grande desempenho (“Erbium Doped Fiber Amplifier” (EDFA)).

- Multiplexeres
- Acopladores
- Filtros
- Isoladores (Circuladores)
- Polarizadores, etc.

Têm particular importâncias os componentes de **óptica integrada**.

## Exemplos de Componentes Óticos (Activos e Passivos)

 Opto-Link Corporation Limited

HOME PRODUCTS SERVICES NEWS PROFILE CONTACT

**All Component**

- [Beam Combiner](#)
- [Circulator](#)
- [Collimator](#)
- [Coupler / Splitter](#)
- [CWDM / DWDM](#)
- [Faraday Mirror](#)
- [Isolator](#)
- [Optical Switch](#)
- [Patchcord](#)
- [Polarizer](#)
- [WDM](#)

**Features**

- 1064 nm/1310 nm/1550 nm windows
- High Power (up to 1000mW)
- High Stability and reliability
- High Isolation
- High Return Loss
- Low Insertion Loss
- Low Polarization Dependent Loss (PDL)
- Low Polarization Mode Dispersion (PMD)

**Applications**

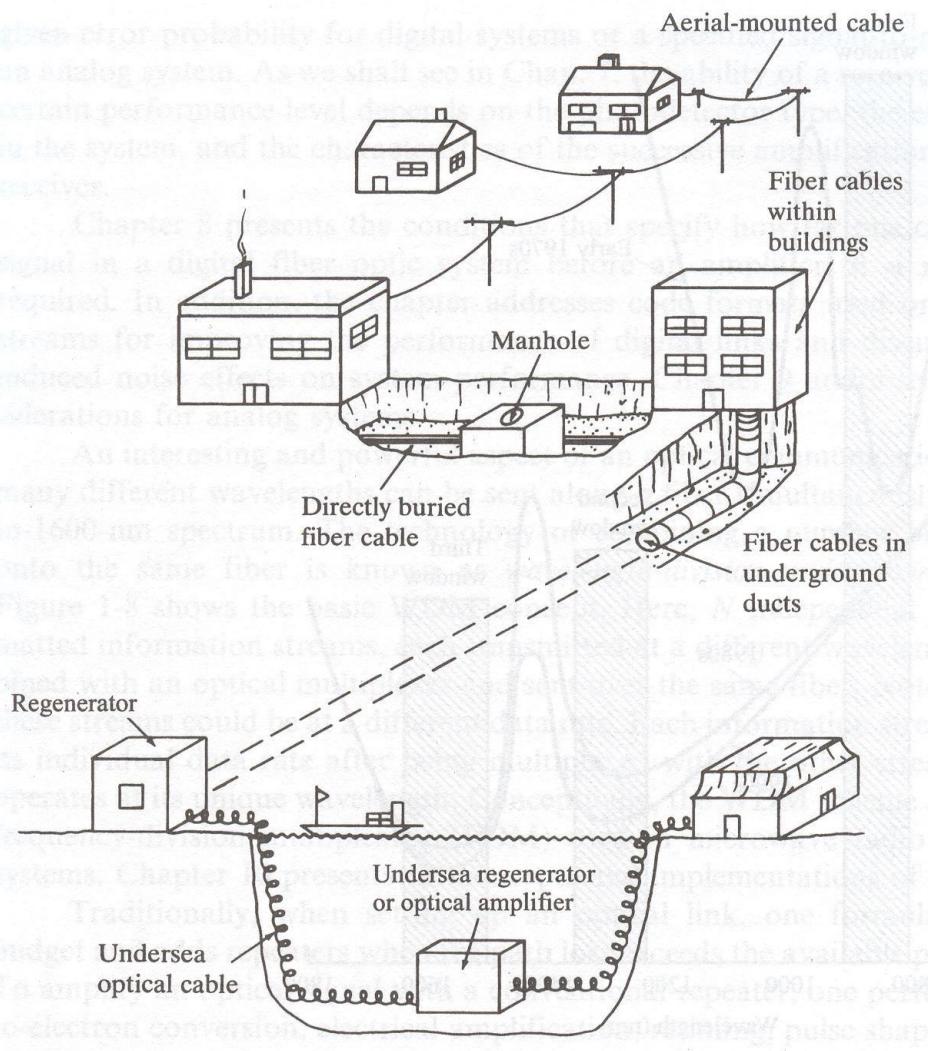
- WDM systems
- OTDR applications
- Dispersion Compensation
- Sensor applications
- Optical amplifiers

