

Capítulo 2

1. FUNDAMENTOS E CONCEITOS BÁSICOS DAS FIBRAS ÓPTICAS

2.1 Propagação de Radiações Ópticas

2.1.1 Definições

- Raio incidente: conforme observa-se na Fig.2.1, a radiação que se aproxima da superfície S é o raio incidente.
- Raio refletido: raio incidente, ao atingir a superfície S, poderá refletir, e esta radiação refletida chama-se raio refletido.
- Raio refratado: O raio incidente, ao invés de refletir na superfície S, poderá ultrapassar esta superfície de separação entre os meios 1 e 2. O raio que penetra no meio 2 chama-se raio refratado. Sendo oblíqua a incidência, a refração é acompanhada de mudança de direção, Fig.2.2, o que não ocorre se a incidência for perpendicular à superfície de separação, Fig.2.3.

Observe na Fig. 2.3 que , ao passar do ar para a água, o raio luminoso aproximou-se da normal, passando a formar com essa um ângulo menor que aquele que formava no ar. Como na água a velocidade da luz é menor do que no ar, verifica-se que na refração com incidência oblíqua, o ângulo formado com a normal acompanha a direção de velocidade da radiação.

Assim, a refração pode ser entendida como a variação de velocidade sofrida pela radiação ao mudar de meio.

- **Refrigência:** Para indicar entre dois meios aquele que tem maior ou menor índice de refração. Assim, o meio que tem maior índice de refração é o que apresenta maior refrigência.

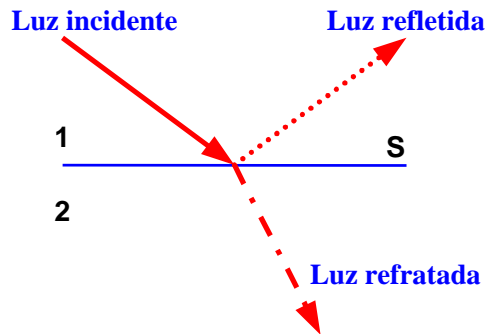


Figura 2.1 Raio incidente, refratado e refletido

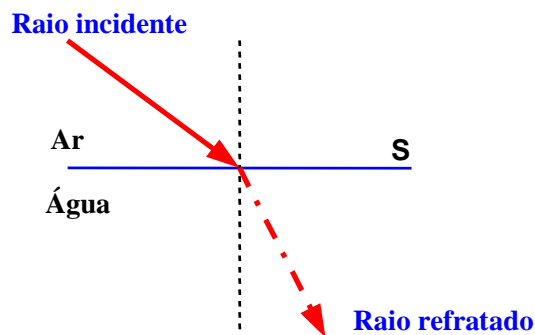


Figura 2.2 - Ao penetrar na água, o raio refratado aproxima-se da normal ($n_{\text{água}} > n_{\text{ar}}$)

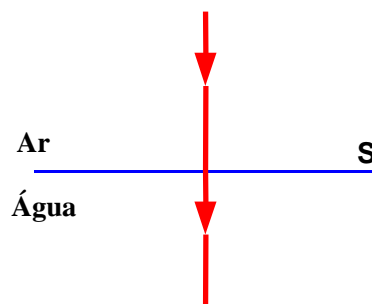


Figura 2.3 - Quando o raio incidente é perpendicular à superfície de separação, o mesmo não sofre mudança de direção

2.1.2 Índice de Refração

A medida óptica mais importante para qualquer material transparente é o seu índice de refração (n). O índice de refração de um meio qualquer é definido pela relação entre a velocidade da luz no vácuo (c_v) e a velocidade da luz no meio (c_{meio}).

$$n = \frac{c_v}{c_{meio}}, \quad \text{Eq. 2.1}$$

o qual é adimensional e maior que a unidade, para qualquer meio material ($c_v > c_{meio}$ implica $n > 1$). A velocidade da luz (c_v) no vácuo é constante e aproximadamente igual a 300.000 Km/h. Porém em outros meios sólidos ou líquidos, a luz se propaga com velocidade inferior. Desta forma, meios dielétricos mais densos correspondem a velocidades de propagação da luz menores e vice-versa. A Tabela 2.1 apresenta diversos meios com os índices de refração respectivos.

<i>Dielétrico</i>	<i>Índice de refração (n)</i>
<i>Ar</i>	1,0
<i>Água</i>	1,33
<i>Álcool etílico</i>	1,36
<i>Quartzo fundido</i>	1,46
<i>Vidro</i>	1,5 – 1,9
<i>Diamante</i>	2,42

Tabela 2.1 Índices de refração de alguns dielétricos

2.1.3 Leis da Refração

Existem duas lei que regem a refração:

- 1ª Lei: O raio incidente (I), o raio refratado (R) e a normal (N), pertencem ao mesmo plano.

- 2ª Lei (Lei de *SNELL*): Para cada meio e para o raio de incidência ou refratado, é constante o produto do seno do ângulo de incidência ou do ângulo de refração e o índice de refração do meio em que este raio se encontra, ou seja:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \quad \text{Eq. 2.2}$$

A Lei *Snell* diz que, há uma razão constante entre o seno o ângulo de incidência (i) e o seno o ângulo de refração (r). A partir desta lei, chega-se a uma conclusão muito importante que permitirá o entendimento da propagação da luz na fibra óptica.

Considerando a Fig. 2.4a, o raio ao passar de um meio de índice de refração n_1 para um meio de índice de refração n_2 , sendo $n_1 > n_2$, o raio refratado se afasta da normal. Aumentando o ângulo de incidência i , o ângulo de refração r se aproxima de 90° . O ângulo de incidência que produz um ângulo de refração de 90° , é chamado de **ângulo crítico** (α_c), Fig. 2.4b. E para um ângulo de incidência maior que o ângulo crítico, o raio volta totalmente para o meio 1, ocorrendo o fenômeno chamado reflexão total. Os ângulos de incidência e de reflexão são iguais, Fig. 2.4c.

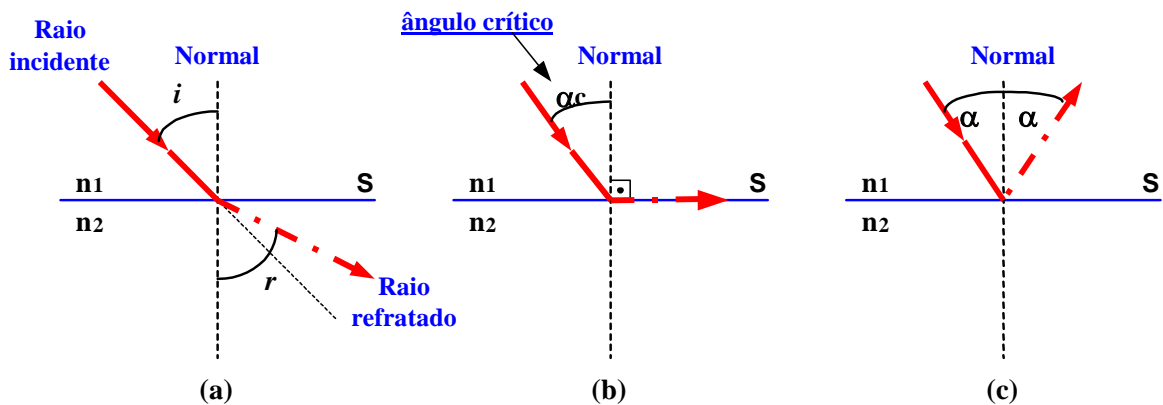


Figura 2.4 – incidência de um raio entre 2 meios, sendo $n_1 > n_2$.

O ângulo crítico (α_c), pode ser deduzido pela lei de Snell como:

$$\alpha_c = \arcsen \frac{n_2}{n_1} . \quad \text{Eq. 2.3}$$

que é importante salientar que para ocorrer reflexão total é necessário que duas condições sejam satisfeitas, o ângulo de incidência deve ser maior que o ângulo crítico ($\alpha > \alpha_c$), e o sentido de propagação da luz deve ser o meio de índice de refração n_1 para o meio de índice de refração n_2 , sendo $n_1 > n_2$ obrigatoriamente. Assim, a reflexão total é o princípio básico a luz se propagar na fibra óptica.

É importante observar que para ocorrer a situação de reflexão total devem existir duas situações obrigatoriamente:

- O raio de luz deve ir do meio mais denso para o menos denso
- O ângulo de incidência deve ser maior que o ângulo crítico.

2.1.4 Propagação da Luz e Reflexão Interna em Fibras Ópticas

Para compreendermos como a luz é propagada na fibra óptica, ou como a luz é guiada, suponhamos a seguinte situação: duas camadas de vidro sobrepostas, como a Fig. 2.5. A camada 1 possui índice de refração $n_1 = 1,5$ e a outra, camada $n_2 = 1,46$. Através da lei de Snell, podemos calcular o ângulo crítico α_c que fica:

$$\begin{aligned}\alpha_c &= \arcsen \frac{n_2}{n_1} && \rightarrow && \alpha_c = \arcsen \frac{1,46}{1,50} \\ \alpha_c &= \arcsen(0,973) \\ \alpha_c &= 76,7^\circ\end{aligned}$$

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

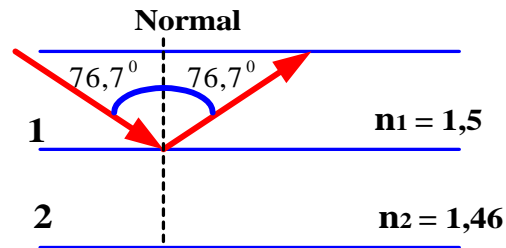


Figura 2.5 – Reflexão Total

Ainda considerando a situação anterior, introduzindo-se mais uma camada de vidro (camada 3) sobreposta à camada 1, Fig. 2.6, com índice de refração $n_3 = 1,46$. Agora este raio refletido tornou-se um raio incidente para a nova fronteira entre as camadas 1 e 3, com ângulo de incidência de $76,7^\circ$ da normal, que sofrerá reflexão total novamente retornando para a camada 1. Este raio refletido outra vez se tornará um raio incidente. Portanto, desta forma é possível guiar a luz entre duas camadas 2 e 3, através da reflexão interna total.

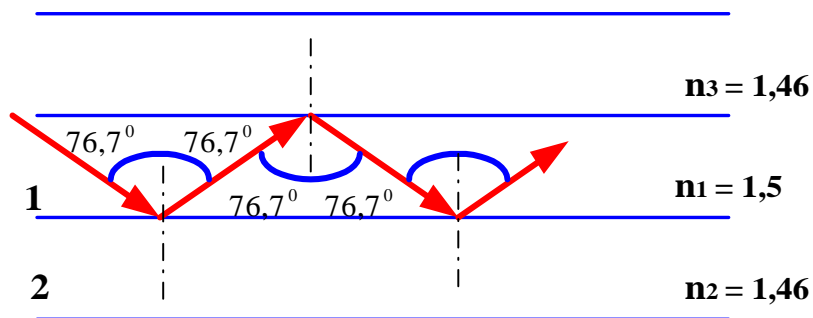


Figura 2.6 – Guiamento na luz

E é desta forma que ocorre o guiamento, na propagação da luz em uma fibra óptica. Na fibra óptica, a camada 1 é chamada de núcleo e as camadas 2 e 3 são chamadas de casca. A fibra óptica na prática tem a forma cilíndrica concêntrica com determinada espessura e com índices de refração tais que permitam a reflexão interna total., Fig. 2.7.

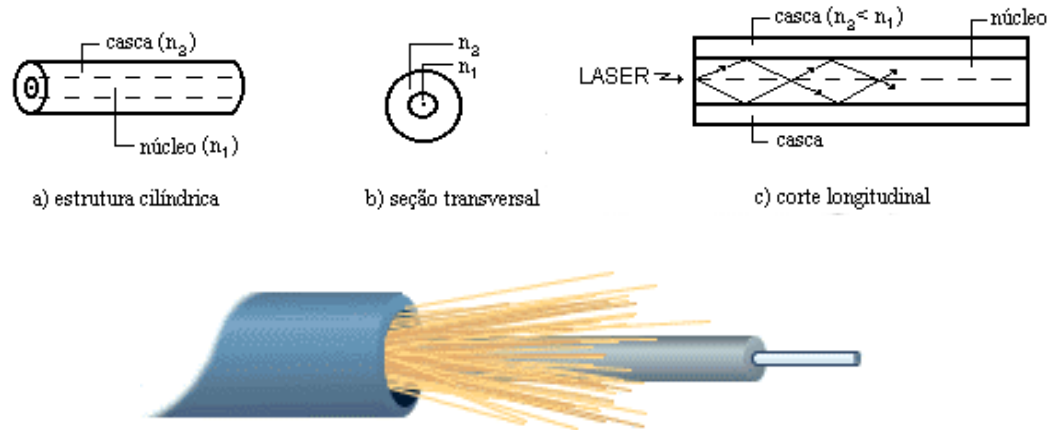


Figura 2.7– Fibra Óptica

2.1.5 Espectro Eletromagnético e Janelas de Transmissão

O espectro de transmissão óptico é referenciado em termos de comprimento de onda, diferenciando assim sistemas ópticos de sistemas eletromagnéticos (microondas). A faixa do espectro utilizada corresponde a faixa entre os comprimentos de onda de 0,6 e 1,6 μm . Durante a evolução das fibras ópticas algumas regiões dentro da faixa de transmissão, entre 0,6 e 1,6 μm , apresentaram atenuação mínima. Estas regiões passaram a ser denominadas de janelas de transmissão sendo mais conhecidas as janelas, Fig.2.8.

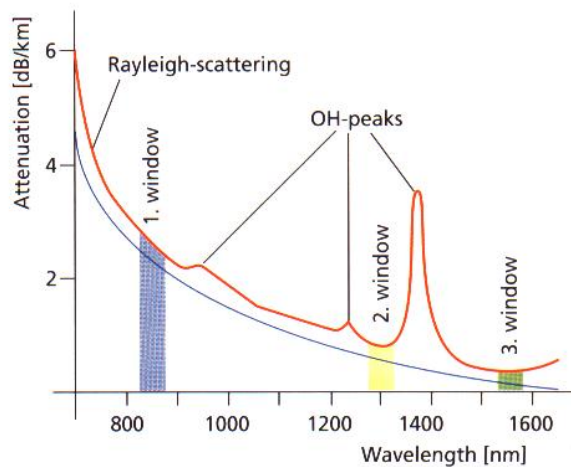


Figura 2.8 – Janelas de Transmissão

- **de 850 nm** - Apresentando atenuação de ordem de 3 a 5 dB/Km, utilizada para sistemas de curta distância onde seu uso é justificado pela maior simplicidade do sistema.
- **de 1310 nm** - Apresenta atenuação na ordem de 0,7 a 1,5 dB/Km e grande capacidade de transmissão.
- **de 1550 nm** - Apresenta atenuação na ordem de 0,2 dB/Km e grande capacidade de transmissão.

Na Fig.2.9 ilustra o espectro eletromagnético, com especial atenção para o espectro óptico.