Features & Applications  
Specifications  
Products Summary Table  
Ordering Codes

 PDF file

A principal aplicação das fibras ópticas é em redes de comunicações

- Redes Intercontinentais
- Redes Internacionais
- Redes Nacionais
- Redes Locais
- “Fibra até casa do utilizador”



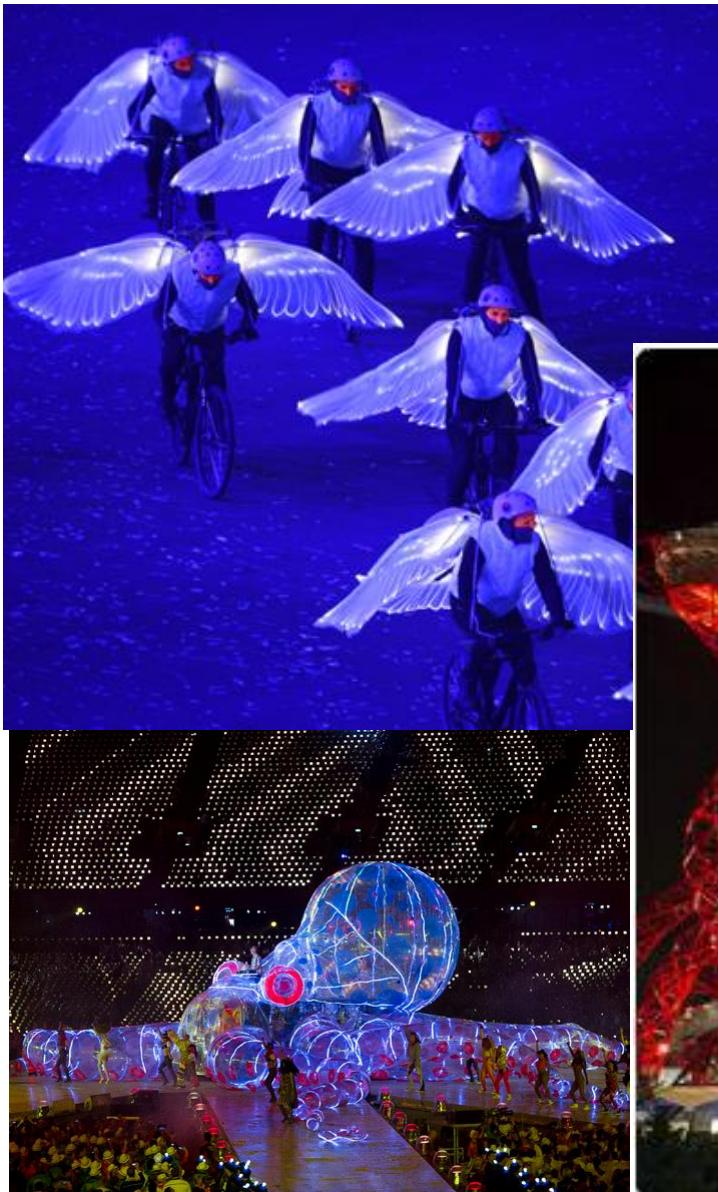
## Outras aplicações de fibras óticas

- Sensores
  - Pressão
  - Temperatura
  - Humidade
  - Deslocamento, etc.
- Medicina (sobretudo endoscopia)
- Industria automóvel
- Iluminação/Decoração



# Aplicações (3)

76/76



**Fibras Óticas (de Plástico) Usadas na Iluminação/Decoração nos Jogos Olímpicos de Londres (2012)**