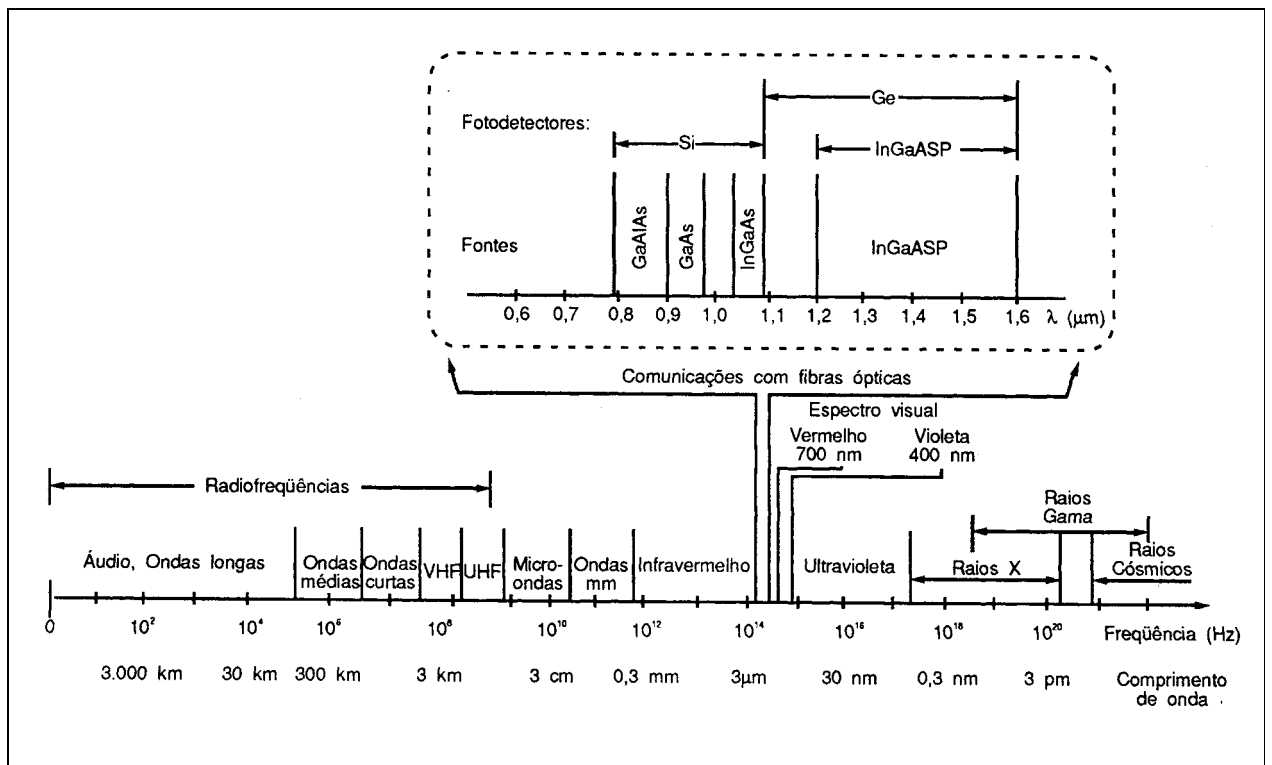


Figura 2.9 – Espectro de freqüência com destaque para o espectro óptico

Atualmente, nas fibras de boa qualidade, nas regiões de 800 a 900 *nm* 1000 a 1500 *nm*, a atenuação ocorre devido ao espalhamento Rayleigh. Em 740 *nm*, 950 *nm* e 2740 *nm* há, usualmente, picos residuais de absorção devido a íons (OH^-) da água no vidro. Na primeira janela (850 *nm*), segunda janela (1300 *nm*) e terceira janela (1550 *nm*) de emissão óptica, são evitados estes picos de absorção, sendo estes menores nas segundas e terceira janelas.

2.2 Tipos de Fibras Ópticas

As fibras ópticas costumam ser classificadas a partir de suas características básicas de transmissão, ditadas essencialmente pelo perfil de índices de refração da fibra e pela sua habilidade em se propagar um ou em vários modos de propagação. Com implicações principalmente na capacidade de transmissão (banda passante) e nas facilidades operacionais em termos de conexões e acoplamentos com fontes e detetores luminosos, resultam dessa classificação básica os seguintes tipos de fibras:

- Fibra Multimodo de índice degrau
- Fibra Multimodo de índice gradual
- Fibra Monomodo

A classificação típica das fibras feita acima reflete, de maneira geral, a evolução tecnológica básica em termos de capacidade de transmissão na aplicação mais importante das fibras ópticas: a dos sistemas de telecomunicações.

Uma das diferenças entre esses tipos de fibras, como o próprio nome diz, é quanto ao número de modos de propagação. Enquanto uma fibra monomodo contém somente um modo de propagação as fibras multimodo contém milhares de modos de propagação. Outra

diferença é quanto ao perfil do índice de refração. Estes tipos de fibras e suas características serão discutidos mais adiante.

2.2.1 Modos de propagação

Modos de propagação podem ser denominados todos os caminhos ou trajetórias que os raios luminosos podem percorrer dentro da fibra. Matematicamente são definidos pelas equações de Maxwell que são governadas pelas teorias eletromagnéticas. Assim, sendo a fibra um guia de onda que canaliza a luz que se propaga em determinados modos que nada mais são do que ondas com certas distribuições de campos eletromagnéticos que satisfaçam as equações de Maxwell para as condições de contorno da fibra.

O número de modos suportados pela fibra pode variar desde 1 até 100.000. Esse número tem relação com uma grandeza adimensional chamada “ Freqüência Normalizada (V)” cuja fórmula que a define é:

$$F_N = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} \cdot AN \quad \text{Eq.2.4}$$

Onde:

V : é a freqüência normalizada

d : é o diâmetro do núcleo

λ : é o comprimento de onda da luz

AN : é a abertura numérica

O número de modos é definido por:

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

$$N_m = \frac{F_N^2}{2} \quad \text{para fibras de índice degrau}$$

2.2.2 Abertura Numérica

Definição: é o ângulo máximo de aceitação da fibra óptica

- Ângulo de aceitação (θ_a) : É o ângulo de incidência limite acima do qual os raios luminosos que penetram na fibra óptica não serão transmitidos.

Em outras palavras, é o ângulo sob o qual os raios de luz entrando na fibra serão guiados ao longo do seu núcleo, Fig. 2.10. Como o ângulo de aceitação (θ_a) é medido no ar, fora da fibra, ele difere do ângulo de confinamento (θ_1 e θ_2) no vidro. O ângulo de aceitação normalmente é medido como abertura numérica (AN), que para a luz entrando em uma fibra vindo do ar, pode ser obtido pela Lei de Snell, considerando a situação de reflexão total :

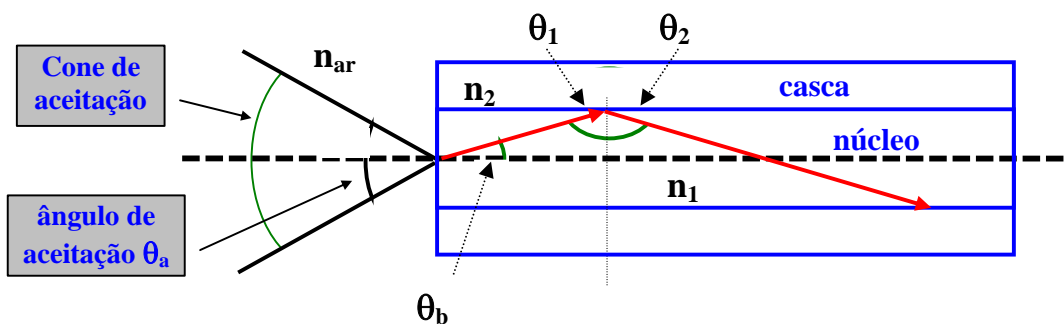


Figura 2.10 – Cone de aceitação de uma fibra óptica imersa no ar

na situação limite para reflexão total dentro da fibra temos:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{sen } \theta_2}{\text{sen } \theta_1} ; \text{ como } \text{sen } \theta_2 = 1 \quad \text{logo, } \text{sen } \theta_1 = \frac{n_2}{n_1}$$

da trigonometria temos:

$$\cos^2 \theta_1 + \text{sen}^2 \theta_1 = 1$$

$$\cos \theta_1 = \sqrt{1 - \text{sen}^2 \theta_1} = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

reflexão entre o meio e a fibra, temos:

$$n_{ar} \operatorname{sen} \theta_a = n_1 \operatorname{sen} \theta_b$$

$$\operatorname{sen} \theta_a = \operatorname{sen} \theta_b \cdot \frac{n_1}{n_{ar}}$$

Como $n_{ar} = 1$ e $\theta_b = 90^\circ - \theta$

$$\operatorname{sen} \theta_a = n_1 \cdot \cos \theta_1;$$

desta forma :

$$\operatorname{sen} \theta_a = n_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}; \text{ assim}$$

$$\text{Abertura numérica (AN)} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad \text{Eq.2.5}$$

A abertura numérica indica a capacidade da fibra de captar luz.

Outra forma de expressar a abertura numérica é em termos da diferença relativa de índices de refração (Δ) entre o núcleo e a casca da fibra:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}, \quad \text{Eq.2.6}$$

A expressão da AN, fica:

$$AN = n_1 \cdot \sqrt{2\Delta}, \quad \text{Eq.2.7}$$

Exemplo: Determine o número de modos de propagação que podem entrar em uma fibra com diâmetro do núcleo de $50 \mu\text{m}$, comprimento de onda de 1310 nm e abertura numérica de $0,158$.

2.2.3 Fibra Multimodo de Índice Degrau (MM - Step Index)

As fibras ópticas do tipo *multimodo de índice degrau* (ID), conceitualmente as mais simples, foram as pioneiras em termos de aplicações práticas. Este tipo básico de fibra óptica caracteriza-se, essencialmente, por:

- Variação abrupta do índice de refração do núcleo com relação a casca, dando origem a um perfil de índices tipo degrau, Fig.2.11.
- Dimensões e diferença relativa de índices de refração implicando a existência de *múltiplos modos* de propagação.

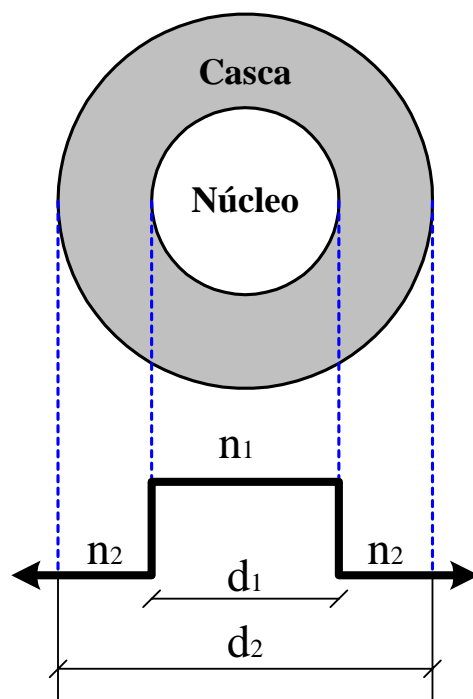
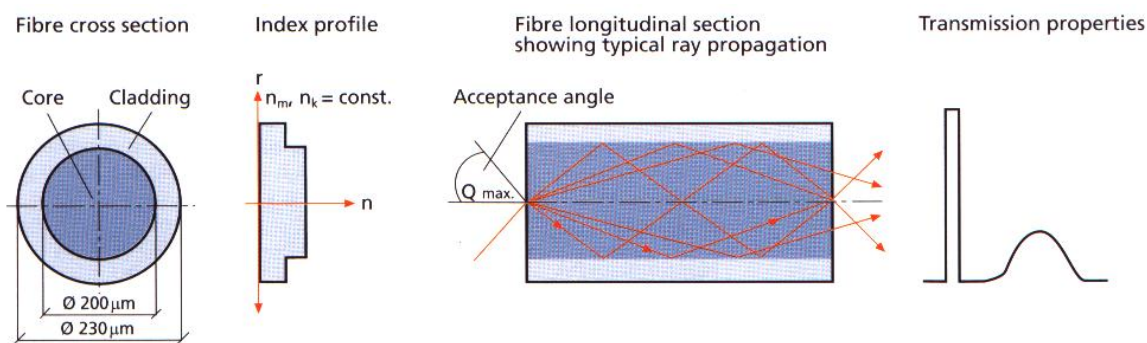


Figura 2.11 – Fibra multimodo com perfil degrau
 d_1 –diâmetro do núcleo de 50 μm a 400 μm
 d_2 –diâmetro da fibra (núcleo +casca) de 140 μm a 280 μm



Essas fibras permitem a propagação de milhares de modos de propagação, o que para comunicações em altas taxas é bastante danoso, pelo fato de implicar em uma alta dispersão modal do sinal transmitido, limitando bastante a banda passante da fibra. Em consequência disso, a aplicação das fibras multimodo ID em sistemas de comunicações restringe-se a distâncias relativamente curtas.

Uma das principais características das fibras ID, é a sua capacidade de captar energia luminosa. Essa capacidade depende apenas da diferença de índices de refração, é expressa pela abertura numérica que varia de 0,2 a 0,4, para esse tipo de fibra.

Os principais usos das fibras ID 100/140 têm sido em links curtos de dados em velocidades baixas. Os núcleo grandes podem aceitar luz de LEDs baratos e permitem o uso de conectores baratos com grandes tolerâncias. Para aplicações diferentes dos sistemas de telecomunicações (iluminação, instrumentação, etc.), onde o mais importante é a capacidade de captar luz, existem fibras multimodo ID compostas totalmente (núcleo e casca) por plástico. Estas são conhecidas Fibras de Plástico.

Portanto, as fibras multimodo ID, oferecem para aplicações em distâncias curtas e pouco exigentes em termos de banda passante, as seguintes características:

- permitem o uso de fontes luminosas de baixa coerência (mais baratas) tais como LEDs.

- Têm aberturas numéricas e diâmetros do núcleo relativamente grandes, facilitando o acoplamento com as fontes luminosas.
- Requerem pouca precisão nos conectores
- Operam em comprimento de onda de 850 nm ou 1310 nm apresentando atenuação e dispersão diferentes para cada janela de transmissão

A Tabela 2.2 e reúne os principais parâmetros característicos das fibras multimodo

ID.

Parâmetro	Símbolo	Expressão Característica
Índice de refração do núcleo	n_1	Constante
Índice de refração da casca	n_2	Constante
Diferença relativa de índices	Δ	$\frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$
Abertura numérica	AN	$n_1 \cdot \sqrt{2\Delta}$ para $\Delta \leq 1$
Frequência Normalizada	F_N	$\frac{\pi \cdot d}{\lambda} \cdot AN$
Número de Modos	M	$M = \frac{F_N^2}{2}$

Tabela 2.2 Parâmetros característicos das fibras de índices degrau

A Fig. 2.12, ilustra como o feixe de luz se propaga dentro de uma fibra multimodo degrau.

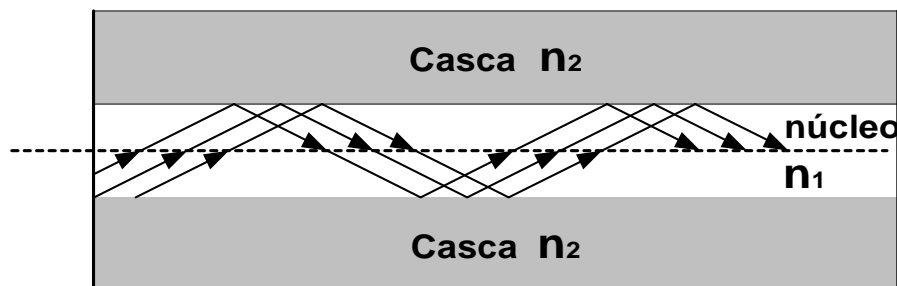


Figura 2.12 – O caminho da luz em uma fibra multimodo degrau

Resumindo:**Multimodo Índice Degrau (MM - Step Index)**

- Índice de Refração Constante do Núcleo
- Diâmetro do Núcleo de 50 a 400 nm
- Capacidade limitada de transmissão (5dB/km e 30MHz . km)
- Comprimento de Onda Típico: 850 nm

Aplicações:

- Distâncias até 1km
- Taxas de Transmissão de até 10Mbps

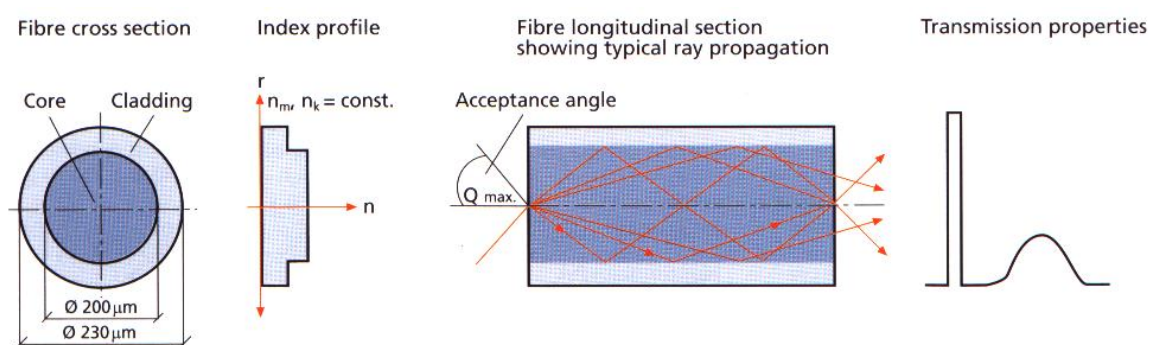


Figura 2.13 – Fibra Multimodo Índice Degrau (MM - Step Index)

2.2.4 Fibra Multimodo de Índice Gradual (MM- Graded Index)

As fibras *multimodo de Índice Gradual (IG)*, da conceituação a fabricação um pouco mais complexas, caracterizam-se principalmente pela sua maior capacidade de transmissão com relação as fibras ópticas de índice degrau . As fibras do tipo gradual obtêm seu nome da maneira como o índice de refração muda do núcleo para a casca – gradualmente.

Em fibras do tipo gradual, a transição é deliberadamente feita gradativamente. Em teoria, o índice de refração cai suavemente do centro da fibra para a borda da casca. Pode-se ver na Fig.2.14 que a variação gradual do índice de refração do núcleo constrói um perfil parabólico. Na prática, uma boa aproximação dessa curva suave é feita pela deposição de

umas duzentas camadas de vidro com composição gradualmente diferente nos primeiros estágios da da composição da pré-forma. O aquecimento e fundição da pré-forma e a sua transformação em uma fibra suaviza a distribuição.

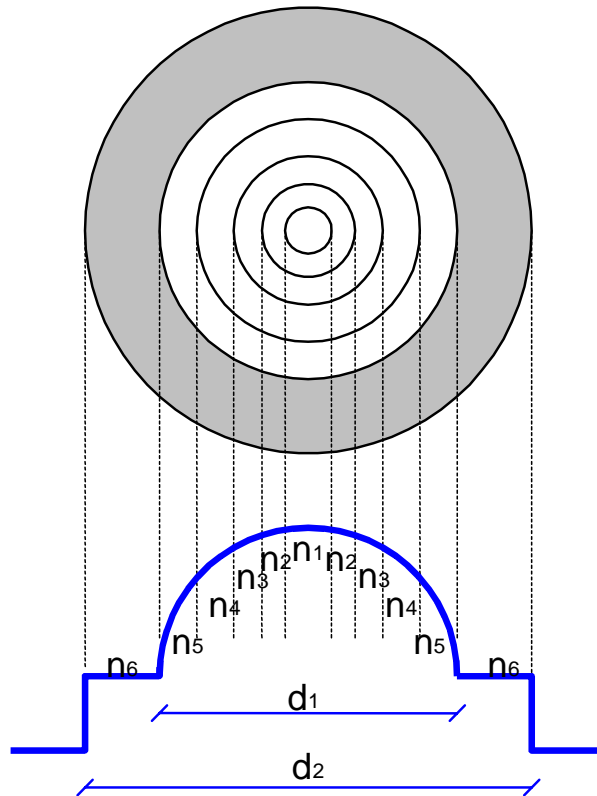


Figura 2.14 - Fibra multimodo com perfil gradual
 n_1, n_2, n_3, n_4, n_5 – índices de refração das superfícies concêntricas do núcleo
 n_6 – índices de refração da casca
 d_1 – diâmetro do núcleo de 50 μm a 85 μm
 d_2 – diâmetro da fibra (núcleo + casca) de 125 μm

Essa característica faz com que a abertura numérica decresça a medida que se afasta do eixo em direção a casca, dessa forma, pode-se deduzir que elas aceitam menos luz que as fibras de perfil ID, para uma mesma diferença de índice de refração. A capacidade de transmissão de uma fibra é fundamentalmente afetada pelo números de modos de propagação guiados, em razão do fenômeno da dispersão modal, que será explicada

oportunamente. Assim sendo, o número de modos inferior ao das fibras multimodo ID, implica uma capacidade de transmissão superior as fibras multimodo ID.

Geralmente a casca destas fibras, principalmente para aplicações em telecomunicações, é composta basicamente de sílica. Atualmente a fabricação de fibra multimodo contempla apenas 62,5 / 125 μm . Recentemente as de 50 / 125 μm voltaram ao mercado, pois aliam uma maior capacidade de transmissão pela sua menor dispersão em relação as fibras 62,5 / 125 μm , já as fibras 85 / 125 μm não são mais comerciais.

Pode-se dizer que as fibras multimodo IG tem as seguintes características:

- variação gradual do índice de refração do núcleo com relação à casca;
- permite a propagação de vários modos;
- maior banda passante em relação a fibra multimodo degrau;
- menor aceitação da energia luminosa;
- utilizadas em sistemas de comunicações onde a distância é curta (alguns quilômetros);

A Fig.2.15, mostra como o feixe de luz se propaga dentro de uma fibra multimodo gradual.

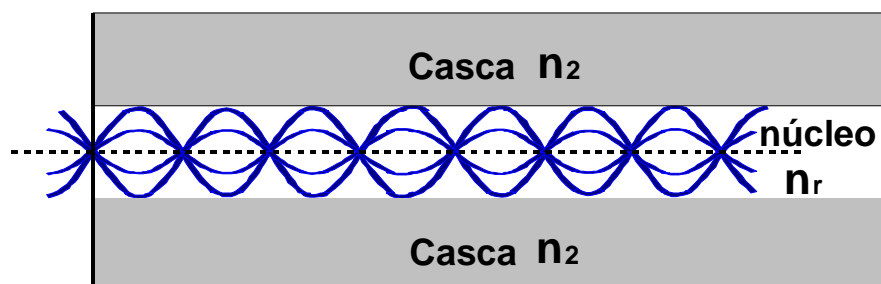


Figura 2.15 – Caminhos dos raios de luz em uma fibra multimodo gradual

Resumindo:**Multimodo Índice Gradual (MM - Graded Index)**

- Núcleo composto por vidros especiais com diferentes valores de índice de refração
- Diâmetro do Núcleo típicos: 50 e 62,5mm
- Maior capacidade que Índice Degrau (3dB/km em 850nm e 500MHz.km)
- Comprimento de Onda Típico: 850nm e 1310nm

Aplicações:

- Distâncias até 4km
- Taxas de Transmissão de até 100Mbps

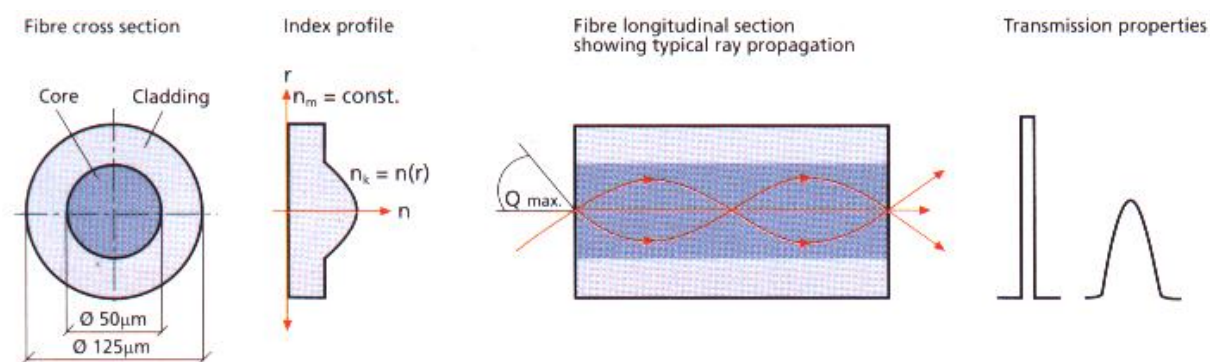


Figura 2.16 – Fibra Multimodo Índice Gradual (MM - Graded Index)

2.2.5 Fibra Monomodo (SM - Single Mode)

As fibras ópticas do tipo monomodo, distinguem-se das fibras multimodo, basicamente pela capacidade de transmissão superior e pelas suas dimensões menores. Embora tenham sido fabricadas pioneiramente e tenham mostrado suas potencialidades em banda passante muito cedo, elas tiveram seu desenvolvimento e aplicações retardados pelo fato de suas dimensões serem muito reduzidas.

A idéia da fibra monomodo é que se um núcleo de fibra é feito pequeno o suficiente, ele só irá transportar um modo. Foi visto anteriormente que o número de modos de propagação de uma fibra é definido como:

$$N_m = (d \cdot \pi \cdot AN / \lambda)^2 / 2$$

Isso mostra que existem três maneiras de reduzir o número de modos para obter uma fibra monomodo:

- reduzir o diâmetro do núcleo;
- reduzir a abertura numérica (redução da diferença dos índices de refração);
- aumentar o comprimento de onda da luz incidente.

De maneira geral, o comprimento de onda de operação é determinado por considerações de perdas de transmissão, não se constituindo, portanto, num grau de liberdade muito útil para projetos de fibras ópticas.

A redução da diferença de índices de refração, além de reduzir a sua capacidade de captação de luz, é bastante difícil de se conseguir na prática.

Portanto a redução do diâmetro do núcleo constitui-se em princípio, na variável de maior grau de liberdade no projeto de fibras monomodo. Entretanto, a redução das dimensões é limitada pelas dificuldades mecânicas e ópticas nas conexões e acoplamentos.

Uma maneira de se obter fibras monomodo com dimensões um pouco maiores consiste em utilizar um perfil de índices diferentes do tipo degrau, como por exemplo índices gradual que permitem núcleo $\sqrt{2}$ vezes maior que o perfil degrau ou perfil gradual triangular ($\alpha = 1$) com núcleo maior $\sqrt{3}$ vezes maior que o núcleo com perfil degrau.

Embora as fibras monomodo caracterizam-se por diâmetros do núcleo tipicamente inferiores a 10 μm , as dimensões de casca permanecem na mesma ordem da fibra multimodo. Isso porque a casca sendo suficientemente espessa, pode acomodar completamente o campo evanescente do modo propagado, tornando-o desprezível na interface externa da casca. De modo geral evita-se que as características de propagação da

fibra sejam afetadas por seu manuseio operacional e permite-se que o revestimento de proteção da fibra seja feito com um material com perdas de transmissão altas. Em princípio, uma espessura de casca da ordem de 10 vezes superior ao comprimento de onda de operação é suficiente para fibras com V próximo a 2,4. Na prática, porém, considerando-se os requisitos de controle de perdas por curvaturas, a relação de diâmetros núcleo/casca usual é bem maior, da ordem de 10 vezes. Um parâmetro importante nas fibras monomodo que define a eficiência no acoplamento da potência do modo fundamental no núcleo da fibra é o **Raio Modal (W_0)**, que é exatamente a metade da largura efetiva do campo propagado. Para um acoplamento ótimo, o raio modal deve ser próximo do raio do núcleo da fibra. Pode-se definir o raio modal como sendo:

$$W_0 = a \left[0,65 + 0,434 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{3/2} + 0,0149 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^6 \right]$$

onde a é o raio do núcleo da fibra e λ_c é o comprimento de onda de corte

Na Fig. 2.17 está ilustrado as dimensões típicas e perfil de índices de fibras monomodo.

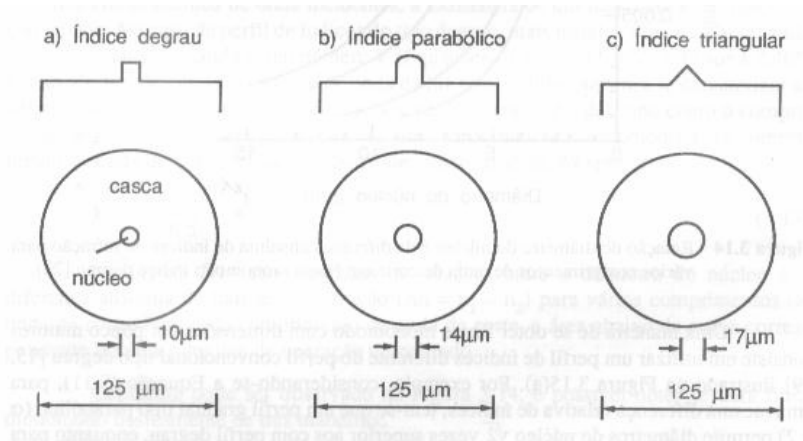


Figura 2.17 – Dimensões típicas e perfil de índices de fibras monomodo

Em razão das fibras monomodo terem dimensões bastante próximas dos comprimentos de onda da luz incidente, não são válidas as aproximações da óptica geométrica para explicar o funcionamento desse tipo de fibra óptica, nesse caso é preciso basear-se na teoria de ondas. Uma fibra é do tipo monomodo quando se caracterizar como um guia de onda, cujas dimensões e composição material (índice de refração) impliquem, para determinados comprimentos de onda incidentes, a existência de um único modo de propagação guiado.

No caso de perfil de índice degrau, mais usual, a fibra é caracterizada como monomodo quando o número V ou frequência normalizada for inferior a 2,405. Como V é função do comprimento de onda da luz transmitida, costuma-se caracterizar as fibras monomodo por um *comprimento de onda de corte* que é definido como o comprimento de onda a partir do qual a fibra tem um comportamento monomodo. Esse comprimento de onda de corte, no caso de perfil de índices degrau, é expresso por:

$$\lambda_C = \frac{\lambda.V}{2,405} \quad \text{Eq. 2.8}$$

Enquanto nas fibras multimodo a potência luminosa se propaga quase que inteiramente no núcleo da fibra, no caso das fibras monomodo uma quantidade considerável do sinal se propaga na casca da fibra. A proporção de potência luminosa propagando-se na casca e no núcleo de uma fibra monomodo é função do comprimento de onda, conforme ilustrado na Fig. 2.18.

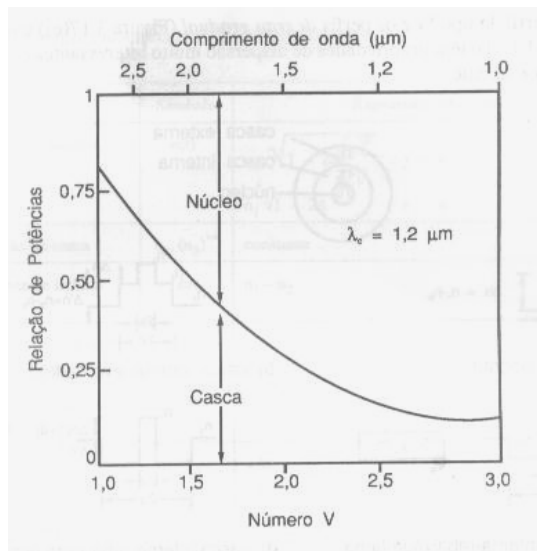


Figura 2.18 – Relação de potência luminosa no núcleo e na casca na fibra em função de V

Existem outros tipos de perfil de índices para fibras monomodo que, além de permitirem dimensões maiores para o núcleo, têm outras implicações práticas quanto às características de transmissão (atenuação e dispersão). A fig. 2.19 mostra uma fibra óptica com dupla casca.

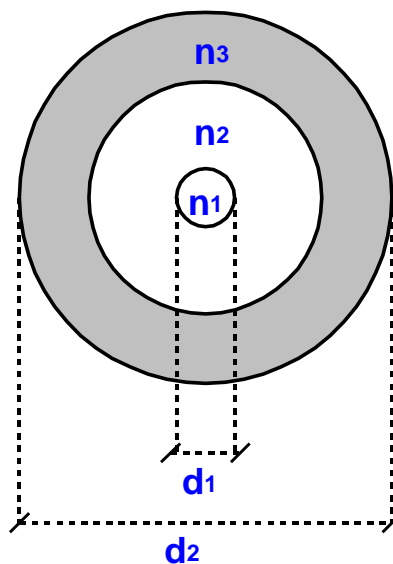


Figura 2.19 - Fibra Monomodo com dupla casca

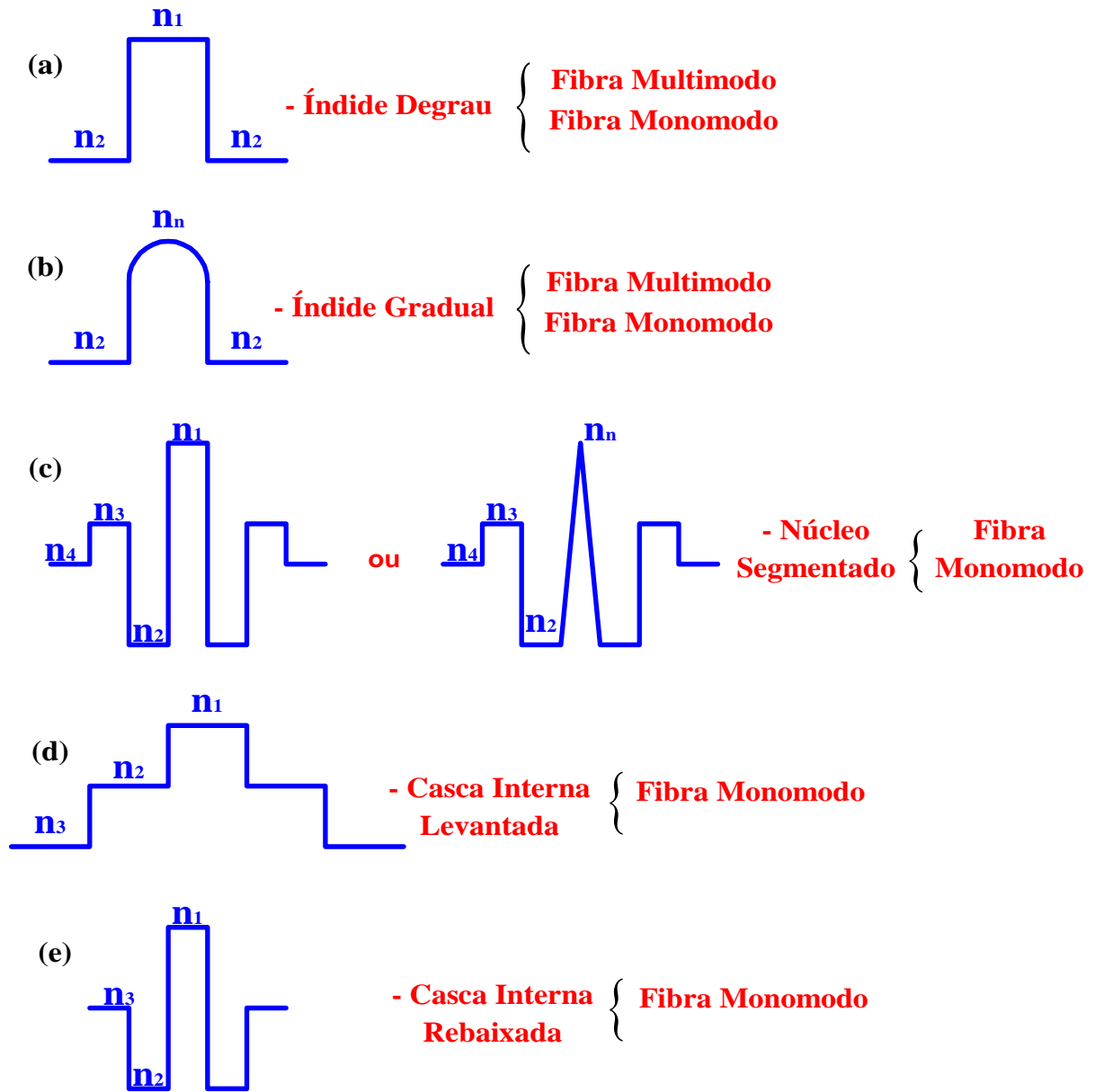
Onde:

- n_3 - Índice de Refração da Casca Externa

- n_2 - Índice de Refração da Casca Interna
- n_1 - Índice de Refração do Núcleo
- d_1 – diâmetro do núcleo de 8 μm a 17 μm
- d_2 – diâmetro da fibra (núcleo +casca) de 125 μm

Essa característica de duplicidade de casca é bastante conveniente pelo fato de proporcionar um maior confinamento da potência óptica no núcleo da fibra. Na Fig. 2.20 são mostrados os vários perfil de índices para fibras monomodo com dupla casca.

O perfil de índices mostrado na Fig. 2.17 (d) corresponde a um perfil do tipo casca-interna-levantada (*raised inner cladding*). Este perfil representa uma fibra monomodo com dupla casca, sendo a casca interna relativamente fina e com índice de refração ligeiramente superior ao da casca convencional externa.



Obs: Os perfis de núcleo segmentado e casca internas levantadas e rebaixadas são características das fibras de dupla casca

Figura 2.20 – Tipos de perfil de índices em fibras monomodo

As Fig. 2.20 (c) e (e) mostra o perfil da família casca-interna-rebaixada (*depressed inner cladding*) ou tipo W onde a dupla casca é composta por uma casca interna com índice de refração inferior ao da casca externa. O perfil tipo W implica num maior confinamento

da potência óptica no núcleo da fibra; por outro lado, impõe um comprimento de onda finito para o modo fundamental. O perfil do tipo W núcleo segmentado tem perfil de índices degrau gradual e tem propriedades de dispersão muito interessante e útil, como será visto mais adiante.

Na Tabela 2.3 a seguir, são apresentados alguns parâmetros das fibras monomodo.

Parâmetro	Símbolo	Expressão Característica
Índice de refração do núcleo	n_r^*	$n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha}$; $r < a$ $n_1 \sqrt{1 - 2\Delta r}$; $r < a$
Índice de refração da casca	$n_2, (n_3)^{**}$	Constante
Diferença absoluta de índices (núcleo - casca)	Δn	$n_1 - n_2$
Diferença absoluta de índices (casca interna - casca-externa) ^{**}	Δ'_n	$n_2 - n_3$
Razão de diferenças de índices	δ	$\frac{\Delta'_n}{\Delta_n} > -1$
Diferença relativa de índices	Δ	$\approx \frac{\Delta_n}{n_1}$; $\Delta < 1$
Frequência Normalizada	V	$2,405 \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha}}$ $2,405 \sqrt{\frac{1 + \delta}{1 + \delta (a'/a)^2}}$ (**)
Comprimento de onda de corte	λ_c	$\frac{\lambda V}{2,405 \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha}}}$ ou $\frac{\lambda V}{2,405 \sqrt{\frac{1 + \delta}{1 + \delta (a'/a)^2}}}$
Raio Modal	W_0	$a \left[0,65 + 0,434 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^{3/2} + 0,0149 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^6 \right]$

Obs: * Perfil de índices gradual ($\alpha \neq \infty$ caso índice degrau)

** Fibras monomodo com casca múltiplas (casca-interna levantada e casca-interna rebaixada), onde a é o raio do núcleo e a' é o raio da casca interna.

Tabela 2.3 Resume os principais parâmetros característicos das fibras monomodo

A Tabela 2.4 apresenta as características de algumas fibras monomodo disponíveis no mercado, para a faixa de 1300 nm.

<i>Fibra</i> <i>Parâmetro</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Perfil	índice degrau		casca-interna-rebaixada	
Δn	0,3%	0,3%	0,27%	0,28%
$\Delta' n$	-	-	0,1%	0,1%
λ_c (nm)	1200	1200	1300	1200
w_0 (μm) @ 1,3 μm	5	5	4,5	4,5
λ (nm)	1310	1310	1312	1308
atenuação média (dB/km) @ 1,3 μm @ 1,55 μm	0,35 0,20	0,40 -	0,38 0,24	0,39 0,23
Processo de fabricação	OVD	VAD	MCVD	PCVD

Tabela 2.4 – características de fibras monomodo comerciais

Resumindo:

Monomodo (SM - Single Mode)

- Apenas é guiado o modo fundamental (raio axial) da onda eletromagnética
- Diâmetro do Núcleo entre: 2 e 10 μm - poucas vezes maior que o comprimento de onda
- Elevada capacidade de transmissão (0,7dB/km - 1300nm e 0,2dB/km - 1550nm)
- Elevada Largura de Banda: 10 a 100GHz.km
- Comprimento de Onda Típico: 1310nm e 1550nm

Aplicações:

- Distâncias de até 50km sem repetidores
- Taxas de Transmissão de 2,4Gbps ou mais.

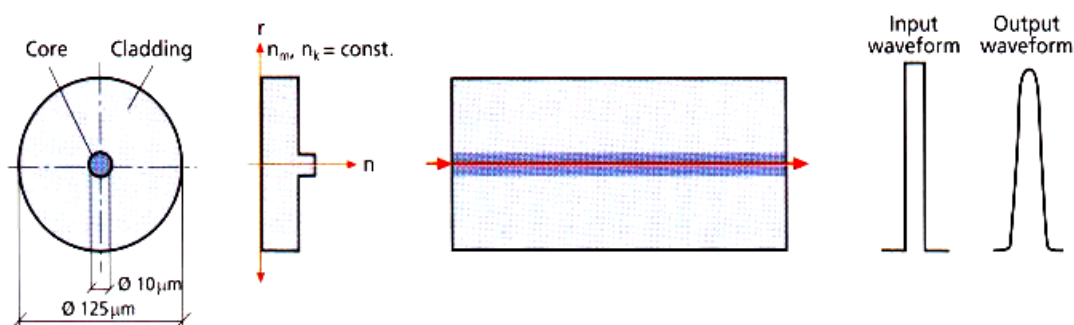


Figura 2.21 – Fibra Monomodo (SM - Single Mode)

Existem algumas fibras ópticas monomodo que são diferentes da apresentada anteriormente, que atendem algumas características específicas, são elas:

2.2.5.1 Fibra Monomodo com Dispersão Deslocada (DS)

A banda passante de uma fibra óptica é função da sua dispersão, que, por sua vez, depende de outros fatores, das características de perfil de índices do guia de onda. As fibras monomodo típicas de sílica com perfil de índices tipo degrau, caracterizam-se por uma região de dispersão nula em torno de 1310 nm. Variando-se as dimensões e diferenças de índices ou usando-se um perfil de índices diferente do degrau, tais como ilustrado nas Fig. 2.20 (c), (d) e (e), é possível deslocar as condições de dispersão nula de uma fibra monomodo para comprimentos de onda onde as perdas de transmissão são menores, por exemplo 1550 nm. Este tipo de fibra monomodo, que desloca as características de dispersão. É conhecido como fibra monomodo com dispersão deslocada (*dispersion-shifted* ou *DS*). Suas características básicas são:

- operação apenas em 1550 nm
- Dispersão nula em 1550 nm
- Atenuação inferior a 0,20 dB/Km

2.2.5.2 Fibra Monomodo com Dispersão Plana

As fibras com dispersão plana (*dispersion-flattened*) são fibras monomodo que procuram manter a dispersão em níveis bastante baixos ao longo de uma região espectral entre dois pontos com características de dispersão zero (por exemplo, 1310 nm e 1550 nm). Além de deslocar a característica de dispersão nula para 1550 nm, esse tipo de fibra pode ter perfil de índice do tipo segmentado, degrau gradual ou casca interna rebaixada estreita.

Assim, tendo dimensões adequadas, mantém as características de dispersão nula original (1310 nm ou 1550 nm) e uma dispersão plana mínima entre esses dois pontos.

A grande vantagem dessa fibra em relação ao DS. É poder operar com vários comprimentos de onda dentro da largura espectral 1310 nm e 1550 nm, permitindo por exemplo a ampliação da capacidade de transmissão do suporte através da técnica de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM).

Questionário:

1) Por que o sinal luminoso consegue percorrer a fibra óptica?

2) Nas afirmativas sobre os tipos de fibra, assinale (V) caso a afirmativa seja verdadeira e (F) se for falsa. Caso a afirmativa seja falsa justifique porque.

a) () A fibra multimodo índice gradual é a melhor fibra para a utilização em sistemas de comunicação envolvendo longas distâncias (centenas de quilômetros), pois apresenta abertura numérica maior do que a fibra monomodo e atenuação menor do que a fibra multimodo degrau.

b) () A fibra multimodo índice degrau possui grande abertura numérica, facilitando o seu uso em sistemas com banda passante larga.

c) () Uma fibra com índice de refração gradual apresenta um aumento gradual do índice de refração do centro do núcleo até a casca da fibra.

d) () A fibra monomodo apresenta baixa atenuação, em função da sua grande abertura numérica.

e) () A fibra monomodo tem um núcleo com diâmetro muito menor do que o diâmetro da casca.